Universidad de Alcalá
COMISIÓN DE ESTUDIOS OFICIALES
DE POSGRADO Y DOCTORADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

Año académico 2016/17

DOCTORANDO: **SASTRE RODRÍGUEZ, BLANCA ESTHER**
D.N.I./PASAPORTE: ******621D**

PROGRAMA DE DOCTORADO: **D330 DOCTORADO EN ECOLOGÍA. CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS**
DEPARTAMENTO DE: **CIENCIAS DE LA VIDA**
TITULACIÓN DE DOCTOR EN: **DOCTOR/A POR LA UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**

En el día de hoy 03/05/17, reunido el tribunal de evaluación nombrado por la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado y Doctorado de la Universidad y constituido por los miembros que suscriben la presente Acta, el aspirante defendió su Tesis Doctoral, elaborada bajo la dirección de **RAMÓN ARTURO BIENES ALLAS // CRISTINA DE LORENZO CARRETERO.**

Sobre el siguiente tema: *EMPLEO DE CUBIERTAS VEGETALES EN OLIVAR: REPERCUSIÓN SOBRE EL SUELO, LA EROSIÓN Y LA CALIDAD DEL ACEITE DE OLIVA VIRGEN*

Finalizada la defensa y discusión de la tesis, el tribunal acordó otorgar la CALIFICACIÓN GLOBAL[1] de (**no apto, aprobado, notable** y **sobresaliente**): Sobresaliente

Alcalá de Henares, 3 de Mayo de 2017

EL PRESIDENTE
Fdo.: Rafael Espejo Serrano

EL SECRETARIO
Fdo.: Mª José Marqués

EL VOCAL
Fdo.: Josep Rafat

FIRMA DEL ALUMNO,
Fdo.: .....

Con fecha 31 de mayo de 2017 la Comisión Delegada de la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado, a la vista de los votos emitidos de manera anónima por el tribunal que ha juzgado la tesis, resuelve:

- [X] Conceder la Mención de "Cum Laude"
- [ ] No conceder la Mención de "Cum Laude"

La Secretaria de la Comisión Delegada

[1] La calificación podrá ser "no apto" "aprobado" "notable" y "sobresaliente". El tribunal podrá otorgar la mención de "cum laude" si la calificación global es de sobresaliente y se emite en tal sentido el voto secreto positivo por unanimidad.

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ. PATRIMONIO DE LA HUMANIDAD

INCIDENCIAS / OBSERVACIONES:

Sin incidencias

Universidad de Alcalá

COMISIÓN DE ESTUDIOS OFICIALES DE POSGRADO Y DOCTORADO

En aplicación del art. 14.7 del RD. 99/2011 y el art. 14 del Reglamento de Elaboración, Autorización y Defensa de la Tesis Doctoral, la Comisión Delegada de la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado y Doctorado, en sesión pública de fecha 31 de mayo, procedió al escrutinio de los votos emitidos por los miembros del tribunal de la tesis defendida por *SASTRE RODRÍGUEZ, BLANCA ESTHER*, el día 3 de mayo de 2017, titulada *EMPLEO DE CUBIERTAS VEGETALES EN OLIVAR: REPERCUSIÓN SOBRE EL SUELO, LA EROSIÓN Y LA CALIDAD DEL ACEITE DE OLIVA VIRGEN*, para determinar, si a la misma, se le concede la mención "cum laude", arrojando como resultado el voto favorable de todos los miembros del tribunal.

Por lo tanto, la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado **resuelve otorgar** a dicha tesis la

MENCIÓN "CUM LAUDE"

Alcalá de Henares, 5 de junio de 2017
EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE ESTUDIOS OFICIALES DE POSGRADO Y DOCTORADO

Juan Ramón Velasco Pérez

Copia por e-mail a:
Doctorando: SASTRE RODRÍGUEZ, BLANCA ESTHER
Secretario del Tribunal: MARÍA JOSÉ MARQUÉS PÉREZ.
Directores de Tesis: RAMÓN ARTURO BIENES ALLAS // CRISTINA DE LORENZO CARRETERO

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ, PATRIMONIO DE LA HUMANIDAD

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ, PATRIMONIO DE LA HUMANIDAD

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA

Programa de Doctorado en:
"Ecología, Conservación y Restauración de Ecosistemas"
(D330)

Empleo de cubiertas vegetales en olivar: repercusión sobre el suelo, la erosión y la calidad del Aceite de Oliva Virgen

Tesis Doctoral presentada por

BLANCA ESTHER SASTRE RODRÍGUEZ

Director: Dr. Ramón Arturo Bienes Allas
Codirectora: Dra. Cristina de Lorenzo Carretero

Alcalá de Henares, Febrero de 2017

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN APLICADA Y EXTENSIÓN AGRARIA
Finca El Encin
Autovía A2, km 38,2
28800 Alcalá de Henares (Madrid)
Telf. +34918879400
Fax: +34918837985
E-mail: IMIDRA@madrid.org

RAMÓN ARTURO BIENES ALLAS, Investigador del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), y Director de la presente Tesis Doctoral,

HACE CONSTAR:

Que el trabajo descrito en la presente memoria, titulado "**Empleo de cubiertas vegetales en olivar: repercusión sobre el suelo, la erosión y la calidad del Aceite de Oliva Virgen"**, ha sido realizado bajo su dirección por Dª. Blanca Esther Sastre Rodríguez en el Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA) dentro del Programa de Doctorado "Ecología, Conservación y Restauración de Ecosistemas" (D330), adscrito al Departamento de Ciencias de la Vida de la Universidad de Alcalá. Esta tesis reúne todos los requisitos propios de este tipo de trabajo: rigor científico, aportaciones novedosas y aplicación de una metodología adecuada. Por lo tanto, doy mi Visto Bueno a la presentación de dicha Tesis Doctoral.

Alcalá de Henares, 27 de Febrero de 2017

Dr. Ramón Arturo Bienes Allas

DIRECTOR DE LA TESIS

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN APLICADA Y EXTENSIÓN AGRARIA
Finca El Encin
Autovía A2, km 38,2
28800 Alcalá de Henares (Madrid)
Telf. +34918879400
Fax: +34918837985
E-mail: IMIDRA@madrid.org

CRISTINA DE LORENZO CARRETERO, Directora de Departamento del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), y Co-Directora de la presente Tesis Doctoral,

HACE CONSTAR:

Que el trabajo descrito en la presente memoria, titulado "**Empleo de cubiertas vegetales en olivar: repercusión sobre el suelo, la erosión y la calidad del Aceite de Oliva Virgen"**, ha sido realizado bajo su dirección por Dª. Blanca Esther Sastre Rodríguez en el Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA) dentro del Programa de Doctorado "Ecología, Conservación y Restauración de Ecosistemas" (D330), adscrito al Departamento de Ciencias de la Vida de la Universidad de Alcalá. Esta tesis reúne todos los requisitos propios de este tipo de trabajo: rigor científico, aportaciones novedosas y aplicación de una metodología adecuada. Por lo tanto, doy mi Visto Bueno a la presentación de dicha Tesis Doctoral.

Alcalá de Henares, 27 de Febrero de 2017

Dra. Cristina de Lorenzo Carretero

CODIRECTORA DE LA TESIS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA
Edificio de Ciencias
Campus Universitario
28805 Alcalá de Henares (Madrid)
Telf. +34918854927
Fax: +34918854929
E-mail: dpto.ccvida@uah.es

MICHEL HEYKOOP FUNG-A-YOU, Profesor Titular y Director del Departamento de Ciencias de la Vida de la Universidad de Alcalá,

INFORMA:

Que el trabajo descrito en la presente memoria, titulado "**Empleo de cubiertas vegetales en olivar: repercusión sobre el suelo, la erosión y la calidad del Aceite de Oliva Virgen"**, ha sido realizado por Dª. Blanca Esther Sastre Rodríguez en el Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA) dentro del Programa de Doctorado "Ecología, Conservación y Restauración de Ecosistemas" (D330), adscrito al Departamento de Ciencias de la Vida de la Universidad de Alcalá, reúne todos los requisitos necesarios para su aprobación como Tesis Doctoral, por acuerdo del Consejo de Departamento celebrado el día 2 de Marzo 2017.

Alcalá de Henares, 2 de Marzo de 2017

Dr. Michel Heykoop Fung-A-You

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ, PATRIMONIO DE LA HUMANIDAD

A mi padre, labrador y amante del campo,

a mi madre que me quiere tanto,

a Alfredo que tan bien me cuida.

El hombre de estos campos que incendia los pinares
y su despojo aguarda como botín de guerra,
antaño hubo raído los negros encinares,
talado los robustos robledos de la sierra.

Hoy ve a sus pobres hijos huyendo de sus lares;
la tempestad llevarse los limos de la tierra
por los sagrados ríos hacia los anchos mares;
y en páramos malditos trabaja, sufre y yerra.

...

Antonio Machado – Por tierras de España

Agradecimientos

Y por fin llegó el momento de escribir los agradecimientos. Ha sido un largo camino en el que me han acompañado muchas personas y no quisiera olvidarme de nadie aunque me temo que es inevitable.

En primer lugar mi total gratitud a Ramón, por guiarme en todo este proceso y enseñarme la importancia de los suelos y de la ciencia. A Cristina por su apoyo en todo momento, por darme alas y transmitirme la ilusión de la investigación y el interés por los alimentos. A Marta Ruiz-Colmenero por animarme a hablar con Ramón para que me dirigiera la Tesis. A Gregorio Vergara que me introdujo en el mundo de la olivicultura y elaiotecnia, de su mano conocí a muchos olivicultores y elaboradores de ese gran alimento que es el Aceite de Oliva Virgen Extra. A Mª Ángeles Pérez por su ayuda con los aceites, la preparación de trabajos y ser una estupenda Jefa de Panel; a mis compañer@s de los laboratorios alimentario Zulima, Elena y Marga; de aceites Nacho, Carmen M., Carmen C.; de suelos Sara, Omar, Diana; a mis compañeros de La Chimenea Paqui, Alfonso, Antonio, Fernando, Juanpe, Francisco, Pablo, Jose, Carlos, Julio; a Raúl y César por los análisis cromatográficos; a tod@s los alumn@s de prácticas que con su entusiasmo y energía han colaborado en las tareas de campo y de laboratorio. A mis directores de departamento, Félix Cabello y Alejandro Benito, por facilitarme el trabajo y ayudarme cuando los he necesitado. A mis compañer@s de comida Mariano, Valeria, Marga, Julia, Almudena, Javier, Judith, Carolina, Eugenio... A mis otros compañer@s Teresa, Jose Pablo, Goyo, Ambrosio, Dori, Jose Luis, Marina, Susana, Noelia, Mar, Javi, Jesús, Pablo, Pili, Belén, Esther y tantos más. A mis nuevos compañer@s, Alicia, Dani y Alberto, y a los que lo fueron Blanca, Marta L., Noelia, Marina, Paloma y un largo etcétera. A Gema González por tantas horas compartidas, y a Emilia Arjona por enseñarme los intríngulis del trabajo; y como no, a Andrés García-Díaz por tantas y tantas horas de discusión sobre suelos, estadística, agricultura y cuestiones del mundo en general, eres un gran investigador y espero que podamos seguir trabajando juntos muchos años más.

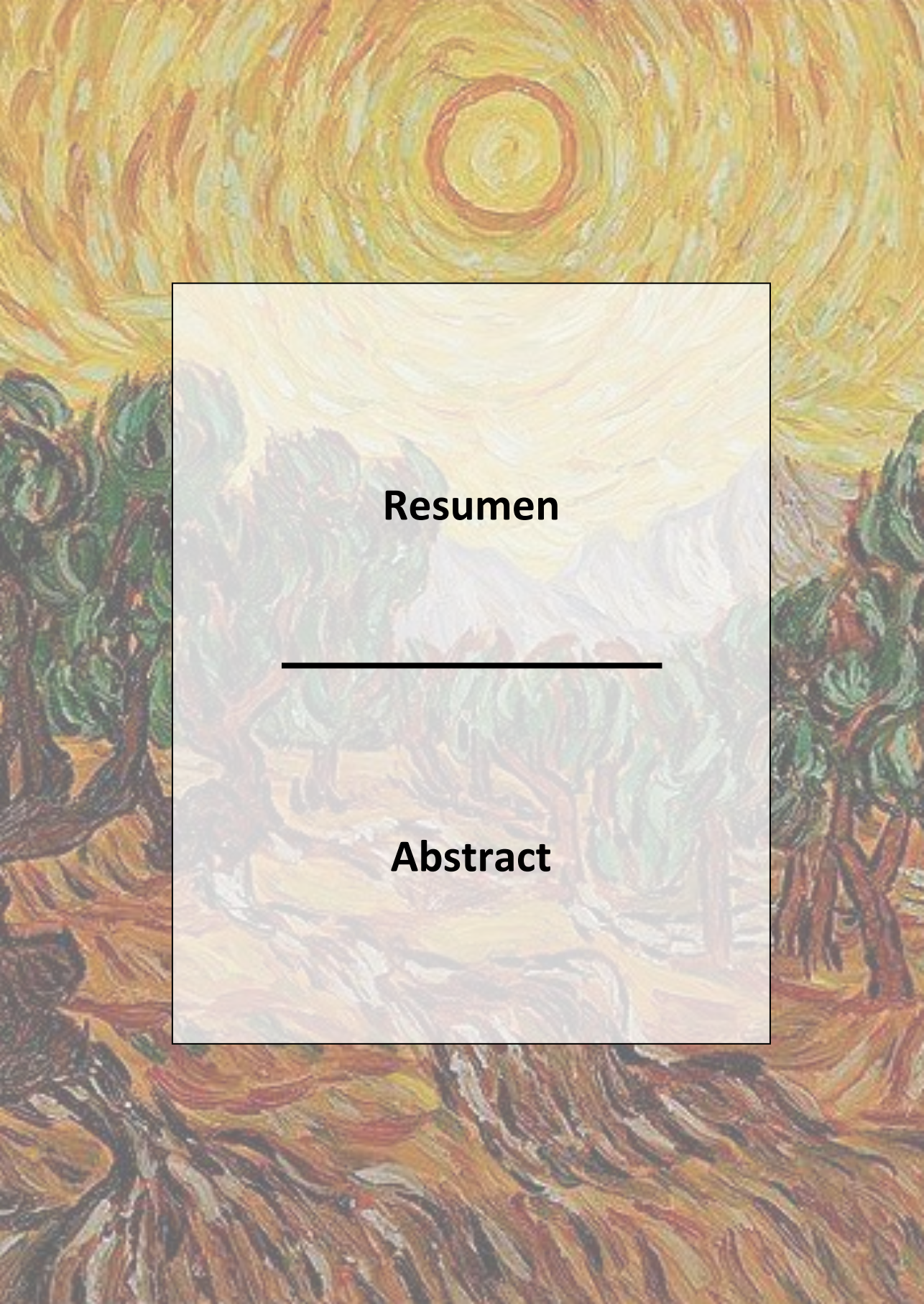
A Mª José Marqués por su gran apoyo y por tantas colaboraciones realizadas y futuras. A Celia Barbero por compartir el curso en Berna y enseñarme la importancia de la agricultura social. A Diana, Mar y Jose Luis Tenorio por acogerme en el INIA.

A mis padres, por ser el mejor referente en la vida, por enseñarme a disfrutar de lo que hago y a ser perseverante frente a la adversidad y los retos. A mis hermanos, Charo e Isidoro, que siempre me han apoyado y arropado, a mis sobrinos Luna, Yago y Adrián por darme tanta alegría y felicidad, y a mis otros sobrinos Clara, Cristina, Diego, Sylvia, Víctor y Karla por tantos momentos de

diversión; a mis cuñados Miguel, Mª Paz, Puri y Luis, Jesús Ángel y Pepi, Miguel y Ana, Jorge e Irene, por hacer que las reuniones familiares sean fantásticas. A mis primas Mª José y Regina, el que la sigue la consigue!

A mis amig@s que siempre están ahí aunque yo a temporadas deje de estar. Especialmente a Mª José Sierra y Nuria Segura por las horas de confidencias y por llevarme a tantos viajes; a Alejandra Sáenz por llevar a mi lado tantos años; a David Sánchez, Francisco Suárez, David Calvo, Alberto Sanz y David Tena con los que compartí la carrera de Biología y la pasión por el conocimiento; a Alfonso Escribano que me acoge allá donde está; a mis compañer@s de Ambientales Miriam, Leticia, MªJosé y Juan, y del Máster Julio, Silvia, Laura y Pao. A mis amig@s alcarreños (GTV y de adopción) Nuria Cardo, Mariona García, Cristina García, Elena Pascual, Rosa Sancho, Miguel Espinosa, Erundino Alonso, Sonia López, María Barriopedro, Marta Muñoz, Teresa López de Diego, Mayte Herreros, Pilar Mora, Javier Rodríguez..., por todos esos momentos de ocio disfrutado. A Mª Luisa Cuenca, mi hermana del alma, que me conoce mejor que yo misma, eres un sol.

A mi manada, mis leonas Tini y Greta y, ante todo y sobre todo, a Alfredo por estar en todo momento a mi lado, por ser mi asesor técnico, psicológico, logístico, literario..., porque contigo la vida es todo un viaje que disfruto a cada instante.


Resumen
Abstract

Resumen

La pérdida de suelo por erosión es un uno de los mayores problemas ambientales a escala global, siendo el proceso de degradación del suelo más extendido mundialmente. Los países europeos de la cuenca mediterránea son especialmente susceptibles a la erosión hídrica, con altas tasas de pérdida de suelo debido a una menor cobertura vegetal y a la mayor erosividad de las lluvias. Las prácticas agrícolas inapropiadas son una de las principales fuerzas de degradación del suelo, ocasionando tanto pérdida de suelo como reducción del contenido en materia orgánica, siendo el laboreo tradicional una práctica en absoluto sostenible en la región mediterránea.

Los cultivos leñosos, como el viñedo, olivar y almendro sufren importantes procesos de erosión debido al intenso laboreo y al uso de herbicidas que eliminan la cobertura vegetal protectora del suelo. Esta situación empeora en suelos pobres, con bajo contenido en materia orgánica y estructura débil, siendo este tipo de suelos erosionables frecuentes en los olivares españoles. En estas frágiles áreas, la escasez y variabilidad de los recursos hídricos, sumadas a la susceptibilidad a la desertificación, comprometen la productividad del suelo y hacen del cultivo del olivo una actividad con potencial de degradación del suelo en la mayor parte de España.

España es el país con mayor superficie de olivar de todo el mundo, con un total de 2,5 millones de hectáreas, de un total mundial de 10,3 millones de hectáreas, de las que alrededor del 50% se labran. La Comunidad de Madrid tiene una superficie de olivar cercana a las 28.000 ha, lo que supone un pequeño porcentaje del total del país pero una superficie importante del sector agrícola madrileño, siendo el segundo cultivo en extensión. El olivar de Madrid se ha situado en pendiente, sobre suelos pobres y delgados, cultivándose en secano el 98% de los olivares de la región y estando manejados por laboreo el 80% para reducir la competencia de la vegetación arvense por el agua y los nutrientes.

Las cubiertas vegetales vivas son una de las herramientas para controlar la escorrentía en el sector agrario recogida en el “Inventario de tecnologías disponibles en España para la lucha contra la desertificación”. Las cubiertas vegetales son una de las técnicas más eficientes de manejo sostenible del

territorio para controlar la erosión y regenerar suelos degradados, empleándose desde la década de los 90 en cultivos leñosos, sobre todo en suelos calizos, con resultados positivos en la reducción de la pérdida de suelo por erosión, la mejora del almacenamiento de agua y de las propiedades físico-químicas del suelo, siendo discutido su efecto sobre la producción y calidad del alimento.

El **principal objetivo** de esta Tesis Doctoral ha sido la evaluación del efecto de distintas cubiertas vegetales (dos anuales y una permanente) frente al laboreo, sobre las pérdidas de suelo por erosión, la variación de distintos parámetros edáficos y la producción y calidad del Aceite de Oliva Virgen (VOO, Virgin Olive Oil en sus siglas en inglés) en un olivar en pendiente en condiciones de secano, desarrollado sobre margas yesíferas y clima semiárido.

La Tesis está estructurada en siete capítulos. El **capítulo 1** introduce la problemática de la pérdida de suelo por erosión hídrica a nivel mundial. El impacto de esta erosión en los cultivos de olivar es de 4,61 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ de pérdida media en Europa y una de las herramientas más eficiente para luchar contra este problema son las cubiertas vegetales, que reducen estas pérdidas drásticamente. En el **capítulo 2** se ha estudiado, a nivel de microcuenca, las pérdidas de suelo que se han producido en las últimas décadas en un olivar en ladera manejado con laboreo y un cultivo de cereal en llano empleando el radioisótopo ^{137}Cs con distintos modelos de redistribución. El MBM2 ha arrojado una pérdida bruta de suelo de 19 Mg ha^{-1} $año^{-1}$, con una pérdida media en el olivar de 32,6 Mg ha^{-1} $año^{-1}$. Dichas pérdidas son claramente insostenibles si se tiene en cuenta que el límite tolerable de pérdida de suelo en Europa está entre las 0,3 y 1,4 Mg ha^{-1} $año^{-1}$. En el **capítulo 3** se han valorado las tasas erosivas empleando microparcelas (1 m^2) con distintas cubiertas vegetales (cebada, leguminosa y *Brachypodium distachyon*) respecto al laboreo en las calles del olivar (Noviembre de 2010 a Mayo de 2014). La pérdida de suelo del tratamiento control ha sido de 6,8 Mg ha^{-1} $año^{-1}$, reduciéndose eficazmente con el empleo de cubiertas vegetales. Las reducciones medidas han sido del 40, 60 y 80 % para la leguminosa, la cebada y el Brachypodium respectivamente. La única cubierta que ha mantenido la pérdida de suelo dentro del límite de las tasas sostenibles ha sido la de Brachypodium. Junto a los sedimentos,

compuestos principalmente por arcillas, se arrastran importantes cantidades de materia orgánica (con una tasa de enriquecimiento de 2,4) y nutrientes (sobre todo de Mg, K y P), lo que conlleva un empobrecimiento en las zonas de erosión. Allí donde los procesos erosivos han actuado con más intensidad, dando lugar a la eliminación del horizonte Ap superficial, aflora el horizonte C rico en yesos y pobre en nutrientes. Ambos factores conducen a una pérdida de fertilidad en el olivar y a una reducción de la producción.

Las estaciones del año con lluvias más erosivas en la zona han sido la primavera y, en segundo lugar, el otoño; por tanto, las pérdidas de suelo han sido superiores en ambas estaciones, por lo que sería necesario que el suelo estuviera cubierto al menos en estas épocas. Se han encontrado pequeñas diferencias entre los resultados de redistribución de suelo de los modelos de ^{137}Cs, siendo en todo caso superior a la medida con las microparcelas de erosión. Esto se ha debido a que la magnitud de la pérdida de suelo varía con la escala espacial y temporal de medición y con la metodología empleada: a mayor escala se producen más procesos erosivos (erosión en cárcavas y regueros, no sólo erosión laminar), además de integrar eventos de alta intensidad y baja frecuencia. En este capítulo también se ha puesto de relieve que las cubiertas vegetales se emplean escasamente en la región de estudio, y que los agricultores sólo parecen estar dispuestos a introducirlas en sus olivares si hubiera beneficios económicos, además de los ambientales.

También se ha estudiado la influencia de los tratamientos ensayados sobre distintos aspectos edáficos: fijación de carbono en el suelo, contenido de nitrógeno, evolución de la estabilidad estructural de los agregados, cambios en la porosidad (macro, meso y microporosidad) y densidad aparente, evolución de la infiltración y de la humedad del suelo (economía del agua) (**capítulo 4**). Los suelos yesíferos son frágiles y fácilmente degradables, por lo que las potenciales mejoras de las cubiertas vegetales anuales sobre este tipo de suelos se han visto ralentizadas, siendo tres años de manejo insuficientes para observar mejoras significativas en la mayoría de los parámetros estudiados. El manejo con la cubierta vegetal permanente Brachypodium sí que se ha mostrado efectivo para la mejora de las propiedades del suelo, principalmente para el secuestro de carbono (cerca de 1 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ respecto al control), el incremento del N del suelo hasta 1,44% frente al 1,28% del tratamiento control, la mejora de la estructura del

horizonte superficial (con agregados más estables) y la menor resistencia a la penetración por debajo de 20 cm a pesar de una mayor densidad aparente superficial. Los agregados de los suelos con cubierta vegetal aumentaron su estabilidad entre un 20 y un 50% respecto al control, comprobándose que la estabilidad se ha relacionado más con el contenido en carbono de la fracción particulada del suelo -la más lábil- que con la densidad de raíces. Además, tanto las cubiertas vegetales anuales como la cubierta permanente han incrementado la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo a 30 cm de profundidad frente al control (entre un 36 y un 55% más en las cubiertas respecto al control), lo que puede redundar en una mejora de la productividad en los olivares de secano como consecuencia de un mejor aprovechamiento de las lluvias.

En el **capítulo 5** se ha estudiado la influencia de las tres cubiertas respecto al laboreo sobre la producción del olivar y la calidad analítica (acidez libre, índice de peróxidos, color, pigmentos, polifenoles, perfil de ácidos grasos, etc.) y sensorial de los VOOs. La producción de aceituna y de aceite de la variedad de olivo Cornicabra, tolerante a la sequía, han sido influenciadas por la campaña agrícola pero no por el tipo de manejo del suelo en ninguna de las tres campañas estudiadas. El efecto de la campaña también ha sido determinante en la calidad del aceite (todos ellos de la categoría Virgen Extra), debido tanto a las diferencias entre años en cantidad de precipitación como en la carga de los árboles. Se han encontrado pequeñas diferencias entre tratamientos en la calidad de los VOO, siendo estas diferencias más importantes en la campaña más seca (2012/13) con una reducción de la acidez libre. Dada la intensa variabilidad climática interanual y su fuerte influencia sobre la producción de los olivos y la calidad de los VOOs, para establecer de forma concluyente el efecto que las cubiertas vegetales ejercen sobre la cantidad y calidad del aceite se necesitan más años de estudio, teniendo que ser incluidos en el estudio parámetros nutricionales y del estado hídrico de los árboles para lograr una visión más completa.

El **capítulo 6** aborda la discusión general de todos los resultados obtenidos en los cuatro capítulos anteriores. Se concluye que para vencer la fuerte reticencia de los agricultores madrileños a emplear cubiertas vegetales la Administración Regional tiene que actuar. El Gobierno de la Comunidad de Madrid cuenta en la actualidad con los mecanismos necesarios para el

incentivo de las cubiertas vegetales a través de ayudas directas (Pago Básico y Pago Verde) o mediante ayudas al desarrollo rural.

Finalmente, el **capítulo 7** recoge las conclusiones generales derivadas de la investigación de la presente Tesis Doctoral.

Palabras clave: cultivos leñosos, olivar, *Olea europaea*, cubierta vegetal, cubierta permanente, Brachypodium, manejo sostenible, mejora de la calidad del suelo, suelo yesífero, secuestro de carbono, control de la erosión, producción de aceituna, calidad del aceite, aceite de oliva virgen.

Abstract

Soil loss due to water erosion is one of the main global environmental concerns, being one of the most important and larger driving processes for land degradation. European countries belonging to Mediterranean Basin are especially vulnerable to water erosion, with high rates of soil loss due to less soil coverage and high erosivity rainfalls in the area. Inappropriate agricultural practices are one of the main driving forces for soil degradation, causing soil erosion and a decline in organic matter content. Traditional tillage is clearly unsustainable in Mediterranean region.

Woody crops, such as vineyards, olive and almond plantations, suffer from important erosion processes due to the intense tillage and use of herbicides to remove the plant cover which protects the soil. Soil erosion is even worse in soils with low concentrations of organic matter and weak structure; these erodible soils are common in Spanish olive groves. In this fragile areas the scarcity and variability of water resources and its susceptibility to desertification compromises soil productivity, and makes olive tree cultivation a potentially land degradation activity in most of Spain.

Spain is the major olive producer worldwide, with a total area of 2.5×10^6 ha. From a total of 10.3×10^6 ha in the world, 50% of them are usually tilled. There are ca. 28,000 ha of olive groves in the Madrid region. Although this area is not substantial in relation to the total surface area of Spanish olive groves, it is considered important in Madrid agricultural sector, being the second in extension according to cultive dedication. As it is the case with other Spanish traditional olive groves, Madrid olive trees are grown in sloping areas on poor and shallow soils. Ninety-eight percent of the olive groves in the region are rainfed and 80 % are usually tilled to reduce weed competition for water and nutrients.

Cover crops or groundcovers are a tool to runoff control in the agricultural sector, being included in the “Inventory of available technologies in Spain to combat desertification”. Cover crops are one of the most efficient tool of sustainable land management practices to control soil loss and regenerate degraded soils. Cover crops are employed since 90’s in woody crops, mainly in calcic soils, where they have proved to be an effective tool in reducing soil

erosion and improving water storage and physical properties, with its effect on yield or food quality still being controversial.

The **main goal** of this Thesis has been the assessment of the behavior of three cover crops (two annuals and one permanent) compared to tilling, over soil loss rates, changes in different edaphic parameters and variations in quantity and quality in the Virgin Olive Oils (VOOs) of a rainfed olive grove, planted on gypsum and marl soils under semiarid climate.

The Thesis is structured in seven chapters. **Chapter 1** introduces the worldwide concern for soil loss by water erosion, the impact of erosion in olive groves (4.61 Mg ha^{-1} $year^{-1}$ of soil loss on mean in Europe), and cover crops as one of the most efficient tool to fight against this problem. In **chapter 2,** soil loss in a microcatchment has been estimated in the last decades in an olive grove managed by tilling. The estimation has been developed by means of the radioisotope ^{137}Cs, employing different redistribution models. Gross soil loss from the MBM2 with ^{137}Cs data in the microcatchment reached 19 Mg ha^{-1} $year^{-1}$, with a soil loss from the sloping olive grove of 32.6 Mg ha^{-1} $year^{-1}$. These soil loss rates are clearly unsustainable considering that the limit of tolerable soil erosion is between 1.4 and 0.3 Mg ha^{-1} $year^{-1}$. In **chapter 3** soil loss rates were measured in microplots (1 m^2) in three cover crops (barley, legume and *Brachypodium distachyon*) regarding tillage in the interrows of the olive grove during almost four crop seasons (November 2010 till May 2014). Soil loss of control treatment measured in the microplot was 6,8 Mg ha^{-1} $year^{-1}$. Cover crops have efficiently reduced soil loss regarding control treatment. This reduction in annual soil loss reached 40, 60 and 80 % for legume, barley and Brachypodium respectively. Brachypodium treatment is the only one under the limit of tolerable soil erosion. Regarding sediments, mainly composed by clay, there is a mobilization of organic matter (2.4 of enrichment rate) and some nutrients (mainly Mg, K and P) which lead to an impoverishment in erosion areas. In places where erosive processes are stronger, Ap horizon removal leads to the outcropping of C horizon, rich in gypsum and poor in nutrients. Both factors lead to a loss of fertility in the olive grove and a reduction of olive production.

The most erosive seasons in the area were spring and autumn, with the biggest soil losses happening in these moments. This is the reason why it should be compulsory to protect soil against erosion at least in the spring and autumn. Slight differences have been found between the ^{137}Cs models of soil redistribution, and in any case the erosion rates were higher that soil loss measured in the erosion microplots. This difference between methods is due to the fact that soil loss depends on spatial and temporal scales besides the method employed. More erosion processes happen in larger scales (rill and gully erosion, as well as interrill), including low frequency-high magnitude events. This chapter has highlighted that cover crops are rarely used in Madrid region, and that change from tilling to cover crops would be possible if there was an economic profit and not only an environmental benefit.

The influence of the treatments in the soil parameters has been also studied: carbon sequestration, total nitrogen content, stability of aggregates, changes in porosity (macro, meso and microporosity) and bulk density, infiltration evolution and soil moisture (water economy); special attention has been paid to soil-water relationship (**chapter 4**). Gypsiferous soils are the fragile and easily degraded, these properties delayed in time the positive effects on soil quality of cover crops. Three years were not enough to find improvements in most of the studied parameters. Permanent cover crop (*Brachypodium distachyon*) management has been effective to improve soil properties, mainly in: carbon sequestration (over 1 Mg ha^{-1} $year^{-1}$ regarding control); N content, which increased up to 1.44% vs. 1.28% in control treatment; recovery and improvement of soil structure with more stable soil aggregates; less penetration resistance below 20 cm in depth, despite a higher compaction in the upper layer. Soil aggregates of cover crops treatments increased their stability between 20 and 50% regarding control treatment aggregates. In gypsiferous soils it has been proved that aggregate stability is correlated to carbon content of particulate fraction -the most labile- rather than to root density. Moreover, annual and permanent cover crops have increased soil volumetric water content at 30 cm depth regarding control (between 36 and 55% more soil water content of cover crops than control), which might lead to an increase in yield in rainfed olive groves due to a better exploitation of rainfall water.

In **chapter 5** the influence of the three cover crops vs. control on olive yield and sensorial and physico-chemical (acidity, peroxides index, colour, pigments, total polyphenols, fatty acid profile) quality have been studied. Olive and oil yield of Cornicabra cultivar, drought-resistant, has been influenced by the cropping season but not by soil management for the three cropping seasons. Cropping season effect has been also important in the VOOs quality (all of them belonging to the Extra Virgin category), due to differences in rainfall amount and the load of the olives. Slight differences in VOO quality have been found, mainly in the driest season. Cover crops have slightly influenced some VOO parameters in the driest season (2012/13) reducing free acidity; thus cover crops seem to influence water and/or nutritional status of the olive tree. In order to conclusively assess the influence of cover crops in yield and quality VOOs, more years of research are required, and nutritional and hydric parameters of olive tree have to be simultaneously studied to get a whole vision.

Chapter 6 includes the general discussion with the main findings of the former chapters. Considering that cover crops are scarcely employed in the region of study, and that farmers only will change to cover crops if there was an economic profit and not only an environmental benefit, an advice has been included: Due to farmers of Las Vegas' shire are reluctant to change from traditional tillage to cover crops the Regional Government has to act. Nowadays, Comunidad de Madrid Government has the tools to stimulate the use of cover crops through direct aids to agricultural producers (direct payments and green payment) or Rural development aid.
Finally, **chapter 7** comprises the main conclusions drawn from the research performed throughout this Thesis.

Keywords: woody crops, olive grove, *Olea europaea*, cover crop, groundcover, permanent cover crop, Brachypodium, sustainable land management, soil quality improvement, gypsiferous soil, carbon sequestration, erosion control, olive yield, olive oil quality, virgin olive oil.

Índice

Resumen/Abstract i
Resumen iii
Abstract ix
Índice xiii
Acrónimos y abreviaturas xvii
Relación de tablas xix
Relación de figuras xxv

Capítulo 1. Introducción general 1
Antecedentes y situación actual 3
La erosión hídrica 3
El cultivo tradicional del olivo 9
Las cubiertas vegetales 11
Área de estudio 15
Localización 15
Climatología 16
Geología y litología 18
Geomorfología 19
Edafología 21
Vegetación 27
Clase agrológica 28
Las parcelas de estudio y los tratamientos de cubiertas vegetales 28
Objetivos e hipótesis 35

Capítulo 2. Estimación de las tasas de redistribución del suelo en una ladera agrícola con ^{137}Cs 39
Resumen 41
Abstract 42
1. Introduction 43
2. Materials and methods 45
2.1 Study area 45
2.2. Soil sampling, analysis and ^{137}Cs determination 46
2.3. Conversion models 49
2.4. Statistical, redistribution models and GIS softwares 51
3. Results and discussion 52

3.1. Reference sites profile 52
3.2. Sampling points 52
3.3. Soil redistribution as a result of different models 53
3.4. Relationships between soil redistribution and soil properties 58
4. Conclusions 60
Acknowledgements 61

Capítulo 3. Pérdida de suelo en un olivar del centro de España con tratamiento de cubiertas vegetales y laboreo 63
Resumen 65
Abstract 67
1. Introduction 69
2. Material and methods 72
2.1. Study area 72
2.2. Olive grove management 73
2.3. Soil cover 74
2.4. Sediment analysis 75
2.5. Social approach 75
2.6. Statistical procedures 76
3. Results 76
3.1. Rainfall characteristics 76
3.2. Soil cover 77
3.3. Soil loss 78
3.4. OC concentration and texture of sediments 83
3.5. Farmer perceptions 85
4. Discussion 88
5. Conclusions 94
Acknowledgements 95

Capítulo 4. Estudiar la influencia de de distintas cubiertas vegetales sobre las propiedades físico-químicas del suelo 97
Resumen 99
Abstract 100
1. Introduction 101
2. Materials and methods 103
2.1. Site description and climatic parameters 103
2.2. Experimental design 104
2.3. Plant and soil measurements 105

2.4. Statistical analysis....108
3. Results....108
3.1. Plant cover and root density....108
3.2. Soil organic carbon and nitrogen....111
3.3. Aggregate stability....115
3.4. Porosity....115
3.5. Infiltration and soil volumetric water content....117
3.6. Soil penetration resistance....118
4. Discussion....120
4.1. Plant cover and root density....120
4.2. Soil organic carbon and nitrogen....120
4.3. Aggregate stability....122
4.4. Porosity....123
4.5. Infiltration and soil volumetric water content....123
4.6. Soil penetration resistance....124
4.7. Further considerations....125
5. Conclusions....125
Acknowledgements....126

Capítulo 5. Influencia de las distintas cubiertas respecto al laboreo sobre la producción del olivar y la calidad analítica y sensorial del VOO....127
Resumen....129
Abstract....130
1. Introduction....131
2. Materials and methods....132
2.1. Field conditions, climatic data, and plant material....132
2.2. Soil management and treatments....133
2.3. Soil moisture measurements....134
2.4. Olive harvesting, yield and oil elaboration, and oil content determination 134
2.5. Analysis of virgin olive oil....134
2.6. Statistical analysis....136
3. Results and discussion....137
3.1. Meteorology and soil water content....137
3.2. Fruit and oil yield....138
3.3. VOO: Physicochemical parameters....140
3.4. VOO: Fatty acidcComposition....145
3.5. VOO: Sensory analysis....149

3.6. Global treatment effect 150
4. Conclusions 152
Competing interests 153
Acknowledgments 153

Capítulo 6. Discusión general 155
Pérdida de suelo en cultivos leñosos manejados con laboreo 158
Cubiertas vegetales en olivar para frenar la pérdida de suelo 162
El efecto de las cubiertas vegetales en las propiedades del suelo 165
El efecto de las cubiertas vegetales en la cantidad y calidad del VOO 171
Consideraciones prácticas 177

Capítulo 7. Conclusiones generales 181

Referencias 187

Anexos 213
Anexo 1. Portadas de los artículos publicados y justificación de los enviados 2155
Anexo 2. Supplementary material of "Soil loss in an olive grove in Central Spain under cover crops and tillage treatments, and farmer perceptions" 219
Anexo 3. Extractos de normativa autonómica 219

Curriculum Vitae 227
Listado de publicaciones con factor de impacto 229
Listado de publicaciones sin factor de impacto 230
Congresos 232
Participación en proyectos de investigación 237
Otros méritos 238
Workshops y cursos 242
Sociedades académicas 243

Acrónimos y abreviaturas

θ: Contenido Volumétrico de Agua

AEMET: Agencia Nacional de Meteorología

AWC: Capacidad de Agua Disponible (Available water capacity)

BD: Densidad Aparente (Bulk Density)

BOCM: Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid

BOE: Boletín Oficial del Estado

BOJA: Boletín Oficial de la Junta de Andalucía

BOR: Boletín Oficial de La Rioja

C-MOM: Carbono de la fracción MOM (Soil Carbon in MOM fraction)

C-POM: Carbono de la fracción POM (Soil Carbon in POM fraction)

CAP: Política Agraria Común (Common Agricultural Policy)

CC: Cubiertas Vegetales (Cover crops)

CEC: Capacidad de Intercambio Catiónico (Cationic Exchange Capacity)

CT: Laboreo Tradicional (Coventional Tillage)

DOUE: Diario Oficial de la Unión Europea

EU: Unión Europea (European Union)

ET_0: Evapotranspiración de Referencia

EVOO: Aceite de Oliva Virgen Extra (Extra Virgin Olive Oil)

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y los Alimentos (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

FAOSTAT: Estadísticas de la FAO

I: Intensidad horaria de un evento lluvioso (Rainfall intensity)

IMIDRA: Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario

KE: Energía Cinética (Kinetic Energy)

MAGRAMA: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente

MAPAMA: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente

MBM1: Modelo de Balance de Masas (Mass Balance Model)

MBM2: MBM refinado (Refined MBM)

MI: Índice de Madurez (Maturity index)

MOM: Materia Orgánica asociada a la Fracción Mineral (Organic Matter associated to Mineral Fraction)

masl: Metros Sobre el Nivel del Mar (Meters Above Sea Level)

OC: Carbono Orgánico (Organic Carbon)

MUFA: Ácidos Grasos Monoinsaturados (Momounsaturaded Fatty Acids)

P: Precipitación Anual (Annual Rainfall)

RDP: Programa de Desarrollo Rural (Rural Development Programme)

PM: Modelo Proporcional (Proportional Model)

POM: Materia Orgánica Particulada (Particulate Organic Matter)

PR: Resistencia a la Penetración (Penetration Resistance)

PUFA: Ácidos Grasos Poliinsaturados (Polyunsaturaded Fatty Acids)

PWP: Punto de Marchitez Permanente (Permanent Wilting Point)

RD: Densidad de Raíces (Root density)

SOC: Carbono Orgánico del Suelo (Soil Organic Carbon)

SLM: Manejo Sostenible del Territorio (Sustainable Land Management)

SN: Nitrógeno del Suelo (Soil Nitrogen)

TP: Porosidad Total (Total Porosity)

VOO: Aceite de Oliva Virgen (Virgin Olive Oil)

Relación de tablas

Tabla 1.1. Descripción morfológica del perfil del suelo. 23

Tabla 1.2. Análisis químico del perfil del suelo. Abreviaturas: CE: Conductividad eléctrica; MO: Materia orgánica; P_2O_5: Fósforo disponible (método Olsen); K_2O: potasio disponible; CO_3^{2-}: Carbonatos totales; CIC: Capacidad de intercambio catiónico. 25

Tabla 1.3. Análisis químico del extracto de saturación de los horizontes de la calicata. Abreviaturas: CE: Conductividad eléctrica; HCO_3^-: Bicarbonatos; CO_3^{2-}: Carbonatos; Cl^-: Cloruros; SO_4^{2-}: Sulfatos. 25

Tabla 1.4. Tareas principales en el olivar de estudio. 33

Tabla 1.5. Visión general de la investigación desarrollada con sus objetivos y resultados en forma de publicación y manuscritos incluidos en esta Tesis Doctoral. 37

Tabla 2.1. Propiedades físico-químicas básicas del suelo. CE: elementos gruesos; Arena (2000-20 µm); Limo (20-2 µm); Arcilla (<2 µm); B: densidad aparente; CEC: capacidad de intercambio catiónico; EC: conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo; SOC: carbono orgánico del suelo; SN: nitrógeno del suelo. ***Table 2.1.*** *Basic physical and chemical properties of the soil. CE: Coarse elements; Sand (2000-20 µm); Silt (20-2 µm); Clay (<2 µm); B: bulk density; CEC: cation exchange capacity; EC: electrical conductivity of a saturated soil extract; SOC: soil organic carbon; SN: soil nitrogen.* 46

Tabla 2.2. Propiedades físicas y químicas de las muestras superficiales del suelo. Punto de muestreo (SP); densidad aparente (B); elementos gruesos (CE); Carbono orgánico (OC); Nitrógeno total (N); Fósforo disponible (P); Actividad en masa del ^{137}Cs (^{137}Cs). ***Table 2.2.*** *Physical and chemical properties of the top soil samples. Sampling point (SP); Bulk density (B); Coarse elements (CE); Organic carbon (OC); Total nitrogen (N); Available phosphorus (P); ^{137}Cs mass activity (^{137}Cs).* 54

Tabla 2.3. Tasas calculadas de erosión/deposición utilizando distintos métodos, PM: Modelo Proporcional; MBM1: Modelo del Balance de Masas 1; MBM2: Modelo Refinado del Balancde de Masas. ***Table 2.3.*** *Erosion/deposition rates calculated using the different models. SP: sampling poing, PM: Proportional model; MBM1: Mass Balance Model 1; MBM2: Refined mass balance model.* 55

Tabla 2.4. Correlaciones de Spearman entre las propiedades del suelo y la tasa de redistribución del MBM2. Tasa de redistribución (R); Actividad en masa (^{137}Cs); Densidad aparente (B); Elementos gruesos (CE); Carbono orgánico (OC); Nitrógeno total (N); Fósforo disponible (P). ***Table 2.4.*** *Spearman's correlations between soil properties and soil redistribution rate of MBM2. Redistribution rate (R); Mass activity (^{137}Cs); Bulk density (B); Coarse elements (CE); Organic carbon (OC); Total nitrogen (N); Available phosphorus (P)*. 58

Tabla 2.5. Media y desviación estándar de las propiedades físicas y químicas del suelo para los puntos de erosión y deposición y el p-valor del ANOVA. Densidad aparente (B); Elementos gruesos (CE); Carbono orgánico (OC); Nitrógeno total (N); Fósforo disponible (P). ***Table 2.5.*** *Mean and standard deviation of physical and chemical soil properties for erosion or deposition points and the p-value of the ANOVA. Bulk density (B); Coarse elements (CE); Organic carbon (OC); Total nitrogen (N); Available phosphorus (P)*. 59

Tabla 3.1. Listado de las evaluaciones de erosión llevadas a cabo en olivares (CT: Laboreo convencional; CC: Cubiertas vegetales). ***Table 3.1.*** *List of erosion assessments carried out in olive groves (CT: Conventional tillage; CC: Cover crops)* 71

Tabla 3.2. Media y desviación estándar (SD) de las características primarias de los eventos lluviosos: número de eventos (N), cantidad de lluvia (P), intensidad máxima de lluvia en 15 minutos (I_{15}), intensidad máxima de lluvia en 30 minutos (I_{30}), intensidad máxima de lluvia horaria (I), energía cinética (KE) y erosividad de la lluvia (R). ***Table 3.2.*** *Average and standard deviation (SD) of the primary characteristics of rainfall events: number of events (N), rainfall amount (P), maximum 15-minute rainfall intensity (I_{15}), maximum 30-minute rainfall intensity (I_{30}), maximum hourly rainfall intensity (I), kinetic energy (KE) and rainfall erosivity (R)*. 77

Tabla 3.3. Media y desviación estándar (SD) de la pérdida de suelo de los tratamientos control (CON), cebada (HOR), leguminosa (LEG) y *B. distachyon* (BRA); el porcentaje de reducción de la pérdida de suelo comparado con el tratamiento control; y la media y SD de la pérdida de suelo por evento. N es el número de casos (4 campañas x 3 repeticiones). ***Table 3.3.*** *Average and standard deviation (SD) of soil loss for the treatments control (CON), barley (HOR), legume (LEG) and B. distachyon (BRA); the reduction percentage of soil loss compared with the control treatment; and the average and SD of soil loss per event. N is the number of cases (4 cropping seasons x 3 repetitions).* 78

Tabla 3.4. Media y desviación estándar (SD) de la pérdida de suelo por evento (g m^{-2}) durante las diferente estaciones para los tratamientos control (CON), cebada (HOR), leguminosa (LEG) y B. distachyon (BRA). Entre paréntesis el número de eventos lluviosos. ***Table 3.4.*** *Average and standard deviation (SD) of soil loss per event (g m^{-2}) during the different seasons for the treatments control (CON), barley (HOR), legume (LEG) and B. distachyon (BRA). Number of rainfall events in brackets.* 80

Tabla 3.5. Pérdida de suelo acumulada para los tratamientos control (CON), cebada (HOR), leguminosa (LEG) y B. distachyon (BRA); porcentaje de pérdida de suelo relativo del total de pérdida de suelo dentro de cada tratamiento; media y desviación estándar (SD) de la pérdida de suelo por evento para cada manejo y energía cinética de la lluvia (clase 1: KE≤2 MJ ha^{-1}, class 2: 2<KE≤4 MJ ha^{-1} or class 3: KE>4 MJ ha^{-1}). Entre paréntesis el número de eventos lluviosos. ***Table 3.5.*** *Cumulative soil loss for the treatments control (CON), barley (HOR), legume (LEG) and B. distachyon (BRA); the percentage of soil loss relative to the total soil loss within the treatment; the average and standard deviation (SD) of soil loss per event for each management and rainfall kinetic energy (class 1: KE≤2 MJ ha^{-1}, class 2: 2<KE≤4 MJ ha^{-1} or class 3: KE>4 MJ ha^{-1}). Number of cases in brackets*.....82

Tabla 3.6. Media y desviación estándar (SD) de la périda de suelo por evento, con el número de casos entre paréntesis (N). Cobertura del suelo: baja (0-20%), media (20-40%) y moderada-alta (>40%); y la energía cinética de la lluvia (clase 1: KE≤2 MJ ha^{-1}, class 2: 2<KE≤4 MJ ha^{-1} or class 3: KE>4 MJ ha^{-1}). ***Table 3.6.*** *Average and standard deviation (SD) of soil loss per event, with the number of cases in brackets (N). Soil cover: low (0-20%), medium (20-40%) and moderate-high (>40%); and the rainfall kinetic energy (class 1: KE≤2 MJ ha^{-1}, class 2: 2<KE≤4 MJ ha^{-1} or class 3: KE>4 MJ ha^{-1})* 83

Tabla 3.7. Correlaciones de Spearman entre el carbono orgánico (OC) y las clases texturales del suelo (arena, limo, arcilla y limo+arcilla) de los sedimentos. La cantidad de lluvia (P), intensidad máxima de lluvia en 15 minutos (I_{15}), intensidad máxima de lluvia en 30 minutos (I_{30}), intensidad máxima de lluvia horaria (I), energía cinética (KE) y erosividad (factor R). ***Table 3.7.*** *Spearman's correlations between organic carbon (OC) and the soil textural classes (Sand, Silt, Clay and Silt+Clay) of sediments. The rainfall amount (P), maximum intensity in 15 minutes (I_{15}), maximum intensity in 30 minutes (I_{30}), maximum intensity in 1 hour (I), Kinetic Energy (KE), and erosivity (R Factor)* 84

Tabla 3.8. Media y desviación estándar (SD) de las fracciones texturales y del OC de los suelos de referencia (Ap_1) y de los sedimentos de dos grupos según la intensidad de la lluvia, en moderada 2<I≤20 mm h^{-1} y alta intensidad 20<I<50 mm h^{-1}. Entre paréntesis el número de muestras. La cantidad de lluvia (P), intensidad máxima de lluvia en 15 minutos (I15), intensidad máxima de lluvia en 30 minutos (I30), intensidad máxima de lluvia horaria (I), energía cinética (KE) y erosividad (factor R). ***Table 3.8.*** *Average and standard deviation (SD) of textural fractions and OC of the reference soil (Ap_1) and sediments of two groups according to the rainfall intensity, which was moderate 2<I≤20 mm h^{-1} and high intensity 20<I<50 mm h^{-1}. The number of samples is given in the brackets. The rainfall amount (P), maximum intensity in 15 minutes (I_{15}), maximum intensity in 30 minutes (I_{30}), maximum intensity in 1 hour (I), Kinetic Energy (KE), and erosivity (R Factor)*..... 84

Tabla 3.9. Perfiles de agricultores y explotaciones y una breve revisión de los factores bio-físicos que afectan al suelo según identifican los agricultores. La justificación de sus prácticas agrarias y de algunos elementos socioeconómicos según afectan a la adopción de prácticas de SLM. ***Table 3.9.*** *Farmer and exploitation profiles and a brief review of the bio-physical factors affecting the soil as identified by land users. The justifications for their management practices and some socioeconomics elements affecting the adoption of SLM practices*..... 86

Tabla 4.1. Propiedades físicas y químicas básicas del suelo. Arena (2000-20 µm), Limo (20-2 µm), Arcilla (<2 µm), BD: densidad aparente, CEC: capacidad de intercambio catiónico, EC: conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo, SOC: carbono orgánico del suelo, SN: nitrógeno del suelo. ***Table 4.1.*** *Basic physical and chemical properties of the soil. Sand (2000-20 µm), Silt (20-2 µm), Clay (<2 µm), BD: bulk density, CEC: cation exchange capacity, EC: electrical conductivity of a saturated soil extract, SOC: soil organic carbon, SN: soil nitrogen*. 103

Tabla 4.2. Tabla del ANOVA de dos vías para la densidad de raíces (RD) y medias LS como función de los distintos tratamientos y profundidades (el número de muestras por tratamiento fue de 5) después de 3 años de manejo. ***Table 4.2.*** *Two-ways ANOVA Tabla for Root density (RD) and LS means as a function of the different treatments and depths (the number of cores per treatment was 5) after 3 years of management* 110

Tabla 4.3. MANOVA (prob>F) y medias LS de las propiedades físicas y químicas del suelo para los tratamientos y profundidades después de 3 años de manejo. SOC: carbono orgánico del suelo, C-MOM: carbono asociado a la fracción

mineral, C-POM: carbono de la fracción particulada, relación C-POM/SOC, SN: nitrógeno del suelo, N-MOM: nitrógeno asociado a la fracción mineral, N-POM: nitrógeno de la fracción particulada, relación N-POM/SN, relación C/N, CND: conteo del número de gotas, WSA: agregados estables al agua. ***Table 4.3.*** *MANOVA (prob>F) and LS mean of chemical and physical soil properties for the treatments and depths after 3 years of management. SOC: soil organic carbon, C-MOM: mineral-associated carbon, C-POM: particulate carbon, C-POM/SOC ratio, SN: soil nitrogen, N-MOM: mineral-associated nitrogen, N-POM: particulate nitrogen, N-POM/SN ratio, C/N ratio, CND: Counting number of drops, WSA: Water-stable aggregates.*.....112

Tabla 4.4. Media y desviación estándar del contenido volumétrico de agua en el suelo (m^3 m^{-3}) para cada estación para los cuatro tratamientos y las dos profundidades después de 3 años de manejo del suelo. ***Table 4.4.*** *Mean and standard deviation of soil volumetric water content (m^3 m^{-3}) per season for the four treatments and two depths after 3 years of management*. 118

Tabla 4.5. Valores medios y desviación estándar (SD) de la Resistencia a la penetración después de 3 años de manejo, a distintas profundidades. N: número de repeticiones. ***Table 4.5.*** *Mean and standard deviation (SD) values of Penetration resistance after 3 years of management at different depths. N: number of repetitions*. 119

Tabla 5.1. ANOVA de medidas repetidas (prob>F) para la producción de fruto por árbol y de aceite por hectárea para los 3 años (n=10). ***Table 5.1.*** *Repeated-measures ANOVA (prob>F) for fruit yield per tree and oil yield per ha for the three years (n=10).* 140

Tabla 5.2. MANOVA (prob>F) para los parámentros del VOO como función del tratamiento y del año (n=3). ***Table 5.2.*** *MANOVA (prob>F) for VOO parameters as a function of treatment and year (n=3)* 141

Tabla 5.3. Medias LS para los parámetros de los VOO del MANOVA como función de los distintos tratamientos y años (n=3). ***Table 5.3.*** *VOO parameters LS means from the MANOVA as a function of the different treatments and years (n=3)* 141

Tabla 5.4. MANOVA (prob>F) de los Ácidos Grasos del Aceite (%) como función del tratamiento y el año (n=3). ***Table 5.4.*** *MANOVA (prob>F) of Oil Fatty Acids (%) as a function of treatment and year (n=3)* 147

Tabla 5.5. Medias LS de los Ácidos Grasos del Aceite (%) como función del tratamiento y el año (n=3). ***Table 5.5.*** *Oil Fatty Acids (%) LS means from the MANOVA as a function of treatment and year (n=3)* 147

Tabla 5.6. Medias LS y desviación estándar de las carácteristicas sensoriales de los VOO para los tratamientos y los años (n=3). Las covariables que aparecen en el modelo se evaluaron para: Índice de madurez: 3.5. ***Table 5.6.*** *VOO sensory characteristics LS means and standard deviation for treatments and years (n=3). Covariates appearing in the model are evaluated at the following values: Maturity Index = 3.5*. 149

Tabla 5.7. MANOVA (prob>F) de las características sensoriales del VOO como función del tratamiento y el año (n=3). ***Table 5.7.*** *MANOVA (prob>F) of VOO sensory characteristics as a function of treatment and year (n=3)* 149

Relación de figuras

Figura 1.1. Mapa de la vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica. Fuente: Nachtergaele *et al.* (2011) 3

Figura 1.2. Pérdida de suelo por erosión hídrica en la Unión Europea. Fuente: European Soil Data Centre (ESDAC) (2015).....5

Figura 1.3. Zona biogeográfica del olivar en la cuenca Mediterránea. Fuente: Gaussen & De Philippis (1955). 9

Figura 1.4. Mapas de localización de la zona de estudio, a) Comunidad de Madrid en España; b) mapa fisiográfico de la Comunidad de Madrid, el punto rojo marca la zona de estudio; c) ortofoto de 2014 de la microcuenca y la parcela10. 15

Figura 1.5. Diagrama ombrotérmico (serie de datos 2002-2016).. 17

Figura 1.6. Precipitación y ET_0: Evapotranspiración de referencia (serie de datos 2002-2016).. 17

Figura 1.7. Gráficos de temperatura (T, figura 1.7a) y precipitación (P, figura 1.7b) media mensual para los años de estudio (2010-2014).. 18

Figura 1.8. Mapa geológico y litológico con la microcuenca y la parcela 10. 19

Figura 1.9. Modelo digital de elevaciones con la microcuenca y la parcela 10. Elaboración propia a partir de las curvas de nivel a 5 m. 20

Figura 1.10. Mapa de pendientes con la microcuenca y la parcela 10. Elaboración propia a partir de las curvas de nivel a 5 m. 21

Figura 1.11. Fotografía de la calicata. La escasa profundidad de la calicata se debe al afloramiento del sustrato yesífero con 22

Figura 1.12. Análisis granulométrico de los perfiles de la calicata. En el horizonte Cy no se pudo separa la fracción limo de arcilla por problemas de floculación, por lo que el dato presentado es la suma de ambas fracciones 26

Figura 1.13. Fotografía desde la parcela 10 hacia el Sureste 27

Figura 1.14. Fotografía de la vegetación natural del entorno desde la parcela 10 hacia el Norte 27

Figura 1.15. Dos vistas de las parcelas de estudio sobre ortofoto de 2012 en 3 dimensiones (forzado de Z=1,5 para magnificar el relieve de la zona). El recinto verde se corresponde con la parcela 10 (a) y el rosa con la microcuenca (b).. 29

Figura 1.16. Fotos de los tratamientos ensayados tomadas en la primavera de 2013, excepto los yeros que se tomó en la primavera de 2014. 31

Figura 1.17. Fotografías de las principales operaciones realizadas en la parcela de ensayo. 33

Figura 1.18. Situación de las microparcelas de erosión en las calles del olivar de los distintos tratamientos. 34

Figura 2.1. Ortofotos de las áreas de referencia desde 1946 hasta 2014. ***Figure 2.1.*** *Ortophotos of the references areas since 1946 to 2014*..... 47

Figura 2.2. Puntos de referencia (círculos rojos), puntos de muestreo (triángulos amarillos) y la microcuenca sobre el modelo digital de elevaciones (DEM). ***Figure 2.2.*** *Reference points (red circles), sampling points (yellow triangles) and the microcatchment over the digital elevation model (DEM).* 48

Figura 2.3. Distribución en profundidad media del ^{137}Cs para los dos sitios de referencia. ***Figure 2.3.*** *Mean depth distribution of ^{137}Cs for the two reference sites.*..... 52

Figura 2.4. Puntos de muestreo (círculos blancos) y la microcuenca (línea negra) sobre una fotografía tomada desde un zepelin después de una lluvia de alta intensidad en Octubre de 2007. ***Figure 2.4.*** *Sampling points (white circles) and the microcatchment (black line) over a picture taken from a zeppelin after a high intensity rainfall in October 2007*. 53

Figura 2.5. Puntos de referencia (en rojo), puntos de muestreo (en morado) en la microcuenca (con línea rosa) a) sobre la ortofoto de 2012; b) con el mapa de pendientes en %; y c) con el mapa de redistribución de de suelo (- zona de erosión, + zona de deposición) en Mg ha^{-1} año^{-1}. ***Figure 2.5.*** *Reference points (in red), sampling points (in purple) in the microcatchment (in pink line) a) over the ortophoto of 2012; b) with the slope map in %; and c) with the soil redistribution rates map (- erosion area, + deposition area) in Mg ha^{-1} yr^{-1}*..... 57

Figura 3.1. Esquema de las posiciones de los olivos, operaciones principales y localización de los microplot en el olivar. ***Figure 3.1.*** *Layout of olive trees positions, primary operations and microplot locations in the olive grove*..... 74

Figura 3.2. Cobertura del suelo (%) por tratamiento (CON: control HOR: cebada, LEG: leguminosa y BRA: *B. distachyon*) a lo largo del periodo de estudio. ***Figure 3.2.*** *Soil cover (%) per treatment (CON: control, HOR: barley, LEG: legume and BRA: B. distachyon) over the study time.*..... 78

Figura 3.3. Pérdida de suelo acumulada (g m^{-2}) por tratamiento (CON: control HOR: cebada, LEG: leguminosa y BRA: *B. distachyon*) y la cantidad de lluvia (mm) registrada por evento en las columnas. **Figure 3.3.** Cumulative soil loss (g m^{-2}) per treatment (CON: control, HOR: barley, LEG: legume and BRA: *B. distachyon*) and the rainfall amount (mm) registered per event in the columns.....79

Figura 3.4. Reducción de la pérdida de suelo en comparación con el suelo cubierto. ***Figure 3.4.*** *Soil loss reduction compared with covered soil*.....80

Figura 3.5. Regresión linear entre la KE acumulada y la pérdida de suelo acumulada para los distintos tratamientos (CON: control, HOR: cebada, LEG: leguminosa, BRA: *B. distachyon*). **Figure 3.5.** Linear regression between cumulative KE and cumulative soil loss for the different treatments (CON: control, HOR: barley, LEG: legume and BRA: *B. distachyon*).....81

Figura 4.1. Cobertura vegetal (%) por tratamiento y estación en 2013. Barra de error: desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos para p<0.05 de acuerdo al test Games-Howell. ***Figure 4.1.*** *Plant cover (%) per treatment and season in 2013. Error bar: Standard deviation. Different letters mean differences between treatments at p<0.05 according to Games-Howell test.* 109

Figura 4.2. Densidad de raíces (DR) en el perfil para los distintos tratamientos y profundidades después de 3 años de manejo. Distintos círculos significan diferencias significativas entre tratamientos para la misma profundidad según el test LSD para p<0.05. ***Figure 4.2.*** *Root density (RD) in the profile for the different treatmetns and depths after 3 years of management. Different circles mean significant differences between treatments for the same depth according to LSD at p<0.05.* 110

Figura 4.3. Carbono orgánico: Total (SOC), asociado a la fracción mineral (C-MOM) y particulado (C-POM) para las profundidades 0-5 cm (a) y 5-10 cm (b); y nitrógeno: Total (SN), asociado a la fracción mineral (N-MOM) y particulado (N-POM) para las profundidades 0-5 cm (c) y 5-10 cm (d) después de 3 años de manejo. Los triángulos muestran el dato en porcentaje (%) de C o N en el el total del suelo. Letras distintas indican diferencias entre tratamientos de acuerdo al test LSD. ***Figure 4.3.*** *Organic Carbon: Total (SOC), mineral-associated (C-MOM) and particulate (C-POM) at 0-5 cm (a) and 5-10 cm depth (b); and Nitrogen: Total (SN), mineral-associated (N-MOM) and particulate (N-POM) at 0-5 cm (c) and 5-10 cm depth (d) after 3 years of management. Triangles show the data in percentage (%) of C or N in the total of soil. Different letters mean differences between treatments according to LSD test.* 114

Figura 4.4. Estabilidad de agregados: test CND (a) y WSA (b) después de 3 años de manejo. Letras minúsculas diferentes indican diferencias entre tratamientos para la misma profundidad según el test LSD ($p<0.05$) y letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre profundidades para el mismo tratamiento según el test LSD ($p<0.05$). ***Figure 4.4.*** *Aggregate stability: CND test (a) and WSA test (b) after 3 years of management. Different lowercase letters mean differences between treatments for the same depth according to LSD test ($p<0.05$) and different uppercase letters mean differences between depths for the same treatment according to LSD test ($p<0.05$).* 115

Figura 4.5. Macroporosidad (>60µm, pF:0-1.8), Mesoporosidad (60-10 µm, pF:1.8-2.54), Microporosidad (<10µm, pF:2.54-7.0), compuesta por: capacidad de almacenamiento de agua (AWC, pF:2.54-4.2) y punto de marchitez permanente (PWP. pF:4.2-7.0) después de 3 años de manejo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos en la porosidad total, de acuerdo al test LSD ($p<0.05$). ***Figure 4.5.*** *Macroporosity (>60µm, pF:0-1.8), Mesoporosity (60-10 µm, pF:1.8-2.54), Microporosity (<10µm, pF:2.54-7.0), composed by: avalailable water capacity (AWC, pF:2.54-4.2) and Permanent wilting point (PWP. pF:4.2-7.0) after 3 years of management. Different letters mean significant differences between treatments in total porosity, according to LSD test ($p<0.05$).* 116

Figura 4.6. Curvas de retención de agua para cada tratamiento (n=5) después de 3 años de manejo. θ: contenido volumétrico de agua. ***Figure 4.6.*** *Water retention curve for each treatment (n=5) after 3 years of management. ϑ: Volumetric water content.* 117

Figura 4.7. Curvas de infiltración después de tres años de manejo (n=4) para los cuatro tratamientos. ***Figure 4.7.*** *Infiltration curves after three years of management (n=4) for the four treatments.* 117

Figura 4.8. Resistencia a la penetración desde 2.5 a 45 cm de profundidad para los distintos tratamientos después de 3 años de manejo. ***Figure 4.8.*** *Penetration resistance from 2.5 to 45 cm depth for the different treatments after 3 years of management* 119

Figura 5.1. Lluvia mensual (p) y evapotranspiración de referencia (ET_0) para los tres años de ensayo. ***Figure 5.1.*** *Monthly rainfall (P) and reference evapotranspiration (ET_0) for the 3 years of the trial*..... 137

Figura 5.2. Humedad del suelo diaria ($m^3\ m^{-3}$) a 30 cm de profundidad en 2011, 2012 y 2013 para los cuatro tratamientos. DOY: Día del año. ***Figure 5.2.*** *Daily*

soil moisture (m^3 m^{-3}) at 30 cm depth in 2011, 2012 and 2013 for the four treatments. DOY: Day of the Year. 138

Figura 5.3. Producción media de aceituna (a) y de aceite (b) y SD para los tres años. Los datos son media de 10 réplicas. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (p<0.05) entre años. ***Figure 5.3.*** *Fruit yield (a) and Oil yield (b) mean and SD for the three years. Data are means of 10 replicates. Different letters mean statistically significant differences (p<0.05) among years*. 139

Figura 5.4. Media y desviación estándar de acidez libre (a), fenoles totales (b), relación clorofila a carotenos (c), color a* (d) y b* (e); e índice de madurez (MI) como puntos, de los distintos tratamientos y años. ***Figure 5.4.*** *Free acidity (a), total phenols (b), chlorophyll to carotenoid ratio (c), color a* (d) and b* (e) mean and standard deviation and maturity index (MI) as dots, of different treatments and years.*.....144

Figura 5.5. Media y desviación estándar de los ácidos palmitoleico (a) y esteárico (b), relación oleico a linoleico (b) y MUFA a PUFA (d); e índice de madurez (MI) como puntos de los distintos tratamientos y años. ***Figure 5.5.*** *Palmitoleic (a) and Stearic (b) Acids, Oleic to Linoleic (c) and MUFA to PUFA (d) ratio mean and standard deviation and maturity index (MI) as dots of different treatments and years.*.....148

Figura 5.6. Media y desviación estándar de frutado (a), amargo (b) y picante (c) e índice de madurez (MI) como puntos, de los distintos tratamientos y años. ***Figure 5.6.*** *Fruity (a), bitterness (b) and pungency (c) mean and standard deviation and maturity index (MI) as dots, of different treatments and years.*.....150

Figura 5.7. Funciones canónicas discriminantes de los VOOs de los distintos tratamientos en los años 2012 (a) y 2013 (b). La cantidad de variabilidad explicada por cada función aparece entre paréntesis. ***Figure 5.7.*** *Canonical discriminant functions of the VOOs from different treatments in 2012 (a) and 2013 (b) years. Amount of variability explained by each function in brackets.* 151

Capítulo 1

Introducción general

Antecedentes y situación actual

La erosión hídrica

El concepto de erosión cambia según el enfoque desde el que se realice (García-Ruiz *et al.* 2017). Una definición generalizada de erosión es el balance neto a largo plazo de todos los procesos que desprenden material y lo mueven de su localización original (Lupia-Palmieri 2004), y cuando esto sucede debido a la acción del agua se le denomina erosión hídrica. La pérdida de suelo por erosión hídrica es uno de los mayores problemas ambientales a escala global (Karamesouti *et al.* 2015, Ligonja & Shrestha 2015, Novara *et al.* 2016, Ochoa *et al.* 2016, García-Ruiz *et al.* 2017), siendo el proceso de degradación del suelo más extendido mundialmente (Pimentel 2006, Lal 2014) como puede apreciarse en la Figura 1.1.

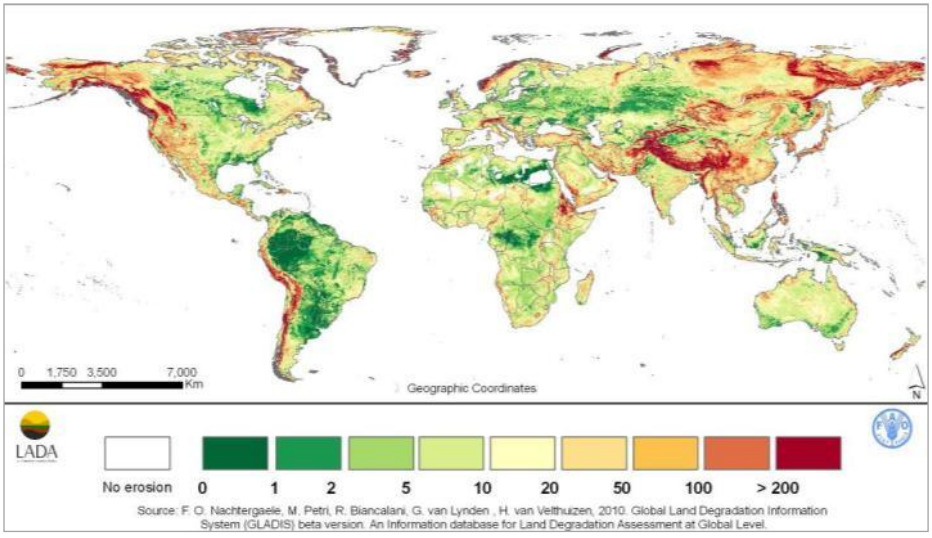


Figura 1.1. *Mapa de la vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica.* Fuente: Nachtergaele *et al.* (2011).

Se estima que la pérdida de suelo mundial por erosión hídrica se encuentra entre las 20 y 30 Gt año^{-1}, siendo la erosión debida al laboreo cercana a las 5 Gt año^{-1} (FAO and ITPS, 2015). Ligados a los sedimentos movilizados por la erosión hídrica se pierden nutrientes esenciales para las plantas, además de materia orgánica, y se reduce el espesor del suelo disponible para las raíces. Todos estos factores limitan el desarrollo de las plantas dejando el suelo

descubierto y vulnerable a los procesos de erosión hídrica (Pimentel 2006, Martinez-Mena *et al.* 2012), retroalimentando los procesos erosivos.

Más allá del problema ambiental de la erosión, la pérdida de suelo en terrenos agrícolas es una amenaza para la producción mundial de alimentos (Pimentel & Burgess 2013, García-Ruiz *et al.* 2017), así como para la fijación y mantenimiento del carbono en el suelo (Schmidt *et al.* 2011), con las negativas consecuencias de su liberación para el cambio climático global. Es por todo ello que el problema de la erosión hídrica presenta dimensiones ambientales, económicas y sociales (Martínez-Casasnovas & Ramos 2006, Pimentel 2006, Telles *et al.* 2011, García-Ruiz *et al.* 2017).

Más del 25% de la superficie de la Unión Europea sufre altas tasas de erosión hídrica (EEA 2015), con una pérdida media de suelo en tierras agrícolas, forestales y áreas seminaturales de 2,46 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ (Panagos *et al.* 2015b). En la figura 2 puede verse como los países europeos de la cuenca mediterránea son especialmente susceptibles a la erosión hídrica, con altas tasas de pérdida de suelo (4,61 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ de media), debido a una menor cobertura vegetal y mayor erosividad de las lluvias en estas áreas (Panagos *et al.* 2015b).

En la región mediterránea, la interacción entre clima, topografía, características del suelo y actividades humanas puede conducir a corto y medio plazo a la insostenibilidad de muchos paisajes (García-Ruiz *et al.* 2013). Las prácticas agrícolas inapropiadas son una de las principales fuerzas de degradación del suelo en Europa, ocasionando tanto pérdida de suelo por erosión como reducción del contenido en materia orgánica (Jones & Montanarella 2003, Gucci *et al.* 2012). En la cuenca mediterránea numerosos países tienen un alto porcentaje de superficie agrícola respecto a su superficie total (España 57%, Grecia 55%, Turquía52%, Italia 50%, FAOSTAT 2015). En todos estos países se produce un desequilibrio entre las tasas de erosión debido a las prácticas de la agricultura convencional (estimada entre 10 y 20 Mg ha^{-1} $año^{-1}$) y la tasa media de formación del suelo, estimada en 0,15 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ (FAO and ITPS, 2015). Estas altas tasas de pérdida de suelo de la agricultura convencional no son en absoluto sostenibles (Verheijen *et al.* 2009).

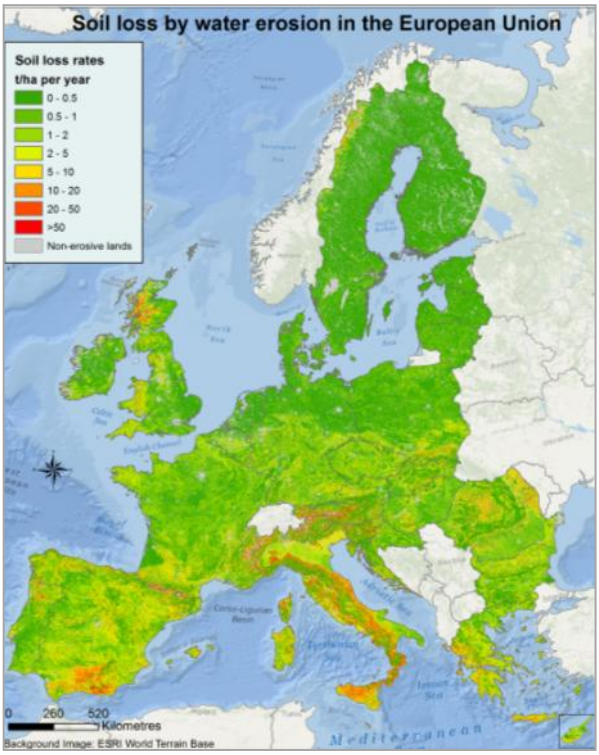


Figura 1.2. Pérdida de suelo por erosión hídrica en la Unión Europea. Fuente: European Soil Data Centre (ESDAC) (2015).

La reconciliación de la agricultura con la conservación del suelo es compleja, sobre todo en ambientes mediterráneos (García-Ruiz *et al.* 2013), cuando se emplean prácticas agrarias convencionales que generan las mencionadas tasas insostenibles de pérdida de suelo (Cerdà *et al.* 2009, Taguas *et al.* 2015b, Zema *et al.* 2016). Los cultivos leñosos, como el viñedo, olivar, almendro, melocotonero, etc., frecuentemente sufren importantes procesos de erosión debido al intenso laboreo y al uso de herbicidas que eliminan la cobertura vegetal protectora del suelo (Cerdà *et al.* 2016, Keesstra *et al.* 2016, Prosdocimi *et al.* 2016b, Rodrigo Comino *et al.* 2016). Esta situación empeora en suelos pobres, con bajo contenido en materia orgánica y estructura débil (Panagos *et al.* 2014), siendo precisamente este tipo de suelos erosionables frecuentes en los olivares españoles (Taguas & Gómez 2015).

En la Unión Europea el viñedo y el olivar producen las tasas más altas de pérdida de suelo (9,47 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ de media para ambos cultivos) debido a su habitual localización en laderas en pendiente y en zonas con alta

erosividad de la lluvia (Panagos *et al.* 2015b). En estas frágiles áreas, la escasez y variabilidad de los recursos hídricos, sumadas a la susceptibilidad a la desertificación, comprometen la productividad del suelo (Taguas *et al.* 2015a) y hacen del cultivo del olivo una actividad con potencial de degradación del suelo en la mayor parte de España (García-Ruiz 2010, Fernandez-Romero *et al.* 2016a). Una de las prácticas culturales tradicionales en los olivares mediterráneos es la eliminación de la vegetación arvense con varios pases de labor anuales (Xiloyannis *et al.* 2008), lo que deja un alto porcentaje de suelo desnudo gran parte del año expuesto a la erosividad de la lluvia. La amenaza más visible del laboreo es la pérdida de suelo por erosión (Fleskens & Stroosnijder 2007, Gómez *et al.* 2009b), pero además esta práctica tradicional reduce el contenido de materia orgánica debido a un incremento de la tasa de mineralización (García-Ruiz 2010, García-Díaz *et al.* 2016), reduce la capacidad de infiltración como consecuencia de un deterioro de la estructura del suelo (Palese *et al.* 2014) y destruye las raíces en la capa arable (Gómez *et al.* 1999) lo que limita la capacidad del árbol de tomar agua.

Las pérdidas de suelo por erosión hídrica pueden medirse de diferentes modos. Boardman (2006) y García-Ruiz & López Bermúdez (2009) hacen una revisión de los principales métodos con sus alcances y limitaciones. Una síntesis de dichos métodos se puede encontrar en Porta *et al.* (1999) para procesos de erosión laminar y por regueros:

- medidas experimentales: con estaciones de aforo o parcelas de erosión. Las parcelas de erosión que se emplean tienen tamaños muy diferentes (Moreno-de las Heras *et al.* 2010, Nadal-Romero *et al.* 2015) y sirven para comparar tratamientos o manejos pero adolecen de ciertas limitaciones como el escalado de las medidas, debido a que proceden de un pequeño espacio delimitado en el que no se dan todos los procesos de erosión, y al corto periodo de tiempo de seguimiento,
- medidas con simulador de lluvia: también para comparar manejos y tratamientos (Meyer 1994, Sharpley 2001), incluso en laboratorio, cuyos resultados pueden ser difícil de transferir a parcelas reales e incluso difíciles de interpretar,

- modelos de predicción de la erosión potencial: como la USLE y RUSLE (Wischmeier & Smith 1978, Renard *et al.* 1997, Kinnell 2010), SWAT (Gessesse *et al.* 2015, Napoli & Orlandini 2015), WEPP (Soto & Díaz-Fierros 1998, Tiwari *et al.* 2000, Nearing 2006), EUROSEM (Morgan *et al.* 1998) o SERT (López-Vicente *et al.* 2013) que requieren de gran cantidad de datos de campo para la calibración y validación. Dentro de los modelos de predicción, una herramienta útil para estimar la pérdida de suelo por erosión a escala de ladera o de cuenca es la tecnología basada en el uso de radionucleidos: cesio-137 (^{137}Cs), plomo en exceso-210 (^{210}Pbex) y berilio-7 (^{7}Be) (Walling *et al.* 2011, Dercon *et al.* 2012).

En esta Tesis Doctoral se han utilizado dos métodos para la estimación de la pérdida de suelo: (1) las microparcelas para comparar tratamientos, y (2) el ^{137}Cs a escala de microcuenca. La medida experimental de la microparcela (≤1 m^2) es una técnica que ofrece información relevante de los efectos que distintos manejos del suelo pueden producir sobre la erosión y las propiedades de los sedimentos, como la textura, materia orgánica y nutrientes arrastrados (Barthes *et al.* 2000, Bagarello & Ferro 2004, Boix-Fayos *et al.* 2006, Boix-Fayos *et al.* 2007). Las microparcelas tienen la limitación de no recoger todos los procesos erosivos que se dan a escala de ladera o cuenca, principalmente la erosión en regueros o cárcavas, por lo que se da una infraestimación de la pérdida de suelo (Boix-Fayos *et al.* 2006) o una sobreestimación según García-Ruiz *et al.* (2017) que establecen que las tasas de erosión se reducen según se incrementa el área de experimentación. También hay una importante limitación temporal. García-Ruiz *et al.* (2017) estiman que este tipo de estudios deberían durar al menos 20 años y no los 3-7 años que suelen durar, ya que con ello se verían menos influenciados por los eventos extremos que pudieran acontecer.

Las técnicas basadas en radionucleidos solventan en parte los problemas anteriores, con representación a escala de ladera o superior, abarcando periodos medios de tiempo (Zapata 2003). El ^{137}Cs es con diferencia el radionucleido más utilizado en investigación de erosión y sedimentación debido a su alta afinidad por las partículas finas que componen el complejo de cambio (arcilla y materia orgánica), una vida media relativamente larga (30,2 años) y una medición relativamente sencilla, así como tener un patrón

temporal bien definido de su deposición (Ritchie & McHenry 1990, Walling & Quine 1992). El ^{137}Cs es un elemento no natural que tiene su origen en las pruebas con armamento nuclear realizadas en las décadas de los 50s y 60s, lo que le hace un indicador único para la estimación de la erosión y sedimentación (Zapata 2003), siendo utilizado en muchas partes del mundo para estimar la redistribución de suelo ligada tanto a los procesos de erosión laminar y splash como a los procesos de erosión en regueros y cárcavas (Schoorl *et al.* 2004, Fang *et al.* 2012, Porto *et al.* 2016, Quijano *et al.* 2016, Rabesiranana *et al.* 2016).

Las primeras cantidades detectables de ^{137}Cs se depositaron en 1954, con un máximo en 1963 (Zhang *et al.* 1990), siendo este último año el que se toma como referencia para datar el método. La última deposición de ^{137}Cs en Europa sucedió en 1986, debido al accidente de la planta nuclear de Chernobyl (UNSCEAR 2012). El ^{137}Cs que cayó desde la atmósfera, se adsorbió a los componentes del complejo de cambio del suelo principalmente a la materia orgánica y a las partículas de arcilla (Navas *et al.* 2011). De este modo, el radionucleido es transportado por el agua, lo cual depende del tipo de manejo de suelo, de la intensidad con que actúan los procesos erosivos y de los procesos de transporte de sedimentos, siendo cuantificado en laboratorio por espectrometría gamma y comparado con los valores de referencia para obtener las tasas de redistribución del suelo. El método tiene las siguientes ventajas: 1) las estimas derivadas de las tasas de redistribución del suelo lo son a medio plazo; de este modo, los datos medios están menos influenciados por los eventos extremos; 2) las tasas de redistribución del suelo representan el efecto integrado de todos los procesos del paisaje que influyen en el movimiento de las partículas de suelo bajo determinados manejos o prácticas del territorio; 3) proporciona información respecto a la erosión o deposición en la misma cuenca, ofreciendo estimaciones de las tasas netas de exportación de sedimentos; y 4) la interpretación de los datos permite la cuantificación de procesos tales como redistribución del suelo por laboreo y la pérdida o ganancia asociada a la erosión del suelo.

El cultivo tradicional del olivo

El cultivo del olivo (*Olea europea* L.) tiene su origen en la cuenca mediterránea hace unos 7000 años (Breton *et al.* 2009), y es en esta zona donde se extiende la mayor superficie de olivar (Fig. 1.3) con 10,08 millones de hectáreas de un total mundial de 10,27 (FAOSTAT 2015). La lluvia y los recursos hídricos subterráneos disponibles para el olivo son los únicos aportes de la mayor parte de los olivares de la cuenca mediterránea (Palese *et al.* 2010), por lo que tradicionalmente se han empleado marcos de plantación amplios (<100 árboles ha^{-1}), tanto más cuanto más escasas fueran las precipitaciones. Además, en los olivares de secano se realiza: (1) un control del volumen de copa reduciéndolo más en zonas con escasas lluvias (Connor 2005), y (2) un laboreo frecuente para evitar la competencia de la vegetación arvense por el agua y los nutrientes (Gómez *et al.* 2009a, Palese *et al.* 2015) y así incrementar la producción de aceitunas. Estos laboreos frecuentes resultan en amplias superficies de suelo desnudo, propenso a los procesos de erosión.

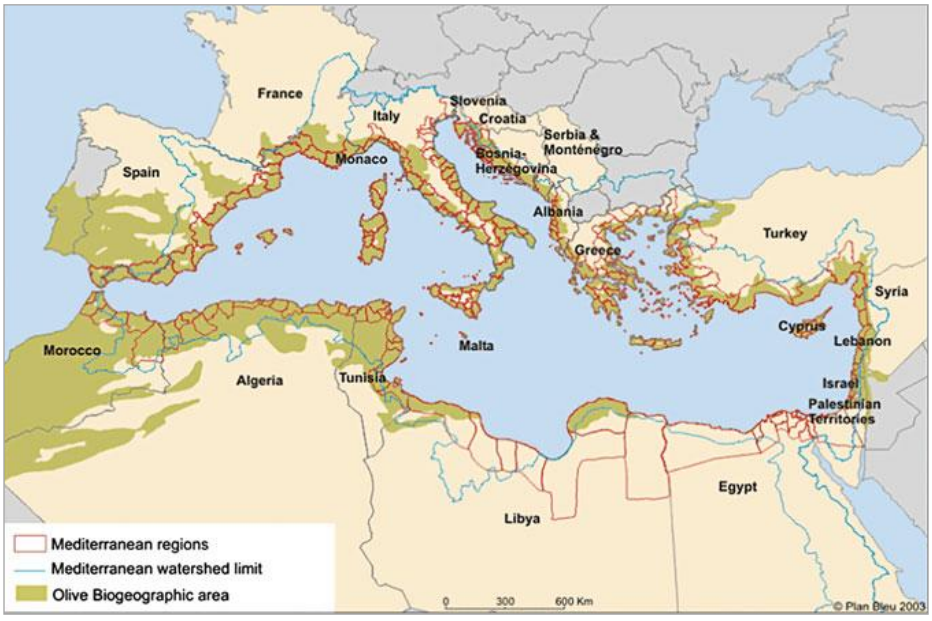


Figura 1.3. *Zona biogeográfica del olivar en la cuenca Mediterránea.* Fuente: Gaussen & De Philippis (1955).

España es el país con mayor superficie de olivar de todo el mundo, con un total de 2,5 millones de hectáreas (FAOSTAT 2015) localizadas principalmente en Andalucía. En la actualidad, alrededor del 50% de esa

superficie es labrada (MAGRAMA, 2015). La Comunidad de Madrid tiene una superficie de olivar cercana a las 28.000 ha (MAGRAMA, 2013). Aunque esta superficie no es muy importante respecto a la superficie total de olivar en todo el país, sí que es importante en la región. El olivar supone un 20% de la superficie total agrícola de la Comunidad de Madrid, siendo el segundo cultivo en extensión detrás de los cereales de invierno (IECM, 2015). Como otros olivares tradicionales españoles, el olivar de Madrid se ha situado en zonas en pendiente, sobre suelos pobres y delgados (Gómez *et al.* 2009b). El 98% de los olivares de la región se cultivan en secano, estando un 50% plantados en baja densidad (menos de 100 olivos ha^{-1}) y un 80% manejados con laboreo para reducir la competencia de la vegetación arvense por el agua (MAGRAMA 2015).

En zonas semiáridas la disponibilidad de agua es uno de los principales factores limitantes en la producción de los cultivos. El olivo es una de las especies arbóreas del mundo más resistentes a la sequía (Connor & Fereres 2005), siendo capaz de tolerar una baja disponibilidad de agua en el suelo gracias a distintas adaptaciones morfológicas y fisiológicas (Connor 2005, Tataranni *et al.* 2015). Pero que el árbol resista la falta de agua no implica que la producción no se vea resentida, por lo que la producción de aceituna se incrementa considerablemente cuando se le aportan cantidades suficientes de agua (del Rio & Vallejo 2012). Con el objeto de no sufrir mermas en la cosecha de aceituna hay que tener en consideración que en el ciclo anual del olivo hay tres periodos de mayor sensibilidad a la falta de agua según Fernández (2014): 1) floración; 2) crecimiento del fruto, de 6 a 10 semanas después de la floración; y 3) fase de acumulación de aceite, de 18 a 22 semanas después de la floración. El estrés hídrico en el primer periodo reduce el número total de frutos, mientras que en los otros dos periodos reduce el peso fresco de la aceituna, con una pérdida al final de producción de aceite (Connor 2005). Por otro lado, debe tenerse también en cuenta que se han descrito relaciones positivas entre el estrés hídrico en el olivo y un aumento del contenido en compuestos fenólicos (Patumi *et al.* 2002, Gómez-Rico *et al.* 2009), del perfil de compuestos volátiles (Servili *et al.* 2007, Gómez-Rico *et al.* 2009), incremento del nivel de ácidos grasos monoinsaturados y mejora de las características sensoriales (Berenguer *et al.*

2006), aspectos todos ellos de calidad en los Aceite de Oliva Virgen (VOO, Virgin Olive Oil en sus siglas en inglés).

La variedad de olivo existente en las parcelas de estudio en la presente Tesis Doctoral es la Cornicabra, la más común en el centro de España y la segunda en extensión de toda la Península Ibérica (Rallo *et al.* 2005) con una superficie total de 270.000 ha (Barranco *et al.* 2005). Aunque esta variedad está considerada como una de las más tolerantes a la sequía de todas las variedades de España (Barranco *et al.* 2005), la falta de agua reduce la cantidad de aceitunas y de aceite (Gómez-Rico *et al.* 2007, del Rio & Vallejo 2012). El aceite de Cornicabra es valorado por su alta estabilidad y sus características sensoriales (Salvador *et al.* 2001b), con un picor y amargor medios debido a los abundantes polifenoles (Uceda *et al.* 2008), alto contenido en ácido oleico y bajo en ácido linoleico (Salvador *et al.* 2001a). Los compuestos fenólicos, el ácido oleico y los demás ácidos grasos monoinsaturados (MUFA, Monounsaturated Fatty Accids en sus siglas en inglés) del VOO tienen efectos beneficiosos en la salud humana (López-Miranda *et al.* 2010), por lo que son deseable aceites con un mayor contenido en polifenoles y una alta relación de ácidos grasos monoinsaturados respecto a poliinsaturados (PUFA, Polyunsaturated Fatty Acids en sus siglas en inglés).

Las cubiertas vegetales

Dentro del "Inventario de tecnologías disponibles en España para la lucha contra la desertificación" (MAPAMA 2017) se incluyen las cubiertas vegetales vivas como una herramienta para controlar la escorrentía en el sector agrario. Taguas & Gómez (2015) han encontrado que a pesar del uso de distintas técnicas de manejo del suelo en olivares andaluces y de las obligaciones agro-ambientales de la Política Agraria Común (CAP), se siguen produciendo tasas de pérdida de suelo insostenibles. Estos autores concluyen que es necesaria la aplicación de otras técnicas de conservación del suelo en los requerimientos de la CAP, por lo que el uso eficiente de las cubiertas vegetales (CC), debe ser estudiado en detalle. Las CC son una de las técnicas más eficientes de manejo sostenible del territorio (SLM, Sustainable Land Management) para controlar la erosión y regenerar suelos degradados (Durán-Zuazo & Rodríguez-Pleguezuelo 2008, Marqués *et al.* 2016). Desde la

década de los 90, diferentes estudios en olivar han demostrado la eficiencia de las CC en comparación con el laboreo tradicional (CT) en la reducción de la pérdida de suelo por erosión y la mejora del almacenamiento de agua y de las propiedades físico-químicas del suelo.

Las CC reducen la escorrentía y la erosión del suelo (Fleskens 2007, Kairis *et al.* 2013) por la interceptación de las gotas de lluvia. Francia Martinez *et al.* (2006) midieron pérdidas de suelo entre 1,0 y 10,4 t ha^{-1} $año^{-1}$ en CT y entre 1,7 y 2,4 t ha^{-1} $año^{-1}$ en CC con cebada en un suelo franco. Gómez *et al.* (2009b) obtuvieron resultados similares (0,8 t ha^{-1} $año^{-1}$) en un suelo muy arcilloso empleando cebada como CC respecto al CT (2,9 t ha^{-1} $año^{-1}$). En otro trabajo del mismo grupo (Gómez *et al.* 2011), empleando CC de gramíneas espontáneas en un olivar sobre suelo franco-arcilloso y en otro olivar sobre suelo arenoso se observaron pérdidas de suelo de 0,04 y 0,4 t ha^{-1} $año^{-1}$ respectivamente, mientras que con CT las pérdidas fueron de 1,3 y 19,4 t ha^{-1} $año^{-1}$. Márquez-García *et al.* (2013) estiman la reducción de pérdida de suelo de una CC de gramíneas respecto al LT en de un 80%, con una mejora de la función del suelo como sumidero de carbono por parte de las gramíneas. Durán-Zuazo & Rodríguez-Pleguezuelo (2008) han medido pérdidas de suelo de 2,10 t ha^{-1} $año^{-1}$ al utilizar cebada como CC y 5,70 t ha^{-1} $año^{-1}$ con CT.

En Italia, Palese *et al.* (2014) observaron una mejora en la estructura del suelo con vegetación espontánea como CC, la cual incrementa la capacidad de almacenamiento de agua del suelo respecto al CT permitiendo un mejor aprovechamiento del agua de las lluvias de otoño-invierno. Márquez-García *et al.* (2013) han medido un incremento del contenido del carbono orgánico de 12,3 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ del suelo debido a las CC frente al CT.

En los últimos años, la superficie de olivar con cubiertas vegetales se ha ido incrementando, prevaleciendo el uso de la vegetación espontánea (González-Sánchez *et al.* 2015). En España, la zona donde más se utilizan las cubiertas vegetales en olivar es Andalucía, siendo generalmente aceptadas por los agricultores (Franco & Calatrava-Leyva 2006, Calatrava-Leyva *et al.* 2007). Sin embargo, en la zona centro de España su uso es escaso a pesar de estudios previos que han determinado la necesidad de emplear prácticas alternativas de manejo –como son las cubiertas vegetales– para otros cultivos leñosos como el viñedo, con el objeto de reducir las pérdidas de

suelo por erosión (Ruiz-Colmenero *et al.* 2013). Su eficiencia depende de las condiciones climáticas, edáficas y prácticas agrícolas concretas de la zona (Francia Martínez *et al.* 2006, Ruiz-Colmenero *et al.* 2013), aunque debe apuntarse que su uso es controvertido en ambientes áridos debido a la escasez de disponibilidad de agua (Gómez *et al.* 2009a, Alcántara *et al.* 2011), habiéndose registrado mermas de producción en viñedos de la Comunidad de Madrid debido al empleo de cubiertas vegetales que redujeron el agua disponible para el cultivo (Ruiz-Colmenero *et al.* 2011).

Como se ha indicado, las cubiertas vegetales han probado su eficiencia reduciendo la erosión del suelo, mejorando el almacenamiento de agua y las propiedades físicas del suelo (Palese *et al.* 2014) pero su posible efecto sobre la producción de aceituna es materia de discusión. Un efecto negativo de las cubiertas vegetales sobre la producción de oliva fue descrito por Gucci *et al.* (2012) en un olivar superintensivo y por Caruso *et al.* (2011) en un olivar joven en marco intensivo. Sin embargo, otros autores (Gómez *et al.* 1999, Corleto & Cazzato 2008, Ferraj *et al.* 2011, Palese *et al.* 2014) no han hallado una reducción significativa de la producción de aceitunas en olivares maduros con cubiertas vegetales.

La influencia de las cubiertas vegetales en la calidad de los alimentos producidos ha sido estudiada en viñedos (Lopes *et al.* 2008, Perez-Alvarez *et al.* 2015, Jordan *et al.* 2016, Karl *et al.* 2016), manzanos (Kuhn & Pedersen 2009), berenjenas (Radicetti *et al.* 2016), cerezos (Usenik *et al.* 2009)) y cítricos (Abdel-Aziz *et al.* 2008). En olivar, la influencia del manejo del suelo sobre algunos parámetros de calidad del aceite ha sido escasamente estudiada (Corleto & Cazzato 2008, Huqi *et al.* 2009, Gucci *et al.* 2012, Caruso *et al.* 2014) y según la información de que disponemos, no existen estudios previos sobre el efecto de las cubiertas vegetales en las características del VOO.

Los suelos de la zona de estudio de esta Tesis Doctoral están desarrollados sobre material yesífero en un clima semiárido, dentro de la categoría de zonas secas de la UN-CCD (Arnold 1992). Los suelos yesíferos están formados bajo condiciones áridas o semiáridas, cubriendo unos 100 millones de ha en el mundo (Verheye & Boyadgiev 1997). Este tipo de suelos se encuentra en la Región Mediterránea (Zdruli *et al.* 2010), principalmente en España (Virto *et*

al. 2015), el norte de África y el este de Asia (Zdruli 2014). Así, los olivares sobre suelos yesíferos no son raros en ambientes mediterráneos. A pesar de este hecho, la mayor parte de la bibliografía sobre cubiertas vegetales en olivar se ha centrado sobre suelos calizos, por ejemplo Gómez *et al.* (2009a), Espejo-Pérez *et al.* (2013) y Márquez-García *et al.* (2013) en España, Kairis *et al.* (2013) en Grecia y Palese *et al.* (2015) en Italia. Las conclusiones de estos estudios sobre suelos calizos no pueden ser aplicadas a los suelos yesíferos, debido a las muy distintas propiedades de ambos tipos de suelo, por lo que es de interés generar conocimiento sobre el comportamiento de las CC en olivares de la zona mediterránea implantados en suelos yesíferos. Estos suelos se caracterizan por tener una limitada capacidad de retención de agua, falta de plasticidad y cohesión, degradación estructural, capas endurecidas, desequilibrio en las relaciones de iones, bajo contenido en materia orgánica y media capacidad de intercambio catiónico (Van Alphen & Ríos Romero, 1971; Verheye & Boyadgiev, 1997).

Debido a las graves consecuencias del laboreo tradicional en suelos yesíferos en zonas con escasas precipitaciones y a la falta de información previa, existe por tanto la necesidad de una investigación específica para este tipo de suelos y clima, que muestre los efectos ambientales y sobre el cultivo de las CC frente al CT, para poder realizar la transferencia de los resultados a los agricultores de olivar en secano de zonas semiáridas como herramientas de SLM.

Área de estudio

Localización

Los ensayos que se han realizado en el marco de la presente Tesis Doctoral se han llevado a cabo en el Centro de Olivicultura de la Comunidad de Madrid en la finca experimental "La Chimenea", dependiente del IMIDRA. Este Centro se encuentra situado al sur de la región madrileña (UTM 30N, ETRS89: X= 455654, Y= 4435959, Fig. 1.4b) en la Comarca Agraria de Las Vegas, entre los municipios de Aranjuez y Colmenar de Oreja, a una altitud media de 540 masl localizado 2 km al norte del río Tajo, en su margen derecha. De las trece parcelas de experimentación con las que cuenta el Centro de Olivicultura, se ha trabajado sobre dos de ellas (Fig. 1.4c): en la parcela 10 se ha llevado a cabo la experimentación relacionada con las cubiertas vegetales, mientras que parte de la parcela 11 se ha empleado para la evaluación de la pérdida de suelo a medio plazo a escala de microcuenca.

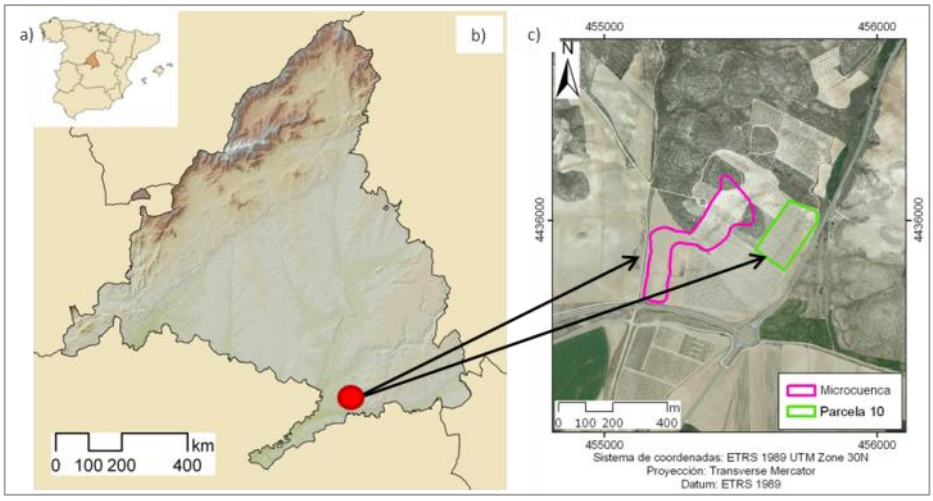


Figura 1.4. *Mapas de localización de la zona de estudio, a) Comunidad de Madrid en España; b) mapa fisiográfico de la Comunidad de Madrid: el punto rojo marca la zona de estudio; c) ortofoto de 2014 de la microcuenca y la parcela10.*

Climatología

La finca de "La Chimenea" cuenta con una estación meteorológica automática en continuo a intervalos de 10 minutos, con registros desde 1995 hasta la actualidad. Para la caracterización del clima de la zona se han tomado además los datos de la estación meteorológica más próxima perteneciente a la AEMET, situada también en la misma finca "La Chimenea" a 2 km de la zona de estudio, con el fin de disponer de una serie más larga de datos.

El clima de la zona de estudio es mediterráneo continental con una temperatura media anual de 13.6ºC. Los inviernos son fríos (el mes más frío es enero con una temperatura media de las mínimas de -7ºC), con frecuentes heladas que pueden producirse desde octubre a mayo. Las nevadas son muy poco habituales debido a su baja cota. Durante los meses de julio y agosto las temperaturas superan frecuentemente los 35ºC.

Las lluvias en la zona son escasas, siendo la precipitación media anual para una serie de 35 años de 395 mm, con una gran variabilidad interanual (de 237 a 452 mm año^{-1}). Estos valores de precipitación indican que la zona de estudio se corresponde con una región semiárida (Verheye 2006) por estar entre los 200 y 500 mm anuales. En los últimos años se ha detectado un cambio en el patrón de precipitación, con lluvias más escasas y a la vez más intensas (García-Díaz *et al.* 2015) incrementando su erosividad. Se ha elaborado un diagrama ombrotérmico con los datos más recientes de temperatura y precipitación (Fig. 1.5). Las temperaturas medias mensuales más altas coinciden con los meses de menor precipitación, haciendo que haya un periodo de déficit hídrico de Junio a Septiembre, típico del clima mediterráneo. Las lluvias se concentran en primavera y otoño, con una media anual para el periodo 2002-2016 de 310 mm mm (datos de la estación meteorológica automática de la finca).

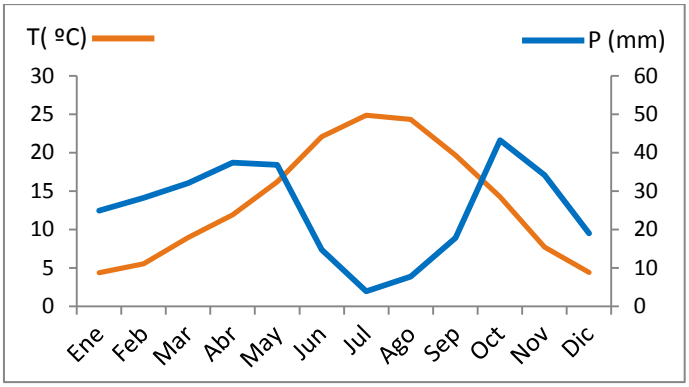


Figura 1.5. *Diagrama ombrotérmico (serie de datos 2002-2016). Elaboración propia con los datos estación meteorológica automática de la finca.*

La evapotranspiración de referencia (ET_0) media según el método Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998) es de 1.239 mm para el periodo 2002-2016. La ET_0 más alta se produce en los meses de junio y agosto, con un máximo en julio de 211 mm (Fig. 1.6).

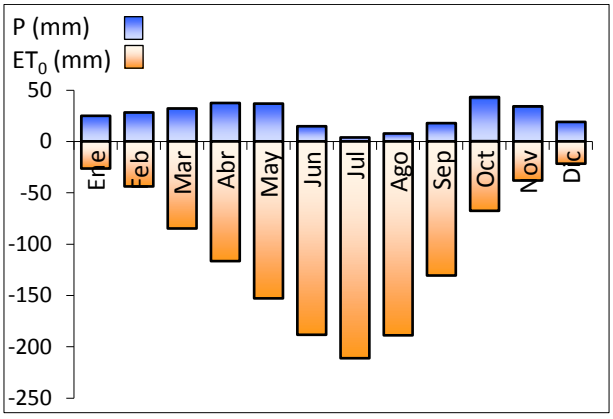


Figura 1.6. *Precipitación y Evapotranspiración de referencia (ET_0). Serie de datos 2002-2016). Elaboración propia con los datos de la estación meteorológica automática de la finca.*

Los años que abarca el proyecto (2010-2014) han sido muy similares en cuanto a temperaturas medias mensuales (Fig. 1.7a), mientras que las precipitaciones han sido altamente irregulares (Fig. 1.7b) como es usual en las condiciones de clima mediterráneo. El año más seco de la serie fue 2012 con 237 mm, mientras que 2010 fue el más húmedo, llegando a 452 mm.

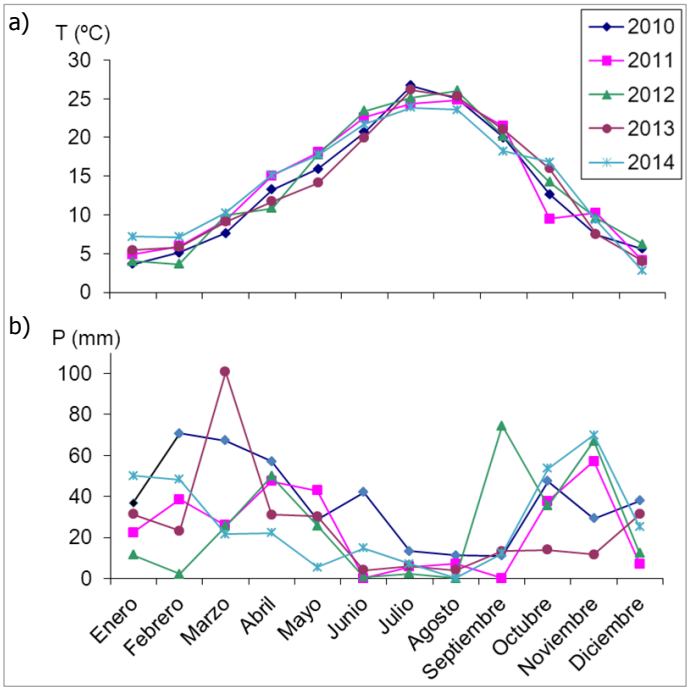


Figura 1.7. *Gráficos de temperatura (T, figura 1.7a) y precipitación (P, figura 1.7b) media mensual para los años de estudio (2010-2014). Elaboración propia con los datos estación meteorológica automática de la finca.*

Geología y litología

La zona de estudio se sitúa en la Cuenca Terciaria de Madrid (Fig. 1.8), donde el agua ha ido excavando el relieve, dando paso al afloramiento de materiales más antiguos procedentes del Mioceno y dejando en las cimas de los pequeños cerros restos de material fluvial como son las gravas. Los materiales del Mioceno sobre los que se encuentra corresponden a la parte central de las denominadas facies evaporíticas basales. Estos materiales comprenden una sucesión de yesos masivos grises y yesos especulares, con delgadas intercalaciones de margas yesíferas gris verdosas (IGME 1997). Se denomina serie gris al estrato inferior, que es el propiamente yesífero, siendo la formación sobre la que se asientan los ensayos de la presente Tesis Doctoral; y serie blanca para el estrato superior, carente de yeso cristalino. Los depósitos más recientes (limos, arcillas yesíferas y margosas) se

encuentran en el fondo de los valles de los afluentes secundarios del río Tajo (IGME 1975).

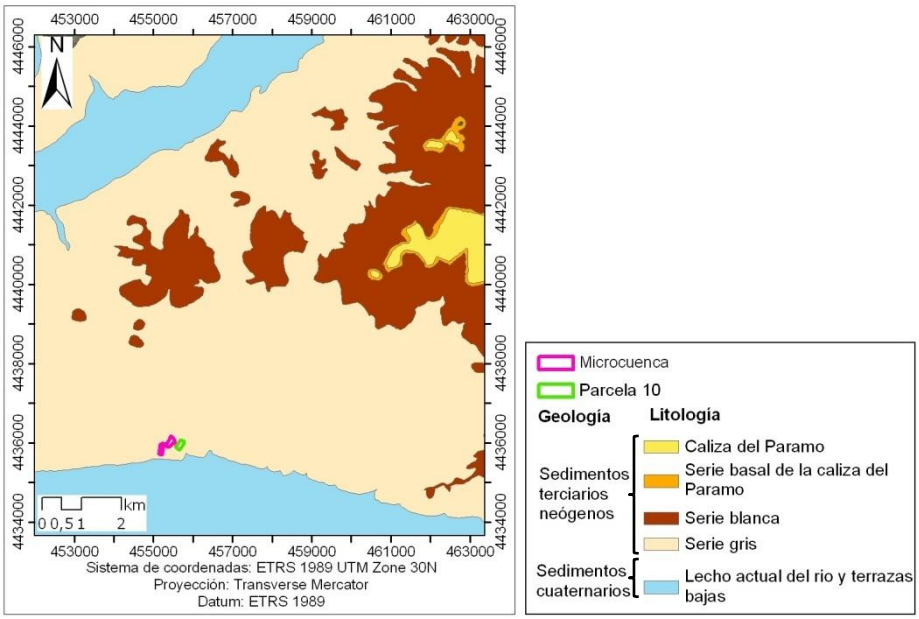


Figura 1.8. *Mapa geológico y litológico con la microcuenca y la parcela 10.*

Geomorfología

La morfología de la región se corresponde con un modelado fluvial. Al norte de la zona de estudio se encuentra una meseta elevada de la superficie del Páramo, donde se sitúan Chinchón y Colmenar de Oreja con una altitud entre 750 y 800 masl, y forma la divisoria entre el río Tajo y el Tajuña. Al sur se dispone el sistema de terrazas del río Tajo, cuya altitud se halla entre los 520 y 580 masl. Entre ambas zonas, los sedimentos del Mioceno han sido afectados por la erosión fluvio-torrencial, que ha dado lugar a un relieve de laderas suaves y cerros redondeados de escasa altitud, entre 525 y 600 masl (Silva *et al.* 1988). La parcela 10 se encuentra entre las cotas 546 y 528 masl y la microcuenca entre 559 y 524 masl (Fig. 1.9).

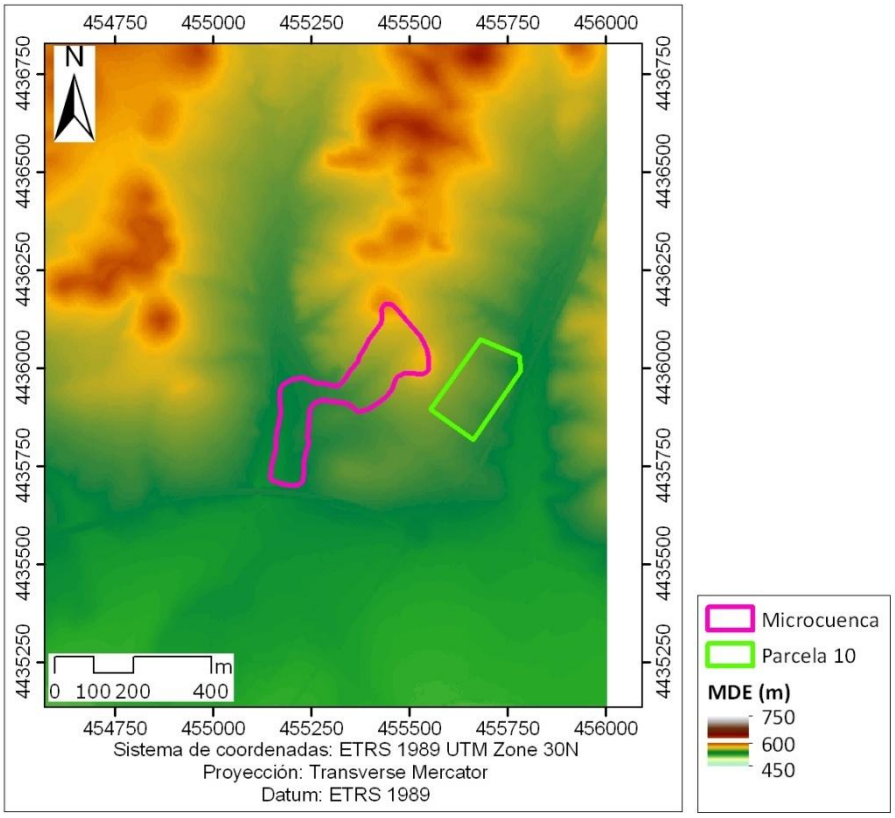


Figura 1.9. *Modelo digital de elevaciones con la microcuenca y la parcela 10. Elaboración propia a partir de las curvas de nivel a 5 m.*

Las parcelas de estudio se sitúan entre estas dos formaciones geomorfológicas, en laderas cuyas pendientes oscilan entre 9 y 17 % en la parcela 10 y entre 2 y 20 % en la microcuenca (Fig. 1.10). La pendiente es un factor que afecta a la erosividad del agua de escorrentía (Porta *et al.* 1999), siendo elevada en la zona, lo que hace que el suelo sea más vulnerable a la erosión hídrica y por tanto a la pérdida de suelo fértil.

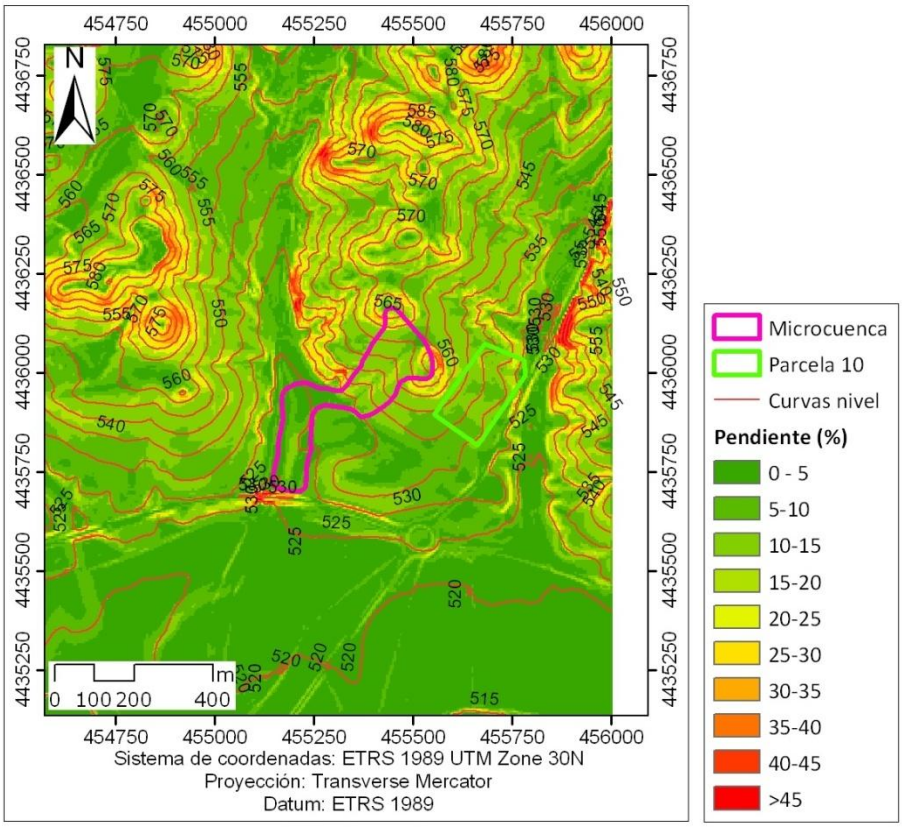


Figura 1.10. *Mapa de pendientes y curvas de nivel a 5 m con la microcuenca y la parcela 10. Elaboración propia a partir de las curvas de nivel a 5 m.*

Edafología

El suelo se clasifica como *Gypsic Haploxerept* (Soil Survey Staff 2014) o *Haplic Gypsisol* (arzic siltic) (IUSS Working Group WRB 2014) con un régimen de humedad del suelo *xérico*. Estos suelos están desarrollados sobre margas yesíferas con un alto contenido en sales y limo y bajo en materia orgánica y arcilla, además de una estructura edáfica débil del horizonte superficial y baja resistencia de los agregados al impacto de la gota de agua, lo que conduce a la formación de costras superficiales por *splash*. Estos suelos ocupan una amplia zona al sureste de la provincia de Madrid y norte de la provincia de Toledo, con una fisiografía de campiña caracterizada por un paisaje ondulado. Dichos suelos limosos presentan una baja capacidad de generar macroporos (Stengel *et al.* 1984).

La presencia de yesos está asociada a la composición del sustrato y a regímenes con bajas precipitaciones y elevada evaporación. De esta manera, el agua del suelo asciende, se evapora en su ascenso y precipitan en superficie las sales previamente disueltas. En los suelos con abundante yeso la resistencia a la penetración de las raíces es alta, con baja capacidad de retención de agua disponible para las plantas y al secarse se incrementa enormemente su compacidad (Porta *et al.* 1999). Esta dificultad de las plantas para absorber agua sería equivalente a que el clima fuera más árido de lo que indican los parámetros climáticos.

Para describir el suelo se procedió a la apertura de una calicata en el centro de la parcela 10 (Fig. 1.11) a comienzos de esta Tesis Doctoral.

Figura 1.11. *Fotografía de la calicata. La escasa profundidad de la calicata se debe al afloramiento del sustrato yesífero con abundantes fragmentos de gran tamaño de yeso cristalino.*

En la tabla 1.1 se incluye una ficha completa de la calicata, con la descripción morfológica de los horizontes principales del perfil del suelo. Se trata de un perfil permeable, sin apenas evolución donde los procesos formadores no han actuado con intensidad. Hay dos horizontes de diagnóstico, el ócrico en el Ap y el gípsico en el By.

Tabla 1.1. *Descripción morfológica del perfil del suelo.*

Características de la zona			
Provincia:		Madrid	
Localidad:		Colmenar de Oreja	
Coordenadas UTM (WGS 84):		HUSO 30 X: 455.628 m Y: 4.435.973 m	
Altitud:		540 m	
Pedregosidad:		2%	
Drenaje:		Bueno	
Pendiente:		10-12%	
Erosión:		Leve a moderada	
Fisiografía:		Loma	
Topografía circundante:		Ondulado	
Microtopografía:		Suavemente ondulada por laboreo	
Litología:		Margas yesíferas y yesos	
Vegetación natural:		Eliminada	
Uso del suelo:		Olivar intensivo	
Horizonte FAO	Profundidad (cm)	Descripción	
Ap_1	0-12	Color: h) 10YR 4/3 y s) 10YR 6/3,5. Elementos gruesos: pocos (5%). Raíces: Pocas muy finas. Estructura granular fina débil. Escasa actividad de fauna. No se observan películas, moteados o concreciones. Consistencia friable en húmedo. Límite inferior neto plano. Bajo contenido en materia orgánica bien humificada.	
Ap_2	12-26	Color: h) 10YR 4,5/3. Pocos elementos gruesos. Raíces muy pocas, finas y gruesas que se horizontalizan en el límite inferior. Estructura maciza. No se aprecia actividad de fauna, ni películas, ni moteados, ni concreciones. Consistencia firme en húmedo. Bajo contenido de materia orgánica bien humificada.	
By	26-43	Color: h) 5Y 6/2,5. Muy pocos elementos gruesos. Raíces inapreciables. Estructura masiva. No se aprecia actividad de fauna, ni películas, ni moteados. Nódulos calizos aislados (1%). Presencia de yeso secundario visible en al menos el 1% en volumen. Consistencia muy friable en húmedo. Muy bajo contenido de materia orgánica.	
Cy	43- >55	Color: h) 5Y 4/2,5. Elementos gruesos frecuentes a abundantes (15-20%) constituidos por cristales de yeso de gran tamaño. Raíces inapreciables. Estructura maciza. No se aprecia actividad de fauna, ni películas, ni moteados, ni concreciones, pero sí bloques de yeso de la roca madre. Consistencia muy friable a friable en húmedo. Inapreciable contenido de materia orgánica.	
Los horizontes de diagnóstico presentes son el ócrico y el gípsico, Clasificación: *Gypsic Haploxerept* (Soil Survey Staff 2014) *Haplic Gypsisol* (arzic siltic) (IUSS Working Group WRB 2014)			

Se han tomado muestras de cada uno de los horizontes de la calicata para proceder al análisis químico del suelo (Tabla 1.2) y del extracto de saturación (Tabla 1.3) en laboratorio. La conductividad eléctrica se ha medido por conductimetría, el pH por potenciometría, la materia orgánica oxidable con el método de digestión húmeda de Walkley & Black (1934), el fósforo disponible con el método de Olsen *et al.* (1954), los carbonatos por calcimetría (calcímetro de Bernard), la capacidad de intercambio catiónico mediante el empleo de una solución tamponada con pirofosfato-sodio, el calcio y magnesio intercambiables se han determinado mediante espectrometría de absorción atómica y el potasio y sodio intercambiables por espectrometría de emisión atómica (MAPA 1994). Los métodos empleados en el análisis del extracto de saturación para las determinaciones distintas del apartado anterior han sido: volumetría para los bicarbonatos y carbonatos, potenciometría para cloruros, espectrometría de masas con fuente de plasma ICP-MS para calcio, magnesio, sodio y potasio, y cromatografía iónica para los sulfatos.

Los resultados de los análisis del perfil (Tabla 1.2) muestran que el contenido de materia orgánica oxidable está entre medio y bajo. El pH es ligeramente básico en todas las muestras, lo que facilita la absorción de nutrientes tales como el nitrógeno, potasio, azufre, calcio y magnesio, pero dificulta algo la del fósforo. Por el contrario, micronutrientes tales como el hierro, el manganeso, el boro, el cobre y el zinc, pueden ver dificultada su asimilación, pudiendo presentarse carencias ligeras de escasa importancia en alguno de estos micronutrientes. Este suelo tiene un contenido muy alto en fósforo y potasio asimilables, por lo que en principio no requiere de fertilización con estos nutrientes. El horizonte Ap tiene una CEC normal, pero es baja en los horizontes subsuperficiales por lo que el cultivo tomará la mayoría de los nutrientes de los 26 cm superiores.

Se detecta un marcado desequilibrio catiónico en el complejo de cambio, con una relación Ca/Mg excesivamente alta que pone de manifiesto una acusada carencia de magnesio. La relación Ca/K es alta, muy superior a la deseable, lo que puede dar lugar a problemas como consecuencia del antagonismo calcio-potasio. En consecuencia, la asimilabilidad del potasio puede verse interferida por una impermeabilidad de la membrana celular provocada por un contenido alto de calcio. Por el contrario, la relación K/Mg es adecuada.

Tabla 1.2. *Análisis químico del perfil del suelo. Abreviaturas: CE: Conductividad eléctrica; MO: Materia orgánica; P_2O_5: Fósforo disponible (método Olsen); K_2O: potasio disponible; CO_3^{2-}: Carbonatos totales; CIC: Capacidad de intercambio catiónico.*

Horizonte FAO	Espesor (cm)	CE (dS m^{-1} a 25ºC 1:5 H_2O)	pH (1:5 H_2O)	pH (1:5 KCl)	MO (%)	P_2O_5 (mg kg^{-1})	K_2O (mg kg^{-1})	CO_3^{2-} (%)	CIC (cmol(+) Kg^{-1})	Bases de cambio (cmol(+) Kg^{-1})			
										Ca	Mg	Na	K
Ap_1	12	2,2	7,72	7,35	1,31	87	526	20,2	20,22	25,88	0,11	0,07	0,62
Ap_2	14	2,1	7,77	7,42	1,59	89	499	19,4	16,77	37,98	0,14	0,05	0,92
By	17	2,1	7,85	7,49	0,33	9	130	3,1	8,12	30,63	0,08	0,06	0,35
Cy	>12	2,1	7,88	7,43	0,32	12	108	1,7	13,31	37,81	0,08	0,13	0,26

Tabla 1.3. *Análisis químico del extracto de saturación de los horizontes de la calicata. Abreviaturas: CE: Conductividad eléctrica; HCO_3^-: Bicarbonatos; CO_3^{2-}: Carbonatos; Cl^-: Cloruros; SO_4^{2-}: Sulfatos.*

Horizonte FAO	Espesor (cm)	Presión osmótica (atm)	pH (25ºC)	CE (dS m^{-1} a 25ºC)	HCO_3^- (mg L^{-1})	CO_3^{2-} (mg L^{-1})	Cl^- (mg L^{-1})	SO_4^{2-} (mg L^{-1})	Ca (meq L^{-1})	Mg (meq L^{-1})	Na (meq L^{-1})	K (meq L^{-1})
Ap_1	12	0,93	8	2,59	178	< 5	< 10,0	1536	31,3	0,89	0,3	0,89
Ap_2	14	0,67	7,8	1,85	121	< 5	< 10,0	928	20,05	0,88	0,24	0,68
By	17	0,78	7,5	2,17	173	< 5	12,2	1300	24,8	0,92	0,47	0,26
Cy	>12	0,88	7,7	2,45	80,2	< 5	21,5	1540	29,1	0,94	0,6	0,36

Los valores de conductividad eléctrica en el extracto 1:5 son elevados (Tabla 1.2), manteniéndose prácticamente constantes en todo el perfil y en torno a 2,1 dS m^{-1}, por lo que se hace imprescindible la determinación del análisis del extracto de saturación de la Tabla 1.3. La conductividad eléctrica del extracto no supone límites al crecimiento del olivar al estar por debajo de los 3,8 dS m^{-1} (Bienes 2013). El contenido en calcio es elevado mientras que en el resto de cationes es bajo. El contenido en sulfatos en el horizonte Ap_1 son algo elevados (el límite está en 1440 mg L^{-1}) y superiores a los registrados en Ap_2 y By, lo que indica un aporte secundario de yeso, ya sea como consecuencia de la erosión hídrica o eólica. El contenido en bicarbonatos es bajo.

La característica más notable de éste perfil es su alto contenido en yeso, lo que no ha permitido separar el limo de la arcilla al realizar la textura en el horiezonte Cy con el método de la pipeta (MAPA 1994). El contenido en arenas fue alrededor del 45-60% en todas las muestras (Fig. 1.12). La clase textural de todos los horizontes es "Franca" excepto en el horizonte Ap_2 que es "Franco limosa". El porcentaje de elementos gruesos varía entre un 10% en el horizonte más superficial, y progresivamente va aumentando hasta un 45% en el horizonte Cy.

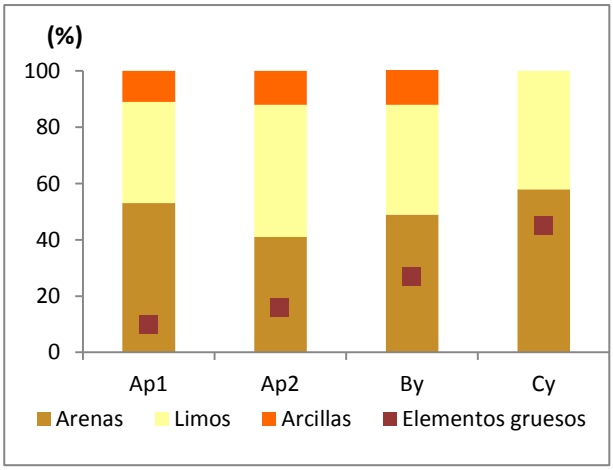


Figura 1.12. *Análisis granulométrico de los perfiles de la calicata. En el horizonte Cy no se pudo separa la fracción limo de arcilla por problemas de floculación, por lo que el dato presentado es la suma de ambas fracciones.*

Vegetación

Se trata de un área muy antropizada con grandes extensiones de cultivos leñosos, principalmente olivar (Fig. 1.13) junto a viñedo, almendro, huerta y cereal.

Figura 1.13. Fotografía desde la parcela 10 hacia el Sureste.

La vegetación natural está dominada por el esparto (*Stipa tenacissima*) y la retama (*Retama sphaerocarpa*) con una escasa cobertura dado el carácter semiárido de la zona (Fig. 1.14). A estas especies les acompañan tomillos *(Thymus sp.*), albardín (*Lygeum spartum*), ontina *(Artemisia herba-alba),* santolina (*Santolina chamaecyparissus*), saponaria *(Saponaria sp.*), etc.

Figura 1.14. Fotografía de la vegetación natural del entorno desde la parcela 10 hacia el Norte.

Clase agrológica

Según el mapa de clases agrológicas (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid 2008) la parcela se encuadra en la Clase 6, que indica que los suelos tienen severas limitaciones que los hacen normalmente inadecuados para el cultivo y que restringen su uso a prados, pastizales, bosques o áreas naturales. Dentro de esta clase se corresponde con la Subclase 6e, donde se concreta que la limitación más importante es debida a problemas de erosión y escorrentía.

Las parcelas de estudio y los tratamientos de cubiertas vegetales

La parcela donde se ha llevado a cabo el estudio con las cubiertas vegetales (parcela 10) tiene una superficie de 3,08 ha con una pendiente de entre el 13 y 17 % Noreste-Suroeste (Fig. 1.15a). Esta vaguada determina las principales vías de escorrentía superficial dentro de la zona de estudio. El estudio de la pérdida de suelo a medio plazo tuvo que realizarse en la microcuenca (Fig. 1.15b) de la que forma parte la parcela 11 debido a la ausencia de zona de sedimentación en la parcela 10.

El olivar de la parcela 10 es de la variedad Cornicabra en marco de plantación intensivo, con una distancia entre olivos de 6 m y entre filas de 7 m (densidad: 238 árboles ha^{-1}), manejado en condiciones de secano. Fue plantado en la primavera de 2004 con plantones de vivero de un año y medio. El olivar está dotado de un sistema de riego por goteo que no se ha empleado durante todo el periodo de la Tesis Doctoral ya que uno de los objetivos ha sido estudiar el efecto de las cubiertas sobre la humedad del suelo y, finalmente, sobre la producción y calidad del VOO, por lo que era imprescindible que no hubiera aportes de agua diferentes de las lluvias.

En la parte alta de la microcuenca (Fig. 1.15b) se encuentra parte del olivar de la parcela 11. Este olivar fue plantado en 2006 con plantones de la variedad Cornicabra de un año y medio. El marco de plantación es de 7 x 7 m, con una densidad de 204 olivos ha^{-1}, algo inferior al olivar de la parcela 10. Este olivar desde su plantación está sin riego y se maneja como olivar ecológico, con varios pases de labor anuales. En la zona llana de la microcuenca se siembra cereal de invierno en secano.

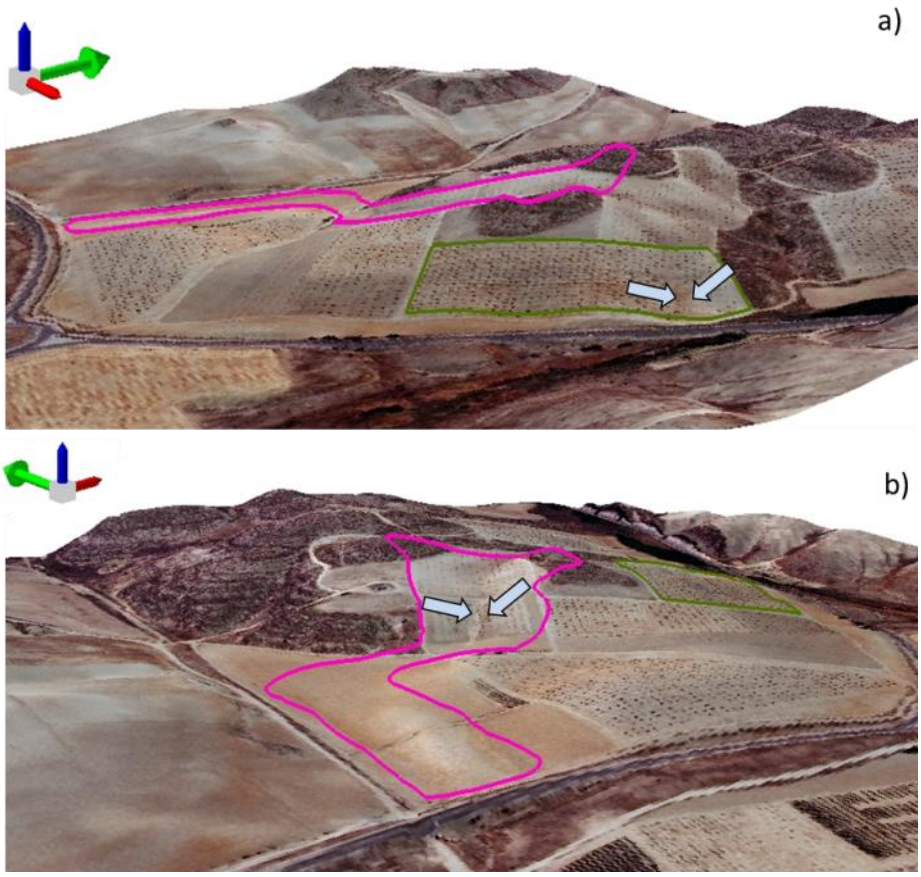


Figura 1.15. *Dos vistas de las parcelas de estudio sobre ortofoto de 2012 en 3 dimensiones (forzado de Z=1,5 para magnificar el relieve de la zona). El recinto verde se corresponde con la parcela 10 (a) y el rosa con la microcuenca (b). Las flechas azul claro marcan el sentido de la escorrentía en la zona de las microparcelas y de la vaguada de la microcuenca. La flecha verde marca el norte, la roja el este y la azul la perpendicular.*

Tratamiento de cubiertas vegetales

El estudio comenzó en noviembre de 2010, momento en que se labraron todas las calles con un cultivador tipo chisel (labor de unos 15 cm de profundidad) y se procedió a la siembra en las calles con cubierta.

Los tratamientos de cubiertas objeto de la presente Tesis Doctoral han sido:

a) **Cubierta anual de gramíneas**: Cebada (*Hordeum vulgare* L.), gramínea con un sistema radicular fasciculado muy ramificado (Fig. 1.16a). Esta

planta resiste tanto las condiciones climáticas como las edáficas de la zona, siendo fácil de encontrar en el mercado, de manejo sencillo y conocido. La variedad elegida ha sido de ciclo largo, con siembra otoñal. La dosis de siembra empleada ha sido de 130 Kg ha^{-1} (precio de 0,70 € Kg^{-1}), que es inferior a la dosis habitual cuando lo que se pretende es un cultivo de cebada. El sencillo manejo y bajo coste de esta cubierta facilita la futura aplicación por un agricultor.

b) **Cubierta anual de leguminosa:** las tres primeras campañas se ha sembrado esparceta (*Onobrychis viciifolia* Scop.), pero debido a su escaso crecimiento a partir de la campaña 2013/14 se ha procedido a la siembra de yeros (*Vicia ervilia* Willd.) (Fig. 1.16b). Las leguminosas aportan nitrógeno al suelo cuando son incorporadas "en verde" al mismo, debido a la simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico que evita o reduce el aporte de fertlizantes nitrogenados. Por ello se considera que aumenta el contenido de este nutriente en el suelo. Ambas especies resisten suelos poco fértiles y secos, pero en el caso de estudio, la adaptación de los yeros a la zona fue mucho mejor. La dosis de siembra empleada fue de 42 Kg ha^{-1} (a 2,75 € Kg^{-1}) para la esparceta y 72 Kg ha^{-1} de yeros (a 0,60 € kg^{-1}). Estas dosis son muy inferiores a las empleadas cuando se trata de implantar el cultivo (100 Kg ha^{-1} para la esparceta y 120 Kg ha^{-1} para los yeros). Los yeros además tienen la ventaja de no ser predados por los abundantes conejos de la zona.

c) **Cubierta permanente de gramínea:** *Brachypodium distachyon* (L.) Beauv., gramínea de bajo porte (no supera los 20 cm) de ciclo anual con distribución mediterránea, por lo que está bien adaptada a las condiciones edafoclimáticas de la zona de estudio (Fig. 1.16c). Su raíz de tipo fasciculado al igual que la de cebada, favorece la infiltración y sujeta el suelo evitando su pérdida. Se agosta al comenzar el verano, segada adecuadamente permite la autosiembra, por lo que reduce los costes de operación. La dosis de siembra ha sido de 40 Kg ha^{-1} con un coste de 6,80 € Kg^{-1}. Comercialmente recibe el nombre de "Vegeta olivar".

d) **Control**: se ha realizado una labor con cultivador chisel cada otoño. El objetivo ha sido romper la costra superficial que limita la infiltración y eliminar la vegetación arvense desarrollada durante la campaña agrícola anterior (Fig. 1.16d). No se ha tratado de imitar las labores que aplican los olivicultores de la zona, ya que ellos suelen dar entre 2 y 4 pases en función de la climatología del año y aquí ha sido labor única debido a la elevada erodibilidad del suelo.

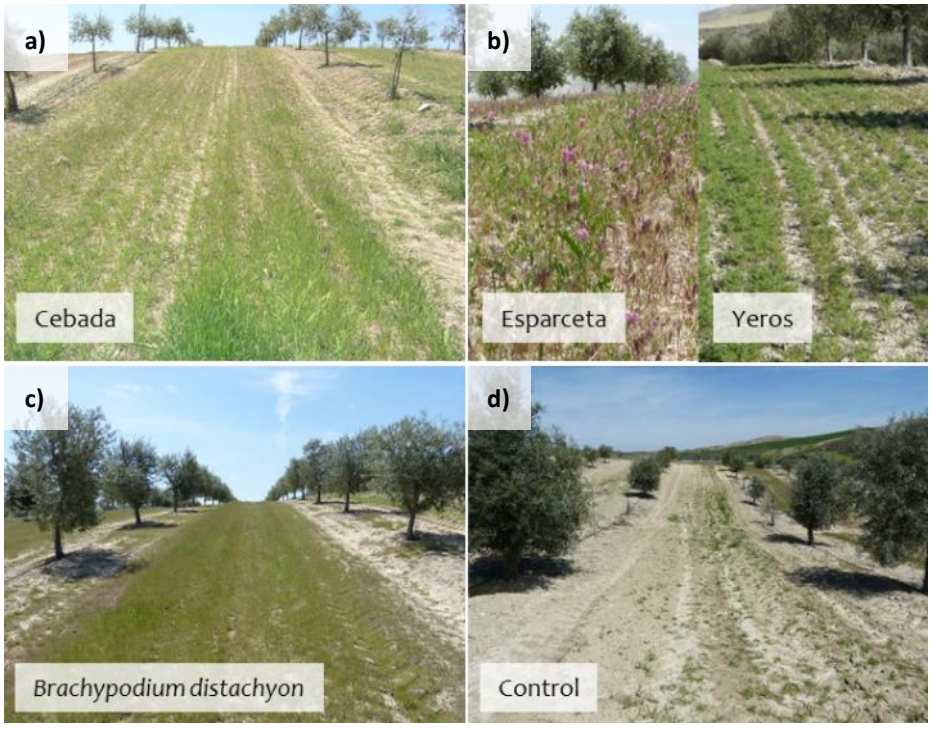


Figura 1.16. *Fotos de los tratamientos ensayados tomadas en la primavera de 2013, excepto los yeros que se tomó en la primavera de 2014.*

Tareas en las cubiertas vegetales

La cronología de las principales tareas en el olivar de la parcela 10 durante las cuatro campañas agronómicas se encuentra en la tabla 1.4. La figura 1.17 recoge algunas imágenes de dichas operaciones. Tras el pase del cultivador con el que se daba una labor superficial al suelo, se procedía a la siembra de la cubierta en la calle en un ancho de 6 m, dejando 50 cm sin sembrar en cada margen. Esta franja de un metro de ancho en las líneas de olivo se ha

tratado con herbicida (glifosato) cada primavera para facilitar la recogida de aceituna y la eliminación de las varetas de los olivos.

La siega se ha efectuado una vez cada primavera (primera quincena de mayo), excepto en el año 2013 ya que debido a una mayor precipitación la vegetación siguió creciendo tras el primer corte, siendo necesario segar de nuevo un mes después. La maquinaria utilizada para la siega fue una desbrozadora de martillos en las calles y una desbrozadora de hilo en las microparcelas. La altura de corte ha sido de 15 cm en todas las calles, excepto en Brachypodium que fue algo más alta con el objeto de dejar aproximadamente un 15-20 % de espigas sin segar y permitir así la resiembra (cada año se seleccionaba la altura adecuada, oscilando entre 15 y 20 cm).

La recogida de aceituna se ha realizado en 10 olivos de cada tratamiento seleccionados cada año al azar en el momento de envero (finales de noviembre/primeros de diciembre) utilizando un peine vibrador y tendales para evitar el contacto del fruto con el suelo. La producción de cada olivo se pesaba individualmente. En el mismo día de la recogida se transportaban en cajas de 20 kg al laboratorio de la finca experimental “El Encín” donde se procedía a la extracción del aceite con el sistema Abencor en 24 o 72 horas, estando refriegeradas (4ºC) hasta ese momento.

Tabla 1.4. *Tareas principales en el olivar de estudio.*

Año	2010	2011			2012			2013					2014
Mes	Noviemb.	Mayo	Noviemb.	Diciemb.	Mayo	Noviemb.	Diciemb.	Mayo	Junio	Noviemb.	Diciemb.		Mayo
Cebada	Laboreo y siembra	Siega	Laboreo y siembra	Recogida de aceituna	Siega	Laboreo y siembra	Recogida de aceituna	Siega	Siega	Laboreo y siembra	Recogida de aceituna		Siega
Esparceta /Yeros													
Brachypodium distachyon													
Control	Laboreo		Laboreo			Laboreo			Siega	Laboreo			

Figura 1.17. *Fotografías de las principales operaciones realizadas en la parcela de ensayo.*

Diseño experimental

Cada tratamiento del suelo se ha establecido en 3 calles consecutivas del olivar, con el objeto de tener dos líneas de olivo con el mismo tratamiento a cada lado (Fig. 1.18). En las calles centrales se instalaron las microparcelas de erosión tipo Gerlach, tres por cada tratamiento, dispuestas al azar en el sentido de la máxima pendiente (hacia la vaguada). En estas microparcelas se han tomado los datos de pérdida de suelo tras cada evento lluvioso y se ha realizado la estimación de la cobertura vegetal. Las muestras de suelo para análisis en laboratorio y los parámetros de suelo (resistencia a la penetración e infiltración) se han realizado en puntos al azar fuera de la zona de la microparcela en las mismas calles centrales. Los olivos muestreados estaban situados en las líneas adjuntas a las calles centrales.

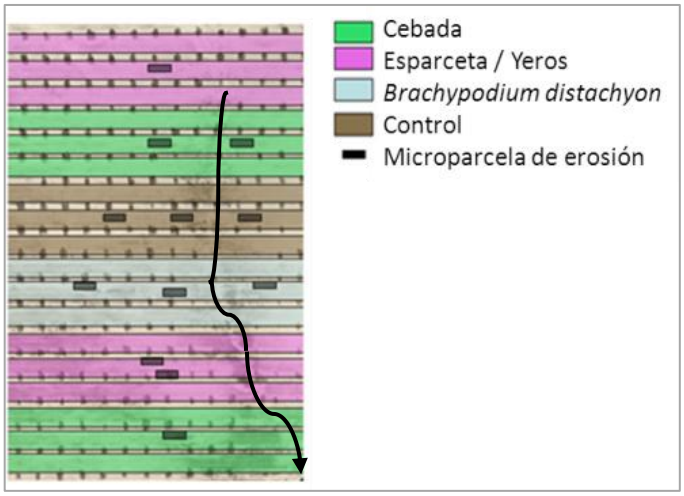


Figura 1.18. *Situación de las microparcelas de erosión en las calles del olivar de los distintos tratamientos. La flecha negra representa el reguero hacia el que drenan las calles del olivar.*

Objetivos e hipótesis

El objetivo general de esta Tesis Doctoral es la evaluación del efecto de distintas cubiertas vegetales (dos anuales y una permanente) frente al laboreo sobre las pérdidas de suelo por erosión, la variación de distintos parámetros edáficos y la producción y calidad del Aceite de Oliva Virgen (VOO) en un olivar en condiciones de secano, desarrollado sobre margas yesíferas y clima semiárido. La hipótesis de partida es que la pérdida de suelo producida por las prácticas agrícolas tradicionales en los olivares de secano es insostenible, y que las cubiertas vegetales son una alternativa de manejo que reducirán está pérdida a la vez que mejorarán distintas propiedades del suelo, sin que tengan un efecto significativo sobre la cantidad y calidad del VOO. El principal fin de esta investigación es ofrecer una visión completa de los beneficios ambientales y de producción y calidad del VOO que suponen las cubiertas vegetales frente a la práctica tradicional del laboreo. Todo ello supondrá una práctica y valiosa información para la toma de decisiones en favor de esta herramienta de manejo sostenible del territorio por parte de los olivicultores y de los técnicos y políticos que desarrollan normativa de conservación del suelo, tanto en esta región como en otras zonas edafoclimáticas similares con olivar.

Los objetivos específicos de la presente Tesis Doctoral son:

1. Estudiar a nivel de microcuenca las pérdidas de suelo que se han ocasionado en las últimas décadas en una ladera con olivar empleando radioisótopos (^{137}Cs), lo que evidenciará hasta qué punto el manejo actual puede potenciar los procesos erosivos y en qué medida los nuevos manejos de suelo planteados pueden controlar la pérdida de suelo.

2. Valorar las tasas erosivas de distintas cubiertas vegetales (cebada, leguminosa y *Brachypodium distachyon*) respecto al laboreo en las calles del olivar.

3. Estudiar la influencia de los tratamientos ensayados sobre distintos aspectos edáficos: fijación de carbono en el suelo, nitrógeno del suelo, evolución de la estabilidad estructural de los agregados, cambios en la porosidad (macro, meso y microporosidad) y densidad aparente,

evolución de la infiltración y de la humedad del suelo (economía del agua), prestando especial atención a la relación suelo-agua.

4. Estudiar la influencia de las distintas cubiertas respecto al laboreo sobre la producción del olivar y la calidad analítica (acidez, índice de peróxidos, color, pigmentos, polifenoles, perfil de ácidos grasos) y sensorial del VOO.

La presente Memoria de Tesis Doctoral se compone de siete capítulos. El capítulo 1 está dedicado a la Introducción general. Los capítulos 2-5 exponen los resultados de la presente investigación reproduciendo exactamente el contenido de los artículos publicados o enviados a diferentes revistas científicas internacionales indexadas. Tanto los aparatados de material y métodos como resultados se encuentran incluidos dentro de cada uno de esos cuatro capítulos, por lo que no se ha procedido a su desarrollo en capítulo aparte.

El capítulo 6 aborda la discusión general de los resultados obtenidos en toda la investigación desarrollada, y el capítulo 7 presenta las conclusiones más relevantes de esta Tesis Doctoral.

Una síntesis de los contenidos de la Memoria de la Tesis con las publicaciones que los integran y los objetivos a los que responden se presenta en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. *Visión general de la investigación desarrollada con sus objetivos y resultados en forma de publicación y manuscritos incluidos en esta Tesis Doctoral.*

Capítulo	Objetivos	Resultados
Capítulo 1		Introducción general
Capítulo 2	1. Estudiar a nivel de microcuenca las pérdidas de suelo en una ladera con olivar empleando radioisótopos (^{137}Cs)	Blanca Sastre, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz (2017) Estimating soil redistribution rates in an agricultural hillside by ^{137}Cs: case study in Central Spain on gypsiferous soil. En revisión en *Journal of Environmental Radioactivity*.
Capítulo 3	2. Valorar las tasas erosivas de distintas cubiertas vegetales respecto al laboreo en las calles del olivar	Blanca Sastre, Celia Barbero-Sierra, Ramón Bienes, Maria Jose Marques, Andrés García-Díaz (2017) . Soil loss in an olive grove in Central Spain under cover crops and tillage treatments, and farmer perceptions. *Journal of Soils and Sediments*, 17(3):873-888. doi: 10.1007/s11368-016-1589-9.
Capítulo 4	3. Estudiar la influencia de distintas cubiertas vegetales sobre las propiedades físico-químicas del suelo	Blanca Sastre, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz (2017) Effects of cover crops on soil properties in an olive grove in gypsiferous soil under semiarid conditions. En revisión tras incluir los comentarios de los revisores en *Journal of Agriculture, Ecosystems and Environment*.
Capítulo 5	4. Estudiar la influencia de las distintas cubiertas respecto al laboreo sobre la producción del olivar y la calidad analítica y sensorial del VOO	Blanca Sastre, M. Ángeles Pérez-Jiménez, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz, Cristina de Lorenzo (2016) The effect of soil management on olive yield and VOO quality in a rainfed olive grove of Central Spain. *Journal of Chemistry*, 2016, Article ID 4974609, 15 pp. doi: 10.1155/2016/4974609.
Capítulo 6		Discusión general
Capítulo 7		Conclusiones generales

Capítulo 2

Estimación de las tasas de redistribución del suelo en una ladera agrícola con ^{137}Cs

Este capítulo reproduce íntegramente
el texto del siguiente manuscrito:

Blanca Sastre, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz.

Estimating soil redistribution rates in an agricultural hillside by ^{137}Cs: case study in Central Spain on gypsiferous soil. En revisión en *Journal of Environmental Radioactivity*

(ver Anexo 1)

Resumen

La pérdida de suelo en cultivos agrarios mediterráneos es una de las principales preocupaciones debido a los impactos económicos, sociales y ambientales. Los métodos empleados para medir pérdidas de suelo por erosión de parcelas de erosión y lluvia simulada sufren de limitaciones espaciales y temporales, y los modelos de erosión tienen que hacer frente a la calibración y validación. Los métodos basados en las medidas de ^{137}Cs pueden resolver estas limitaciones. Para estimar las tasas de redistribución del suelo en una microcuenca del centro de España sobre suelo yesífero en clima semiárido, se han empleado tres modelos de conversión, el Modelo Proporcional (PM), Modelo del Balance de Masas (MBM1) y Modelo Refinado del Balance de Masas (MBM2). La microcuenca tiene dos zonas diferenciadas, una en pendiente donde se plantó un viñedo en 1975 que fue reemplazado por un olivar en 2006, siendo ambos manejados por laboreo en las calles; y otra zona llana a la salida de la microcuenca con cereal de invierno. Se encontraron pequeñas diferencias entre los resultados de los modelos, pero una tasa de pérdida de suelo mayor que las medidas con parcelas de erosión (1 m^2 y 80 m^2) en estudios previos en la misma zona. La pérdida neta de suelo obtenida con el MBM2 fue de 19 Mg ha^{-1} $año^{-1}$, una pérdida claramente insostenible.

Palabras clave: erosión hídrica, olivar, agricultura convencional, laboreo.

Abstract

Soil loss in Mediterranean agricultural lands is a major concern due to the economic, social and environmental impacts. The erosion plots and simulation rainfall methods employed to measure soil loss suffer from space and time-scale limitations and empirical erosion models have to cope with calibration and validation. Methods based on ^{137}Cs measurements can resolve those limitations. Three conversion models, Proportional model (PM), Mass Balance Model (MBM1) and Refined MBM (MBM2), were used to derive soil redistribution rates in a microcatchment of central Spain in gypsiferous soils under semiarid climate. The microcatchment has a sloping area with a vineyard since 1975 replaced by an olive grove in 2006, both were managed by tilling the interrows; and a flat area with winter cereal at the exit of the microcatchment. There were slight differences between the results of the models, but a higher soil loss rate was measured than that reported in previous studies with erosion plots (1 m^2 and 80 m^2) in the same area. The net soil loss obtained with MBM2 was of 19 Mg ha^{-1} $year^{-1}$, a clearly unsustainable rate.

Keywords: water erosion, olive grove, conventional agriculture, tillage.

1. Introduction

Soil erosion is one of the major environmental problems all over the world. (FAO and ITPS, 2015) estimate that global soil erosion by water ranged 20–30 Gt yr^{-1}, while tillage erosion may amount to ca. 5 Gt yr^{-1}. Inappropriate agricultural practices are one of the main driving forces of soil degradation in Europe, causing soil erosion and a decline in organic matter content (Jones & Montanarella 2003, Gucci *et al.* 2012). Furthermore, cropland soil loss threatens global food production (Pimentel & Burgess 2013).

In Mediterranean basin several countries have a high percentage of agricultural land area of total land area, e.g. Spain 57%, Greece 55%, Turkey 52% and Italy 50% (FAOSTAT 2015). In these places there is an imbalance between erosion rates under conventional agriculture (10-20 Mg ha^{-1} yr^{-1}) and the rate of soil formation estimated in 0.15 Mg ha^{-1} yr^{-1} (FAO and ITPS, 2015). Therefore, in Mediterranean areas soil erosion is one of the most important land degradation driving processes (EEA 2015, Panagos *et al.* 2015a) and the impact of agriculture results in high and non-tolerable soil losses (Verheijen *et al.* 2009).

Soil erosion rates can be determined in different ways: 1) using experimental erosion plots at different scales (Moreno-de las Heras *et al.* 2010, Nadal-Romero *et al.* 2015) that are useful to compare managements or sites, but suffer from the limitation of upscaling the measurements from the small plot, and short time of measurements, usually ranged 2 to 7 years (Rabesiranana *et al.* 2016); 2) rainfall simulations, that are the most predictable and cost-effective means to compare runoff and sediment yields between sites, but which extrapolation to larger areas and natural rainstorms is difficult (Meyer 1994); and 3) empirical erosion models, such as USLE and RUSLE (Renard *et al.* 1997, Kinnell 2010), SWAT (Gessesse *et al.* 2015, Napoli & Orlandini 2015), WEPP (Soto & Díaz-Fierros 1998, Tiwari *et al.* 2000, Nearing 2006) or SERT (López-Vicente *et al.* 2013) that have the problem of the calibration and validation .

A useful tool to estimate soil erosion is the technology based on the use of radionuclides: Caesium-137 (^{137}Cs), excess lead-210 ($^{210}Pb_{ex}$) and beryllium-7 (^{7}Be) (Dercon et al, 2012; Walling et al, 2011). ^{137}Cs is by far the most widely

used radionuclide in soil redistribution research because of its high affinity for fine particles, relatively long half-life (30.2 years) (Dercon *et al.* 2012) and relative ease of measurement and the well-defined temporal pattern of its fallout input (Ritchie & McHenry 1990, Walling & Quine 1992). This isotope has been used all over the world to estimate soil redistribution linked to sheet and rill erosion processes (Schoorl *et al.* 2004, Fang *et al.* 2012, Porto *et al.* 2016, Rabesiranana *et al.* 2016).

^{137}Cs is not natural; it arose from the nuclear weapons tests that occurred during the 1950s and 1960s, which makes it a unique indicator for the estimation of erosion and sedimentation (Zapata 2003). The first detectable amounts of ^{137}Cs were deposited in 1954, and the maximum were deposited in 1963 (Zhang *et al.* 1990), being the former year used as the reference year for the radionuclide dating. The last European deposition of ^{137}Cs was in 1986 after the Chernobyl accident (UNSCEAR 2012). Different studies have reported that this accident resulted in almost no radionuclide deposition in Spain (Navas & Walling 1992, García-León *et al.* 1993), thus the Chernobyl event was not consider to be relevant to the present study.

The method is based on the relationship between the long-term ^{137}Cs concentration and the loss or gain of soil. ^{137}Cs falls from the atmosphere and is adsorbed by soil components, such as organic matter or clay particles (Navas *et al.* 2011), resulting in its participation in the soil exchange complex. Therefore, this radionuclide can be transported in accordance with the soil management, water erosion and sediment transport processes. The method has some advantages and limitations (Mabit *et al.* 2008). Some of the advantages are: 1) estimations arising from soil redistribution rates are included in the medium term, therefore the mean data are less influenced by extreme events; 2) redistribution rates of soil represent the integrated effect of all of the landscape processes resulting from the movement of soil particles under certain land management/use practices; 3) this technique provides information regarding erosion and deposition in the same basin, resulting in the estimations of the net rates of sediment exportation; and 4) data interpretation allows for the quantification of processes such as soil redistribution by tillage and loss or deposition associated with soil erosion.

Therefore, the ^{137}Cs models represent great potential for the study of erosion and deposition at hillside and catchment scales. The aim of this study was to assess soil redistribution at mid-term in a sloping cultivated microcatchment in gypsiferous soils of Central Spain under semiarid conditions, employing different conversion models of ^{137}Cs. In the hillside there is a perennial crop managed by tilling almost the last four decades.

2. Materials and methods

2.1 Study area

The study area is located in Central Spain, in southern Madrid (UTM 30N, ETRS89: X= 455329, Y= 4435954). The elevation ranged from 525 to 555 m.a.s.l.. The climate is Mediterranean semiarid, with long hot summers and cold winters. The mean annual temperature is 13.6ºC and reference evapotranspiration (ETo) is 1112 mm (Penman-Monteith method). The annual precipitation is 390 mm with high inter and intra-annual variability.

The main characteristics of the pit opened in the area are reported in Table 2.1. A high silt percentage was measured in all the horizons, with a low CEC, medium to high EC and low soil organic carbon and total nitrogen content. These properties make gypsiferous soils prone to degradation and erosion. The soil is classified as *Haplic Gypsisol* (IUSS Working Group WRB 2014), with a *xeric* moisture regime. The microcatchment can be divided in two part, the upper sloping part with a surface of 2.7 ha (13% of slope), and the flat part where almost all the sediments were deposited, with an extension of 2.9 ha (3% of slope).

The microcatchment used to be covered by gypsiferous rangeland, with species like esparto grass (*Stipa tenacissima* L.), common stork's bill (*Erodium ciconium* L.), common horehound (*Marrubium vulgare* L.) and *Limonium sp.*, which today are placed in the hills around. In 1975 the microcatchment was tilled and a vineyard was established in the upper part and cereal in the flat part. The vineyard was pulled up in 2004 and an olive grove was planted in 2006 with trees in 7 x 7 m^2 spacings. Both the vineyard and the olive grove were managed by tilling the inter-rows to remove weeds; and in the flat part

a winter cereal, usually barley (*Hordeum vulgare* L.), was seeded each autumn and harvested in summer.

Table 2.1. *Basic physical and chemical properties of the soil. CE: Coarse elements, Sand (2000-20 µm), Silt (20-2 µm), Clay (<2 µm), B: bulk density, CEC: cation exchange capacity, EC: electrical conductivity of a saturated soil extract, SOC: soil organic carbon, SN: soil nitrogen.*

Horizon	Depth (cm)	CE (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	B (Mg m^{-3})	CEC (cmol kg^{-1})	EC (mS cm^{-1})	SOC (%)	SN (%)
Ap_1	0-12	10	53	36	11	1.2	20.2	2.6	0.72	0.12
Ap_2	12-26	16	41	47	12	1.4	16.8	1.9	0.93	0.11
By	26-43	27	49	39	13	1.2	8.1	2.2	0.17	0.04
Cy	43-55	45	58	42*		nd	13.3	2.5	0.17	0.02

*nd: no data; * In Cy-horizon silt and clay flocculated so there was no feasible to separate them*

2.2. Soil sampling, analysis and ^{137}Cs determination

2.2.1. Reference points

Two undisturbed hillslope were selected as reference sites. In each one, one reference point (RP) was selected on the flat part at the top of the hill. RP-A was located 100 m away from the study area at 569 m.a.s.l.; and RP-B was 350 m apart, at 568 m.a.s.l. Following the recommendations of Zapata (2003) selected points were not under important net erosion or deposition since 1946 according to the available information and historical orthophotos (Fig. 2.1). For each RP a profile up to the parent rock in sections of 5 cm were collected by excavating a soil pit and then collecting carefully 1 kg of soil from each depth increment, similar to Petrovic *et al.* (2016). The depths were 30 cm in RP-A and and 25 cm in RP-B. Cylindrical corers (5 cm Ø) were taken in each point and depth to determinate soil bulk density.

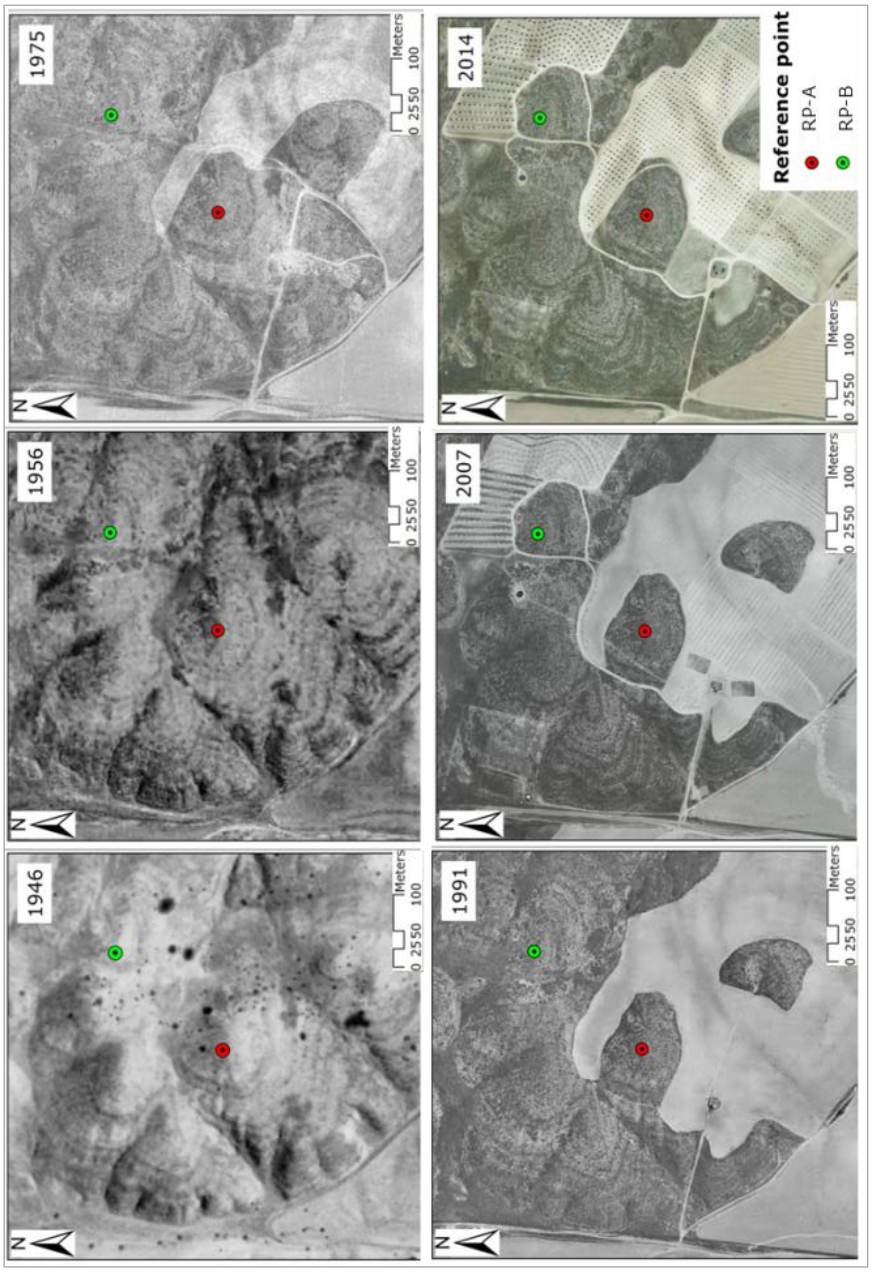


Figure 2.1. Ortophotos of the references areas since 1946 to 2014.

2.2.2. Sampling points

At the cultivated sites along the slope, the concentration of ^{137}Cs exhibits a homogenization along the Ap-horizon (the ploughed horizon), where nearly all of the ^{137}Cs activity is found (Navas & Walling 1992, Rabesiranana *et al.* 2016). Below this horizon, the activity decreases substantially (Hrachowitz *et al.* 2005) and can be considered negligible in the Mediterranean region. In the study area, this agricultural soil was ploughed with disks up to 25 or 30 cm, thus soil samples were taken from the Ap-horizon, up to the base of the ploughed horizon, along the hillslope in a single profile. Fourteen sampling points (SP) were selected to obtain a representative coverage of the study plot (Fig. 2.2): watershed limit (SP 1), erosion area (SP 2 to 9) and deposition area in the flat part of the plot (SP 10 to 14). Although SP-9 has a low slope, its characteristics make it more similar to sloping SP. The sampling procedure was the same as for the RP, including cylindrical corers for bulk density.

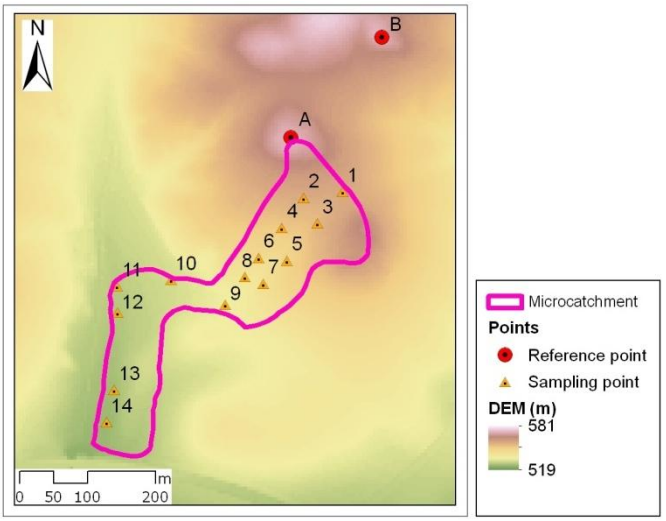


Figure 2.2. *Reference points (red circles), sampling points (yellow triangles) and the microcatchment over the digital elevation model (DEM).*

Reference and sampling points were geographically referenced (GPS Garmin) with the UTM coordinates and altitude; slope was also determined with an inclinometer. All samples were taken in summer 2012, air-dried, sieved to 2 mm and homogenized before analyzed.

2.2.3. Soil analysis and ^{137}Cs determination

For each sample, one part was used to physico-chemical analysis: coarse elements (>2 mm fraction), texture (Robinson pipette method, Robinson 1922), pH (potenciometric method), carbonates (Bernard calcimeter method, (Muller & Gatsner 1971), organic carbon (wet oxidation method, Walkley & Black 1934), total nitrogen (Kjeldahl method, Kjeldahl 1883), phosphorous (Olsen *et al.* 1954) and cations (calcium and magnesium by atomic absorption spectrometry; sodium and potassium by atomic emission spectrometry).

The other part of the sample was used to determine the mass activity of ^{137}Cs (Bq kg^{-1}) by gamma-ray spectrometry with a germanium detector in the Service of Radioisotopes of the University of Seville. The measurements were acquired at 661.6 keV, with an error ± 6% and 95% confidence, following the procedure by Hurtado *et al.* (2004). ^{137}Cs areal activity (Bq m^{-2}) was calculated multiplying ^{137}Cs mass activity (Bq kg^{-1}) corrected by stoniness, by bulk density (kg m^{-3}) and depth (m). Areal activity was the value used in the conversion models to estimate soil redistribution.

2.3. Conversion models

There are different models to estimate soil redistribution rates from ^{137}Cs inventories in cultivated soils (Zapata 2003). The models employed in this study were three, from less to more complexity: Proportional model (PM), Mass Balance Model 1 (MBM1) and refined Mass Balance Model (MBM2). For each model, the redistribution rate per point was calculated and also the gross rate of erosion, the net rate of erosion and the sediment delivery ratio for the microcatchment. According to Quine *et al.* (1992) the gross rate of erosion is equal to the mass of soil eroded each year within the field (some may be redeposited inside the microcatchment) divided by the field area; the net rate of erosion is the mass of soil exported from the field each year divided by the field area; and the sediment delivery ratio is equal to the net rate divided by the gross rate, expressed as a percentage.

2.3.1. Proportional model

PM from Walling & Quine (1990) has been widely used to estimate soil erosion in agricultural land considering ^{137}Cs inventories. This model assumes two premises. The first premise is that ^{137}Cs is uniformly homogenized with the soil; this can only be assumed in cultivated soils in which tillage has mixed the surface layer. The second premise is that the decrease in ^{137}Cs is proportional to the loss of soil, which is a simplistic view. The equation is:

(Eq. 2.1) $$Y = (10\ BdX)/100TP$$

Where *Y* is the mean annual soil loss (Mg ha^{-1} yr^{-1}); *B* is the bulk density of soil (kg m^{-3}); *d* is the depth of plough layer (m); *X* is the percentage reduction in total ^{137}Cs inventory; *T* is the time elapsed since the initiation of ^{137}Cs accumulation (1963) or the commencement of cultivation; and *P* is the particle size correction factor. The percentage reduction in total ^{137}Cs inventory is calculated as:

(Eq. 2.2) $$\mathrm{X} = ((\mathrm{A_ref} - \mathrm{A})/\mathrm{A_ref})100$$

where *A_ref* is the local ^{137}Cs reference inventory (Bq m^{-2}) and *A* is the measured total ^{137}Cs inventory at the sampling point (Bq m^{-2}).

P and P' were developed by He & Walling (1996), corresponding to points of erosion and sedimentation respectively, and based in its specific surface. P and P' are defined by these equations:

(Eq. 2.3) $$P = (S_ms/S_sl)\text{^}v \text{ and } P' = (S_ds/S_ms)\text{^}v$$

where *S_ms* is the area of the specific surface of mobilized sediment (m^2 g^{-1}); *S_sl* is the area of the specific surface of the original soil (m^2 g^{-1}); *S_ds* the specific surface of the deposited sediment (m^2 g^{-1}); and *v* is a constant with a value close to 0.65. *S_ms* was calculated from the texture of the mobilized samples collected in a Gerlach trought in a near plot in a previous study (Sastre *et al.* 2017c). *S_sl* and *S_ds* were calculated with the texture of the samples taken in this study.

2.3.2. Mass balance model 1

MBM1 considers all of the inputs and outputs of ^{137}Cs in the soil profile since ^{137}Cs began to be deposited (Walling *et al.* 2011). The equation for MBM1 is:

(Eq. 2.4) $$Y = 10Bd/P\ [1 - (1 - X/100)\text{^}(1/T)\ ]$$

2.3.3. Refined mass balance model

MBM2 incorporates the possibility of experiencing ^{137}Cs losses before it is incorporated into the arable layer (Walling *et al.* 2011); it is more realistic, although it requires a deeper knowledge of the study area. Equation 2.5 expressed the model:

(Eq. 2.5) $$dA(t)/dt = (1 - \Gamma)I(t) - (\lambda + P\ R/d)A(t)$$

where A(t) is the cumulative ^{137}Cs activity per unit area (Bq m^{-2}); Γ is the percentage of the freshly deposited ^{137}Cs fallout removed by erosion before being mixed into the plough layer; *I(t)* is the annual ^{137}Cs deposition flux (Bq m^{-2} yr^{-1}); λ is the decay constant for ^{137}Cs (yr^{-1}); P is the particle size correction factor; *R* is the erosion rate (Mg m^{-2} yr^{-1}); and *d* is the cumulative mass depth representing the mean plough depth (Mg m^{-2}).

The variable Γ is calculated as:

(Eq. 2.6) $$\Gamma = P\gamma(1 - exp\text{^}(-R\ /\ H)\ )$$

where γ is the proportion of the annual 137Cs inputs that could be eliminated by erosion; and H, the relaxation mass depth, related to the depth that recently deposited ^{137}Cs can reach (kg m^{-2}). Mabit *et al.* (2012) considered that H was very difficult to calculate; therefore, they used a constant value of 4 kg m^{-2}.

2.4. Statistical, redistribution models and GIS softwares

The mean annual soil erosion or deposition rates for the sampling points were calculated using the excel add-in developed by Walling *et al.* (2006). ANOVA test and correlations were made using the software SPSS 19 (IBM Corp. 2010). ArcMap 10.2 and ArcScene 10.2 software were used with the GPS data to create spatial distributions of ^{137}Cs inventories (Bq m^{-2}) and the pattern of soil redistribution (Mg ha^{-1} yr^{-1}) through the kriging interpolation method.

3. Results and discussion

3.1. Reference sites profile

The depth distribution of ^{137}Cs mass activity for the two reference sites was quite similar, with a penetration depth around 15 cm. Figure 3 shows the mean of both RP, depicted a dramatic decrease with increasing depth. This distribution, that fits to an exponential function, is typical of an undisturbed site, e.g. Du & Walling (2011), Fang *et al.* (2012) and Mabit *et al.* (2012). Mabit *et al.* (2008) reported that the greater proportion of ^{137}Cs inventory was contained within the top 15 cm of the soil, similar to our results.

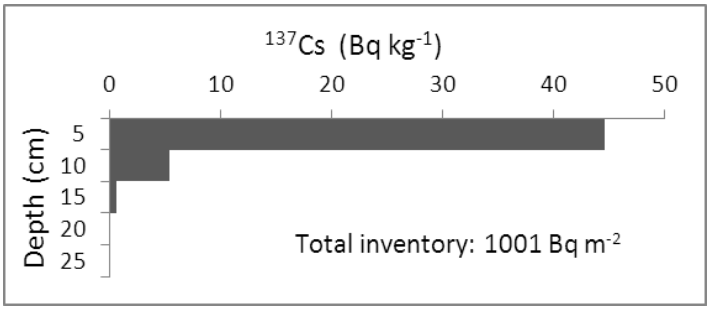


Figure 2.3. Mean depth distribution of ^{137}Cs for the two reference sites.

The reference inventory value was estimated to be 1001 Bq m^{-2} with a standard deviation of 202 and a coefficient of variation of 21%. This value is consistent with previous literature in uncultivated semiarid areas, taking onto account that global ^{137}Cs fallout deposition increases with annual precipitation and that the mean precipitation of the area is 390 mm. For example, in North-eastern Spain (Navas *et al.* 2007) measured 1715, 1213 and 993 Bq m^{-2} in three places where the annual precipitation was 500, 450 and 300 mm respectively; and in Southern Spain (Mabit *et al.* 2012) measured 1925 Bq m^{-2} with a precipitation of 630 mm yr^{-1}.

3.2. Sampling points

Fourteen sampling points (SP) were selected along the microcatchment (Fig. 2.4). The physical and chemical properties are described in Table 2.2. Activities ranged from 1.27 to 3.13 Bq kg^{-1}. The sloping SP had on mean, lower bulk density, less carbonates, organic carbon, P, Mg, Na and K, and more Ca.

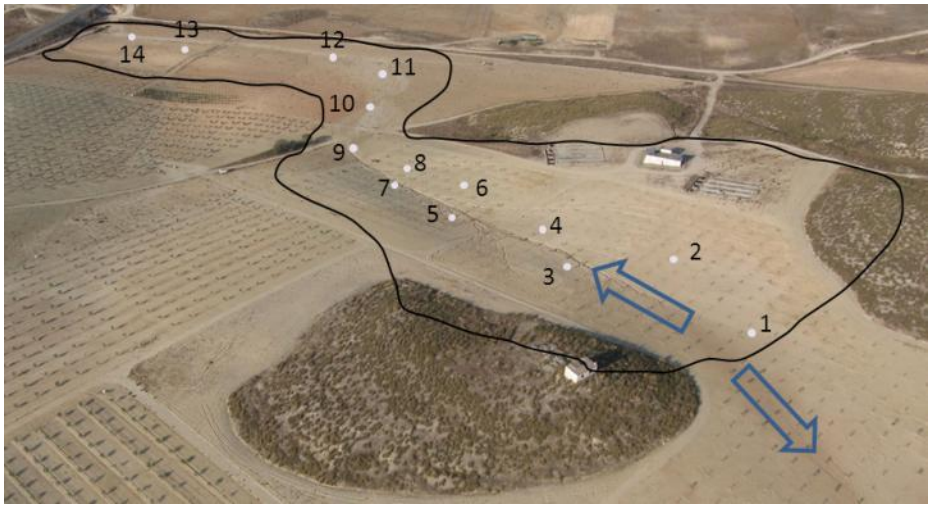


Figure 2.4. *Sampling points (white circles) and the microcatchment (black line) over a picture taken from a zeppelin after a high intensity rainfall in October 2007. As can be seen a big rill was formed in the olive grove (1-9) and sediment deposition coloured in white the soil (10-14). Blue arrows show the flow direction.*

3.3. Soil redistribution as a result of different models

The parameters employed in the different models were:

- PM and MBM1: B=1419 kg m^{-3}; d=0.3 m; P=1.15; P'=0.88; X=1001 Bq m^{-2}; sampling year=2012; year of initial tillage=1975.
- MBM2: B=1419 kg m^{-3}; d=425 kg m^{-2} (0.3 m x 1419 kg m^{-3}); P=1.15; P'=0.88; A(t)=1001 Bq m^{-2}; sampling year=2012; year of initial tillage=1975; γ=0.55, H=4 kg m^{-2}.

The values of ^{137}Cs inventories of the 14 samples with the soil redistribution for each model are listed in table 2.3. The lowest values corresponded to the points located at the hillslope, while the points in the flat area had values higher to the reference inventory, meaning deposition points. The three models showed similar results, with higher variations in the erosion points than in deposition points. Gross erosion rate ranged from 15.5 to 19.5 Mg ha^{-1} yr^{-1}, and the net erosion rate from 3.2 to 5.9 Mg ha^{-1} yr^{-1}, with a sediment delivery ratio between 21 and 32%.

Table 2.2. *Physical and chemical properties of the top soil samples. Sampling point (SP); Bulk density (B); Coarse elements (CE); Organic carbon (OC); Total nitrogen (N); Available phosphorus (P); ^{137}Cs mass activity (^{137}Cs).*

Point	Altitud (m)	Slope (%)	B (g cm^{-3})	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	CE (%)	pH	Carbonates (%)	OC (%)	N (%)	P (ppm)	Bases of change (cmol kg^{-1})				^{137}Cs (Bq kg^{-1})
													Ca	Mg	Na	K	
1	555	6	1.34	10.9	44.7	44.4	6.2	7.66	28.8	0.84	0.09	33	145.3	0.18	0.15	0.57	3.09
2	554	11	1.17	9.3	46.3	44.4	2.0	7.82	14.6	0.35	0.10	7	122.8	0.09	0.27	0.40	2.74
3	552	9	1.27	14.6	22.1	63.3	8.3	7.71	6.6	0.30	0.07	6	122.8	0.07	0.11	0.25	1.93
4	550	14	1.42	15.1	14.2	70.7	8.0	7.63	5.4	0.06	0.06	6	113.8	0.07	0.09	0.31	2.30
5	543	14	1.23	12.5	34.2	53.3	6.4	7.75	7.7	0.38	0.06	7	133.6	0.07	0.06	0.21	2.43
6	543	17	1.31	12.0	37.9	50.1	4.2	7.72	5.2	0.39	0.08	6	120.4	0.10	0.13	0.21	1.72
7	538	13	1.33	12.5	41.6	45.9	7.0	7.59	4.6	0.49	0.09	8	141.8	0.14	0.14	0.50	2.97
8	539	16	1.46	15.3	32.0	52.6	8.5	7.71	4.8	0.44	0.06	7	122.6	0.10	0.06	0.37	1.37
9	533	4	1.46	15.1	25.3	59.6	9.3	7.74	7.7	0.38	0.05	7	128.3	0.08	0.06	0.23	1.27
10	530	4	1.56	2.5	67.5	30.0	10.6	7.53	13.7	0.86	0.13	40	58.5	0.44	0.15	1.17	3.13
11	528	4	1.55	5.0	62.5	32.5	5.0	7.69	17.4	0.76	0.10	38	80.3	1.81	0.38	0.94	2.95
12	528	5	1.60	12.8	37.0	50.2	9.0	7.90	23.6	0.75	0.07	51	68.2	3.44	0.20	0.86	2.20
13	526	0	1.70	14.6	33.2	52.2	6.0	7.45	16.6	0.77	0.09	42	133.5	0.42	0.08	0.70	2.73
14	525	2	1.46	9.9	33.3	56.8	8.0	7.80	22.2	0.93	0.07	99	68.4	1.60	0.14	0.76	2.39

Table 2.3. *Erosion/deposition rates calculated using the different models. SP: sampling poing, PM: Proportional model; MBM1: Mass Balance Model 1; MBM2: Refined mass balance model.*

	SP	^{137}Cs inventory (Bq m^{-2})	Soil erosion (−) or deposition (+) (Mg ha^{-1} yr^{-1})		
			PM	MBM1	MBM2
Watershed	1	1000	-0.1	-0.1	-1.0
Erosion points	2	967	-3.4	-3.5	-4.0
	3	736	-26.5	-30.7	-29.0
	4	749	-31.4	-37.5	-36.0
	5	900	-10.1	-10.7	-10.0
	6	586	-41.7	-53.4	-51.0
	7	913	-8.9	-9.3	-9.0
	8	501	-50.1	-68.7	-66.0
	9	555	-44.8	-58.8	-56.0
Deposition points	10	1463	60.1	66.6	62.5
	11	1373	48.6	53.9	50.6
	12	1056	7.2	8.0	7.5
	13	1388	50.3	55.6	52.1
	14	1048	6.1	6.7	6.3
Gross erosion rate (Mg ha^{-1} $year^{-1}$)			-15.5	-19.5	-19.0
Net erosion rate (Mg ha^{-1} $year^{-1}$)			-3.2	-5.8	-5.9
Sediment delivery ratio (%)			21	30	32

As PM is the simplest model, it does not considerer some fact that leads to underestimate both soil erosion and deposition. MBM1 and MBM2 were very similar in their results, despite that MBM2 included more information. Due to the small differences between both MBM, in case that not enough information would be available to use MBM2, MBM1 could be used with similar results. PM should be avoided because of underestimating soil redistribution, despite that PM and MBM1 models use the same parameters.

At the hillslope the mean of soil erosion was 27.1, 34.1 and 32.6 Mg ha^{-1} yr^{-1} in PM, MBM1 and MBM2 respectively; while in the flat area the mean of deposition was of 34.5, 38.2 and 35.8 Mg ha^{-1} yr^{-1} in PM, MBM1 and MBM2 respectively. Most of the mobilized sediments remained in the flat area as can be appreciated in the picture of Fig. 4, with a delivery ratio of 21 to 32 % on mean (Table 3) that went out of the microcatchment to the road ditch.

Figure 2.5 shows the microcatchment in 3d representation with RP and SP (Fig. 2.5a), the slope map (Fig. 2.5b) and the soil redistribution map (Fig. 2.5c)

for MBM2. Higher erosion rates happened in the sloping area, close to the rill, while the deposition points were very influenced by the distance to the beginning of the sedimentation zone. This pattern was similar to those described by Rabesiranana *et al.* (2016) in which the cultivated field was located at the upper part of the hillslope, accentuating sediment transport capacity of surface runoff during rainy events.

The erosion rates were higher than that measured by our team in the study area in erosion plots. From microplots (2 x 0.5 m^2) 6.8 Mg ha^{-1} yr^{-1} of soil loss were measured during four hydrological seasons (Sastre *et al.* 2017a) and from USLE erosion plots (20 x 4 m^2) 10.3 Mg ha^{-1} yr^{-1} on mean during four years (Bienes *et al.* 2010). Despite those data, our team also recorded a single event (P = 43 mm, I = 55 mm h^{-1}) in October 2007 which yielded 93.5 Mg ha^{-1} of soil loss (Bienes *et al.* 2012). Thus, 32.6 Mg ha^{-1} yr^{-1} of erosion on mean estimated in the hillslope with MBM2 could be an actual rate, due to the occurence of normal and extreme rainfall events during thirty-seven years at microcatchment scale. One of the major constraints of erosion plots is time scale, that can cut out extreme event, and therefore, underestimate the mean soil loss, or recording an extreme event in a short period of time that overestimate the mean soil loss. Other constraint is the size of the plots, Boix-Fayos *et al.* (2007) stated that the smaller the plot, the larger the hydrological disconnection within the system and the lower the energy flows due to short distances. For instance, microplot scale (< 1 m^2) only measures interrill soil surface area (Poesen *et al.* 1994) leaving out rill and gully erosion which can carry 60-70% of all sediments (Valentin *et al.* 2005). Gómez *et al.* (2014) found that the greatest soil loss in an olive grove was due to rill and gully processes (16.1 t ha^{-1} $year^{-1}$ in a 5-year period).

Moreover, around seventy percent of the sediments were remaining in the flat part of the plot, while the other 30% went out the plot to the road ditch, having to be removed periodically. In the sedimentation area the cereal plants were partially or entirely buried by sediments, with a yield reduction that implies an economic cost. These are two of the off-site impacts of soil erosion, other impacts are 'muddy flooding' of properties and infrastructure, pollution of water bodies, filling lakes or reservois, etc. (Boardman 2006, de Vente *et al.* 2008, Boardman 2009, Ledermann *et al.* 2010, Mullan 2013). All of them mean environmental, social and economic impacts.

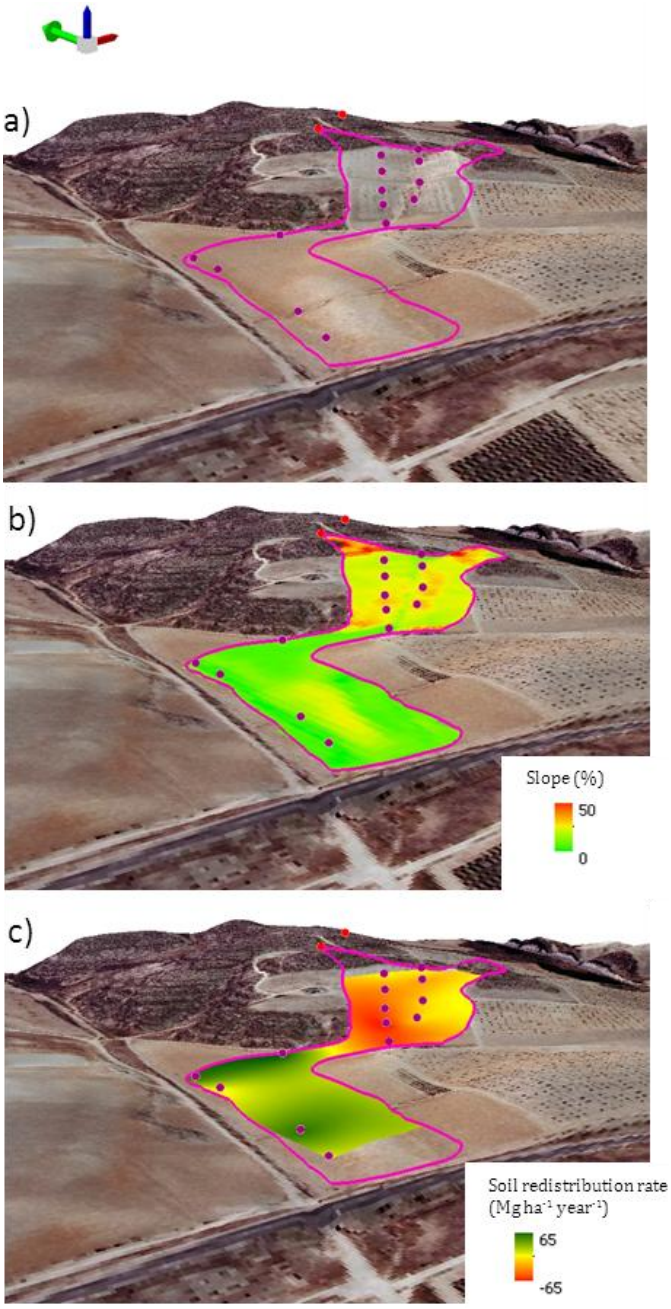


Figure 2.5. *Reference points (in red), sampling points (in purple) in the microcatchment (in pink line) a) over the ortophoto of 2012; b) with the slope map in %; and c) with the soil redistribution rates map (- erosion area, + deposition area) in Mg ha^{-1} yr^{-1}.*

3.4. Relationships between soil redistribution and soil properties

Due the low differences among models, and as MBM2 was the most complete model, the results of soil redistribution obtained with this model were correlated to soil properties. Soil redistribution rate was highly correlated with several properties (Table 2.4). Soil erosion was greater with higher slopes and was positively correlated to clay and sand percentage, while soil deposition was positively correlated to silt, carbonates, organic carbon, total N, available P and the cations Mg, Na and K. As was expected, more erosion is mainly linked to greater slopes, and sediments carry nutrients and organic carbon, similar to the results of Bienes *et al.* (2010) and García-Díaz *et al.* (2017) for phosphorus and nitrogen, respectively. Martinez-Mena *et al.* (2012), Marquez-Garcia *et al.* (2013) and Sastre *et al.* (2017a) described a sediment enrichment in organic matter.

Table 2.4. *Spearman's correlations between soil properties and soil redistribution rate of MBM2. Redistribution rate (R); Mass activity (137Cs); Bulk density (B); Coarse elements (CE); Organic carbon (OC); Total nitrogen (N); Available phosphorus (P).*

Properties	R
Slope	-0.71**
B	0.52
Clay	-0.65*
Silt	0.60*
Sand	-0.58*
CE	-0.10
pH	-0.25
Carbonates	0.70**
Organic carbon	0.71**
N	0.73**
P	0.80**
Ca	-0.29
Mg	0.74**
Na	0.64*
K	0.86**

* p<0.05; ** p<0.01

These significant correlations between soil redistribution and soil properties evidence that the erosion and deposition points are physico-chemically different. In order to compare both type of soil redistribution points, two groups were splitted according to its condition of deposition or erosion point

(Table 2.5). Erosion points were placed in slopes of four folds higher than sediment points. Bulk density increased near 20% in deposition points which could be attained to a higher soil compaction of the cereal. Almost no differences in texture appeared, although a trend to increase silt and reduce clay in deposition points was found. This fact evidences that the finest fractions of soil (clay) have been deposited beyond the barley plot, and thus, they have been lost, while there is an enrichment in silt fraction in the cereal plot. This enrichment in silt and sand is the reason of the increase in bulk density in deposition points regarding erosion points as was described in 3.3 section of this paper. The reduction in fine fractions in deposition points is due to clay is mainly eroded under high-intensity events (Martinez-Mena *et al.* 2002). Therefore, a high rate of the sediments delivery is formed by these fine-fractions, which migrate away from the sedimentation study area.

Table 2.5. *Mean and standard deviation of physical and chemical soil properties for erosion or deposition points and the p-value of the ANOVA. Bulk density (B); Coarse elements (CE); Organic carbon (OC); Total nitrogen (N); Available phosphorus (P).*

Soil properties	Erosion points (N=8)	Deposition points (N=5)	p-value
Slope (%)	12.3±4.2	3.0±2.0	0.01
B (g cm^{-3})	1.33±0.11	1.57±0.09	0.01
Clay (%)	13.3±2.1	9.0±5.1	0.05
Silt (%)	31.7±10.7	46.7±16.9	0.07
Sand (%)	55.0±9.0	44.3±12.2	0.10
CE (%)	6.7±2.5	7.7±2.3	0.48
pH	7.7±0.1	7.7±0.2	0.64
Carbonates (%)	7.1±3.3	18.7±4.1	0.00
OC (%)	0.35±0.13	0.81±0.08	0.00
N (%)	0.07±0.02	0.09±0.02	0.10
P (ppm)	6.8±0.7	54.0±25.6	0.00
Ca (cmol kg^{-1})	125.8±8.7	81.8±29.9	0.00
Mg (cmol kg^{-1})	0.09±0.02	1.54±1.24	0.01
Na (cmol kg^{-1})	1.12±0.07	0.19±0.11	0.17
K (cmol kg^{-1})	0.31±0.11	0.89±0.19	0.00

The content on carbonates, and organic matter was double in deposition points than in erosion points due to a sediment enrichment in both compounds. Magnesium and potassium content also was double in deposition points, while the increase in phosphorus was sevenfold higher possibly due to the inorganic fertilization of the cereal crop. A mobilization of organic matter and some nutrients with sediments has been described by other authors (Gómez *et al.* 2009a, Bienes *et al.* 2010, Martinez-Mena *et al.* 2012, García-Díaz *et al.* 2017). This impoverishment in nutrients of erosion areas lead to fertilization problems in the crops, being chemically fertilized in order to maintain the production. The fertilizers in this upper plots, mainly nitrogen compounds, are adsorbed onto soil particles and produce eutrophication in water bodies (Mullan 2013). Olive groves in this region are scarcely fertilized so the impoverishment in nutrients will redound in loss of yield.

Lower content in calcium was detected in deposition points than in erosion points. This fact is due to the emergence of C-horizon in the eroded area by the erosion of Ap-horizon. C-horizon is saturated in calcium sulphate and carbonate that arrived at the surface by tilling, contributing to increase calcium content. Similar results were described by Switoniak (2014) who highlighted that the evidence of erosion from the topsoils was mainly the decrease in the content of organic matter and calcium carbonate enrichment. The white colour of the upper part of the microcatchment is due to this emergence of C-horizon, whilst the white colour of the flat part is due to silt particles deposition.

4. Conclusions

Conversion models using ^{137}Cs measures has been tested as an accurate tool to estimate soil loss at medium term at microcatchment scale in gypsiferous soil. This technique encompasses all the mechanisms in soil loss (splash, interrill, rill and gully) and the larger time-scale allow the occurrence of normal and extreme rainfall events. For both reasons soil loss estimations are more actual with ^{137}Cs method than that obtained by other methods as erosion plots or rainfall simulations. Soil loss in central Spain is larger than

the rates described in previous studies by the use of erosion plots, that suffer from the constrains of upscaling and the short-time considered.

Net soil loss rates obtained by different models based on ^{137}Cs were similar, ranged between 15.5 and 19.5 Mg ha^{-1} yr^{-1}. This soil loss is clearly unsustainable, with an erosion rate greater than soil formation and a significant nutrient and organic carbon loss in eroded areas. Conventional agriculture practises should be shifted in order to protect the soil avoiding that sediments arrive to roads or reservoirs with the economic and environmental consequences.

Acknowledgements

We wish to acknowledge funding provided by project FP12-CVO from the Institute for Rural, Agricultural and Food Research and Development of Madrid-IMIDRA and project AGRISOST-CM (S2013/ABI-2717) from the Comunidad de Madrid and co-funded by the ESIF.

Capítulo 3

Pérdida de suelo en un olivar del centro de España con tratamiento de cubiertas vegetales y laboreo

Este capítulo reproduce íntegramente el texto del siguiente manuscrito:

Blanca Sastre, Celia Barbero-Sierra, Ramón Bienes, Maria Jose Marques, Andrés García-Díaz. Soil loss in an olive grove in Central Spain under cover crops and tillage treatments, and farmer perceptions. *Journal of Soils and Sediments*, 17: 876-888. 2017. doi: 10.1007/s11368-016-1589-9

(ver Anexo 1)

Resumen

La erosión del suelo es una amenaza a la sostenibilidad de la producción de los cultivos en todo el mundo, y los olivares es donde se alcanzan las mayores tasas de erosión. Este estudio tiene por objeto (1) evaluar las pérdidas de suelo por erosión hídrica en microparcelas (1 m^2) baja eventos de lluvia natural en un olivar manejado con laboreo y 3 tipos diferentes de cubiertas vegetales; (2) determinar los principales factores climáticos en la pérdida de suelo y el transporte selectivo; y (3) entrevistar a los agricultores sobres su disponibilidad a emplear cubiertas vegetales.

Durante unos cuatro años hidrológicos (2010 a 2014) se han evaluado los tratamientos de laboreo y 3 cubiertas vegetales en un olivar en pendiente en el área Mediterránea, bajo clima semiárido y suelo yesífero. Los tratamientos fueron: laboreo (una vez al año), dos cubiertas anuales (cebada y leguminosas) y una cubierta permanente (*Brachypodium distachyon*). Después de cada lluvia se recogieron los sedimentos, se secaron y pesaron. Se registraron los datos de cada una de esas lluvias y se determinó la cobertura del suelo. Se midió el contenido en carbono orgánico (OC) y la textura de los sedimentos del tratamiento laboreo para estudiar el transporte selectivo. Se entrevistó a agricultores locales respecto a su conocimiento sobre los factores biofísicos que afectaban a la conservación del suelo, sus prácticas de manejo y su disponibilidad a adoptar prácticas sostenibles de manejo del territorio, como las cubiertas vegetales.

El tratamiento de laboreo fue el que produjo las mayores pérdidas de suelo (6.8 t ha^{-1} $año^{-1}$). Las cubiertas vegetales redujeron significativamente las pérdidas de suelo: un 40 % las leguminosas, un 60 % la cebada y hasta un 80 % de reducción la cubierta permanente (1.4 t ha^{-1} $año^{-1}$). Las pérdidas de suelo dependieron principalmente de la cobertura del suelo y de la energía cinética de los eventos lluviosos. Una cobertura de suelo superior al 40 % en otoño y primavera fue esencial para limitar la pérdida de suelo con lluvias fuertes. Los sedimentos movilizados se enriquecieron 2.4 veces en OC y 1.6 veces en la fracción arcillosa. A pesar de los bien conocidos beneficios de las cubiertas vegetales en la conservación del suelo, los agricultores locales no las utilizan. Se ha detectado una falta de educación ambiental y de preocupación por el medio ambiente.

El laboreo de los olivares ha producido tasas de pérdida de suelo insostenibles, mientras que la cubierta permanente ha demostrado una alta eficiencia. Los suelos yesíferos son vulnerables a los procesos de erosión hídrica si no se protegen con vegetación. Los agricultores deberían adoptar prácticas de protección del suelo a medida durante la primavera y el otoño, cuando las pérdidas de suelo son mayores. La realidad es que muy pocos agricultores han cambiado sus técnicas de manejo y las cubiertas vegetales son raras en el centro de España debido a que los agricultores son reticentes al cambio.

Palabras clave: cubiertas vegetales, erosión, *Olea europaea*, prácticas SLM, aproximación sociológica.

Abstract

Soil erosion is a threat for the sustainability of the groves production all over the world, and olive groves are where the highest erosion is achieved. This study aimed to (1) evaluate soil loss from water erosion in microplots ($1m^2$) under natural rainfall events in an olive grove managed with tillage and 3 different cover crops; (2) determine the main climatic factors on soil loss and selective transportation; and (3) survey the willingness of local farmers to adopt cover crops.

Over four hydrological years (2010 to 2014), tillage and 3 cover crop treatments have been assessed in a sloping olive grove in the Mediterranean area, in a semiarid climate and Gypsiferous soil. The treatments were: tillage (once a year), two annual covers (barley and legumes) and a permanent cover (*Brachypodium distachyon*). Soil loss was collected after each rainfall event, dried and weighted. Rainfall data was recorded and soil cover was determined. Organic carbon (OC) and texture were measured for sediments of tillage treatment to study the selective transportation. Local farmers were polled regarding their knowledge of the biophysical factors that affect soil conservation, their management practices, and their willingness to adopt sustainable land management practices as cover crops.

The tillage treatment exhibited the highest soil loss (6.8 $tha^{-1}year^{-1}$). Cover crops significantly reduced soil loss: 40% for legumes, 60% for barley and permanent cover led to an 80% decrease (1.4 $tha^{-1}year^{-1}$). The soil loss depends mainly on the soil cover and kinetic energy of rainfall events. Vegetation cover higher than 40% in autumn and spring was essential to limiting soil loss, even under heavy events. Mobilised sediments were enriched 2.4 times in OC and 1.6 in the clay fraction. In spite of the well-known benefits of cover crops in soil conservation, local farmers do not use them. A lack of environmental education and awareness has been detected.

Tillage in olive groves produced unsustainable rates of soil loss, while permanent cover demonstrated high efficiency. Gypsiferous soils are vulnerable to water erosion processes if they are not protected by vegetation. Farmers should adopt tailored soil cover practices during spring and autumn, when the soil loss is higher. Reality is that are very few farmers

who have changed soil management techniques, and the cover crops in olive groves are rare in Central Spain because farmers are reluctant to change.

Keywords Cover crops, Erosion, *Olea europea*, SLM practices Social approach

1. Introduction

Soil erosion is a worldwide concern (Gessesse *et al.* 2015, Karamesouti *et al.* 2015, Ligonja & Shrestha 2015, Ochoa *et al.* 2016) and one of the most important land degradation driving processes in Mediterranean areas (EEA 2015, Panagos *et al.* 2015a). Although forest lands used to have sustainable soil erosion rates, the impact of agriculture results in high and non-tolerable soil losses (Verheijen *et al.* 2009, Zema *et al.* 2016). Vineyards, olive, citrus, persimmon and apricot plantations are seeing as the source of sediments due to the intense tilling, the use of herbicides and the lack of vegetation cover (Keesstra *et al.* 2016, Prosdocimi *et al.* 2016a, Rodrigo Comino *et al.* 2016). Soil erosion is even worse in soils with low concentrations of organic matter and weak structure (Panagos *et al.* 2014); these erodible soils are common in Spanish olive groves (Taguas & Gómez 2015).

Spain is the major olive producer worldwide with a totalarea of 2.5 × 106 ha, primarily in Andalusia (Southern Spain), from a total of 10.3 × 106 ha in the world (FAOSTAT 2015). There are more than 28,000 ha of olive groves in the Madrid region (MAGRAMA 2013). Although this area is not substantial in relation to the total surface area of Spanish olive groves, it is considered important in the southern section of Madrid. Olives occupy 20 % of the agricultural area of the region, being second in agriculture extension after winter cereals (IECM 2013).

As with other Spanish traditional olive groves, the Madrid olive trees are grown in sloping areas on poor and shallow soils (Gómez *et al.* 2009b). Ninety-eight percent of the olive groves in the region are rainfed, 50 % are planted at low densities (less than 100 trees ha^{-1}) and 80 % are usually tilled to reduce weed competition for water (MAGRAMA 2013). In this semiarid area, water availability is a major flaw, production limitations have been found for vineyards in this región (Ruiz-Colmenero *et al.* 2011) and the effects of cover crops in olive grove production are considered in an on-going Project (Sastre *et al.* in preparation). Conventional practices involving tillage result in a large area of bare soil that is prone to erosion processes.

Since the 1990s, several studies have demonstrated the efficiency of cover crops in comparison with conventional tillage in olive groves to reduce soil

erosion and improve water storage and physical properties. Table 3.1 summarises soil loss results of several studies under different management: conventional tillage and cover crops. Different studies stated that high-energy storms determined the annual soil loss (e.g. (Jacinthe *et al.* 2004, Bienes & Marques 2008, Martinez-Mena *et al.* 2012, Taguas *et al.* 2013). Soil loss also depends on soil cover; for example, (Marques *et al.* 2008) found that when cover exceeds 60 %, rainfall erosivity declined drastically. When linked to the sediments generated by water erosion, certain nutrients and types of organic matter are also lost according to the study conditions (e.g. (Bienes *et al.* 2010, Martinez-Mena *et al.* 2012).

In Andalusia, cover crops in olive groves appear to be accepted by farmers (Franco & Calatrava-Leyva 2006, Calatrava-Leyva *et al.* 2007). In spite of the benefits of cover crops in soil as have been verified in the abovementioned studies and also by some studies in vineyards (Ruiz-Colmenero *et al.* 2013), this is not an extended sustainable land management (SLM) practice among the land users of Central Spain due to the risk of competition for water and nutrient resources (Celette *et al.* 2008, Gómez *et al.* 2009a, Alcántara *et al.* 2011). In the few cases that cover crops have been adopted, the decision is related to economic and labour savings in the short term instead of environmental concerns (Calatrava-Leyva *et al.* 2007). This fact reveals the need to strengthen environmental education and SLM capacitation in the region. On this matter, the agrarian extension services of the area play an important role in the dissemination of benefits and constraints about cover crops.

Cover crops were tested in a trial performed in a sloping rainfed olive grove under semiarid conditions on a degraded Haplic Gypsisol. The study plot is located in the shire with most olive groves of Madrid Region (IECM 2013), under representative edaphoclimatic conditions. Due to the extreme climatic conditions that occur periodically in the area, the adoption of cover crops can be controversial; therefore, possibilities of adoption are examined in the present study. It is hypothesised that cover crops can reduce soil loss mainly under high-intensity rainfall events and that the most effective cover crop would be the permanent one.

Table 3.1. List of erosion assessments carried out in olive groves (CT: Conventional tillage; CC: Cover crops).

Authors (year)	Country	Cover crop type	Soil type	Slope (%)	Soil texture	Total rainfall (mm year^{-1})	Soil loss (t ha^{-1} yr^{-1})	
							CT	CC
Fleskens and Stroosnijder (2007)	Portugal	spontaneous	nd	18	sandy-loam	1000*	3.3	0.1
	Italy	spontaneous	nd	11-38	clay-loam	1000*	0.5-4.45	0.82-1.94
	Italy	permanent	nd	32	sandy-clay	1000*	0.2	≈0
	Spain	spontaneous	Inceptisols and Aridisols	nd	nd	1000*	44	10
Duran-Zuazo *et al.*	Spain	barley	Typic Xerorthent	30	loam	383	17.3	5. 0
Pastor (2008)	Spain	cereal	nd	moderate	nd	simulated rainfall	10	≈0
Gómez *et al.* (2009a)	Spain	*Lolium* sp	Petrocalcic Palexeralf	11	sandy loam	576	19.4	0.4
Gómez *et al.* (2009b)	Spain	Barley	Typic Haploxerept	13.4	heavy clay soil	577	2.9	0.8
Gómez *et al.* (2011)	Spain	seasonal grass	nd	4	clay loam	550	1.3	0.04
Espejo-Pérez *et al.* (2013)	Spain	spontaneous	Calcic Haploxerept	17	clay loam	689+	16.8+	11.8+
		spontaneous	Calcic Haploxerept	18	loam	834+	31.6+	9+
		spontaneous	Ruptic Xerorthent	18	silt loam	1016+	42.3+	11.6+
		spontaneous	Typic Calcixerept	7	silty clay loam	673+	36.6+	13.5+
		spontaneous	Typic Haploxerert	18	clay loam	628+	99.3+	32.9+
		spontaneous	Typic Xerochrept	6	loam	496+	75.1+	20.5+
		spontaneous	Typic Xeropsamment	8	loam	770+	89.1+	61.6+
		spontaneous	Typic Xeropsamment	9	clay loam	770+	86.9+	21.3+
Kairis *et al.* (2013)	Greece	spontaneous	Calcaric Cambisol	17	clay loam	512	0.1-0.4	0.01-0.05
Marquez-Garcia *et al.* (2013)	Spain	spontaneous	Calcic Haplowerept	15.6	clay-loam	500	1.3	0.6
		spontaneous	Ruptic-Lithict Xerorthent	21.6	silty-loam	565	2.1	0.2
		sown	Calci Haploxerept	18.6	clay-loam	416	8.2	1.4
		spontaneous	Typic Calcixerept	6.2	loam	501	2.5	0.3
		spontaneous	Typic Haploxerert	8.7	clay-loam	535	3.7	0.3
Palese *et al.* (2015)	Italy	spontaneous grasses	Haplic Calcisol	0-16	sandy loam	simulated rainfall	0.005+	≈0+

2. Material and methods

2.1. Study area

This study was performed in an experimental olive grove (Olea europaea L.) located in Central Spain, in southern Madrid (40° 4′ 21″ N, 3° 31′ 11″ W). The average elevation is 540 m.a.s.l., and the slope ranges from 9 to 12 %. The soil is classified as a Haplic Gypsisol (IUSS Working Group WRB 2014), with a xeric moisture regime. This soil has a high silt concentration (29 %), and it is low in organic carbon (0.62 %) and clay (12 %). The climate is semiarid Mediterranean, with long hot summers (quite often above 35 °C in July and August) and cold winters (2.7 °C on average in December). The average annual temperature is 13.6 °C. The annual precipitation is approximately 390 mm with high inter and intraannual variability (Elías-Castillo & Gimenez Ortiz 1965, Urbano 1992). During the last 17 years, the total precipitation has strongly decreased (40 %) in comparison with a previous period (1933–1969), and at the same time, rainfall intensity increased (60 %) in the study area (García-Díaz *et al.* 2015).

The olive plantation was established in 2004 with trees in 6 × 7 m spacings, with an area of approximately 3 ha. The cultivar is Cornicabra, the most common in Central Spain (Rallo *et al.* 2005). The average tree size measured with a surveying rod in 10 olive trees was 1.9 m high and 2.8 m in crown diameter. The crown projection was calculated using the ellipse model and measuring two diameters: máximum projection axis and its perpendicular axis; thus, the soil Surface covered by the tree's crown is close to 8 %. Before this study, the olive grove was managed by tillage (using a chisel up to 0.30 m deep, in spring and autumn) to decrease weed competition, and it was grown in rainfed conditions. The study started in autumn (November) 2010 and lasted until October 2014.

There is an automatic weather station in the olive grove to record the temperature, rainfall amount, relative humidity, solar radiation, wind speed and direction and atmospheric pressure every 10 min. For each rainfall event, the following measures were determined: total rainfall amount (P), máximum 15-min rainfall intensity (I15), maximum 30-min rainfall intensity (I30), maximum hourly rainfall intensity (I), storm kinetic energy (KE) and

rainfall erosivity (R). The KE and R were calculated as follows (Wischmeier & Smith 1978):

(Eq. 3.1.) $$KE\ MJ\ ha^{-1} = 0.119 + 0.0873 \times Log_{10} I$$

(Eq. 3.2.) $$R\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1} = KE \times I_{30}$$

The classification of rainfall events based on KE data from (Jacinthe *et al.* 2004) was used. Thus, the rainfall events were divided into (i) class 1, in which KE < 2 MJ ha^{-1} are low amount and low intensity; (ii) class 2, in which 2 < KE < 4 MJ ha^{-1} are moderate-to-high amount and moderate intensity; and (iii) class 3, for which KE > 4 MJ ha^{-1} are high amount and high-intensity storms. The seasons were considered as follows: spring, from 21 March to 21 June; summer, from 21 June to 21 September; autumn, from 21 September to 21 December; and winter, from 21 December to 21 March.

2.2. Olive grove management

In November 2010, the whole area was ploughed with a chisel to a depth of approximately 0.30 m to follow the traditional management practice in the area. The tillage was performed in 6-m-wide inter-rows, at the centre of the rows between the olive trees (Fig. 3.1). Each treatment was performed in three consecutive inter-rows. The treatments consisted of the following: two annual covers, (1) *Hordeum vulgare* L., barley (HOR) that was seeded each autumn at 70 kg ha^{-1}, and (2) legume (LEG), sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.) that was seeded each year between 2010 and 2013 (42 kg ha^{-1}). However, because of a progressive decline in the soil cover in dry seasons, the sainfoin was replaced in the last year by another leguminous plant, namely bitter vetch (*Vicia ervilia* Willd.), at 75 kg ha^{-1}. The seeding took place at the same time as that of HOR. (3) *Brachypodium distachyon* (BRA) treatment consists of permanent grass cover with purple false brome (*B. distachyon* L. P. Beauv.) at 40 kg ha^{-1}. *B. distachyon* is a grass species native to southern Europe, northern Africa and southwestern Asia, which sprouts in early spring, being already mature and dry by late June, at which point it is self-sowed and sprouted spontaneously again the following autumn. (4) Control (CON) consisted of one passper year with a chisel at 0.15–0.20 m deep in mid-November, to control weeds. Cover crops were seeded (the annual cover crops were seeded once a year and purple false brome was

seeded once during the study period) with a grain drill that had harrow tines and without fertilisation. To maintain bare soil along the olive tree line, a contact herbicide (glyphosate) was applied to the soil only in the rows of olive trees twice per year. As a result, 1-m width along the line was bare to facilitate olive harvesting. All the treatments were mowed once in the spring (during the first fortnight of May), except in 2013, when the vegetation was mowed twice (the second cut was by the end of May) due to a high vegetation growth resulting from the abundant rains of that spring. Plant debris was left spread on the surface.

Cover crop and soil variables were studied in microplots established at the centre of the olive rows. Microplots are metal sheet-bounded plots that cover 1 m^2 (0.5-m wide and 2-m long; Fig. 3.1). Three microplots were set up per treatment (4 treatments × 3 plots = 12 in total).

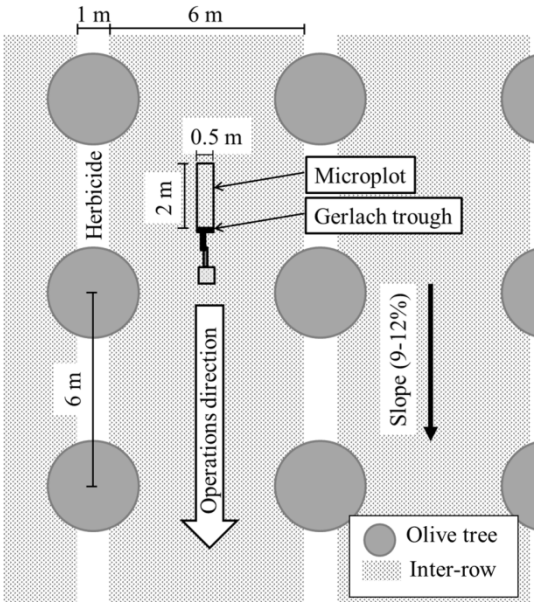


Figure 3.1. *Layout of olive trees positions, primary operations and microplot locations in the olive grove.*

2.3. Soil cover

The soil cover in each microplot was determined bi-monthly with 25-cm × 25-cm quadrats. Cover was estimated by six trained observers, and the average value of the six observations was obtained. The results of this method are similar to those obtained by García-Estríngana *et al.* (2005)

employing digital image analysis of coloured orthogonal photos of vegetation cover and are cost and time effective.

2.4. Sediment analysis

A Gerlach trough (Gerlach 1967) was placed at the base of each microplot to collect sediment yield. Sediments (from January 2011 to September 2014) were collected from the Gerlach trough after each rainfall event. The sediments were oven-dried at 105 °C and weighed.

To study the particle size-selective transport, we assessed the texture composition and organic carbon (OC) from 4 points along the Ap1 horizon (approximately 0.12 m deep) in the study area (hereafter known as reference soil) at the beginning of the study. The samples were taken randomly in the olive grove, in locations near the microplots. The texture and OC from ten sediment samples of the CON treatment were also analysed. This treatment was chosen because it provided sufficient sediment to carry the analysis. The selected samples were set after mixing three sediment replicates. Five of these samples were produced by moderate-intensity rainfall events ($I < 20 mm h^{-1}$) according to the classification by Porta *et al.* (1999), and the other five came from high-intensity events ($I > 20 mm\ h^{-1}$). The OC analysis was made for eight samples because there was not enough soil in the other two.

The texture was assessed by Robinson pipette method (MAPA 1994), and the OC was determined by using the wet chemical oxidation method (Walkley & Black 1934).

2.5. Social approach

One hundred nineteen farmers were polled regarding their knowledge of the biophysical factors that affect soil conservation, their management practices and their willingness to adopt SLM practices as cover crops.

The surveys were performed from May to September 2014. A total of 97 farmers were randomly contacted through three agricultural offices in the study area, the south-eastern of Madrid region. The sample was completed with 22 interviews by following a snowball approach (Faugier & Sargeant 1997). From these farmers, 83 were olive growers.

The questions in the structured questionnaire (see Annex 1: Electronic Supplementary Material, Anexo 2) were organised in the following three primary groups: (i) basic characteristics, the study level, age, primary activity and plot size; (ii) knowledge about land degradation; and (iii) information about the farmer's own land management practices.

2.6. Statistical procedures

Statistical procedures were performed with the software package SPSS 19 Inc. for Windows. Data were log-transformed before parametric testing. ANOVA analyses were performed for the soil parameters to assess the differences between treatments, seasons, sediments and reference soil. Tukey's test ($p < 0.05$) was used to establish significant differences between groups. When the transformations did not work, a Games-Howell non-parametric test was conducted. Spearman's correlations were employed to calculate the correlation between the measured variables. A linear regression model was established with transformed data to determine which variables best explained soil erosion.

3. Results

3.1. Rainfall characteristics

From November 2010 to October 2014, the annual average precipitation was 283 ± 40 mm year^{-1}. These years were quite similar in terms of monthly temperatures, but not precipitation, which was highly irregular between months and years, as expected in a Mediterranean climate. The driest cropping season was 2011/2012 (237 mm year^{-1}), whilst 2012/2013 was the wettest, reaching 328 mm year^{-1}. There were great variations in rainfall amounts between spring (49 to 162 mm) and autumn seasons (39 to 155 mm). Summers were quite similar with low rainfall amounts (3 to 22 mm).

Fifty rainfall events were recorded between January 2011 and September 2014. Table 3.2 shows the primary characteristics of these events. There were significant differences between seasons for P, I_{15} and KE. Rainfalls in summer were significantly lower than the rest of seasons. Summer also had the lowest KE and R values, although not statistically different from all other

seasons. Seventeen out of the 50 recorded events were in KE class 1 (KE ≤ 2 MJ ha^{-1}), 22 of class 2 (2 < KE ≤ 4 MJ ha^{-1}) and 11 in class 3 (KE > 4 MJ ha^{-1}).

Table 3.2. *Average and standard deviation (SD) of the primary characteristics of rainfall events: number of events (N), rainfall amount (P), maximum 15-minute rainfall intensity (I_{15}), maximum 30-minute rainfall intensity (I_{30}), maximum hourly rainfall intensity (I), kinetic energy (KE) and rainfall erosivity (R).*

	Average	Season			
		Autumn	Winter	Spring	Summer
N	50	14	16	16	4
P (mm)	22±15	25±17 b	21±14 b	24±15 b	8±4 a
I_{15} (mm h^{-1})	8.8±6.7	11.1±10.4 ab	5.7±2.7 a	10.0±5.0 b	8.9±4.3 ab
I_{30} (mm h^{-1})	7.1±4.9	8.9±7.8 a	5.2±2.1 a	7.0±3.2 a	8.7±3.4 a
I (mm h^{-1})	11.3±9.1	13.1±14.4 a	7.8±3.0 a	13.3±7.5 a	11.1±6.5 a
KE (MJ ha^{-1})	3.3±2.5	3.4±3.2 ab	3.2±2.1 ab	3.9±2.4 b	1.1±0.6 a
R (MJ mm ha^{-1} h^{-1})	16.7±22.5	23.6±37.4 a	11.2±9.7 a	17.9±15.9 a	5.1±5.0 a

Different lowercase letters mean differences between seasons at p<0.05.

3.2. Soil cover

Figure 3.2 shows the evolution of soil cover percentages for the four treatments. It shows a sawtooth-type evolution from tillage and mowing actions. Once installed, the BRA kept over 40%of the soil covered despite the mowing. CONalways had less than 20 % cover, but the annual crops exhibited different behaviour during different cropping seasons. In 2012/2013, the sainfoin (LEG) cover increased quickly because of a rainy spring, and during the following season, bitter vetch (LEG) worked better than sainfoin during the driest period, reaching 40 % cover during the spring. HOR increased the soil cover during the rainy spring (2012/2013), and for the driest one, the cover was only slightly more than 20 %. After the summer, annual cover crops reduced the soil cover, leaving only stubbles and plant debris.

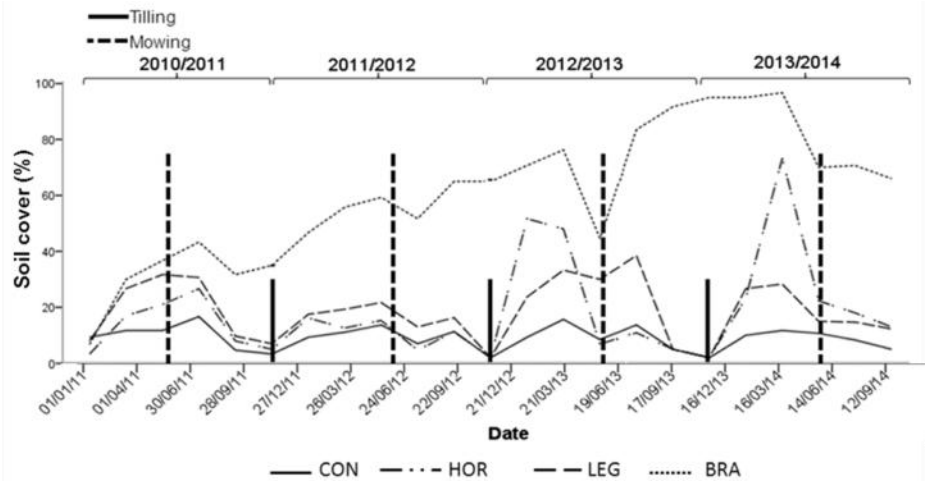


Figure 3.2. *Soil cover (%) per treatment (CON: control, HOR: barley, LEG: legume and BRA: B. distachyon) over the study time. Tilling and mowing operations are indicated.*

3.3. Soil loss

The annual soil loss caused by water erosion was 6.81, 4.00, 2.74 and 1.36 t ha^{-1} $year^{-1}$ for CON, LEG, HOR and BRA, respectively (Table 3.3). Soil loss from BRA was significantly lower than loss from CON and LEG, HOR was intermediate. Regarding the soil loss per event, CON had the highest values, followed by the annual cover crops; BRA was the treatment that best controlled the soil loss per rainfall event. LEG had a similar behaviour to that of HOR.

Table 3.3. *Average and standard deviation (SD) of soil loss for the treatments control (CON), barley (HOR), legume (LEG) and B. distachyon (BRA); the reduction percentage of soil loss compared with the control treatment; and the average and SD of soil loss per event. N is the number of cases (4 cropping seasons x 3 repetitions).*

Treatment	N	Annual soil loss (t ha^{-1} $year^{-1}$)	Reduction percentage of soil loss respect to CON (%)	N	Soil loss per event (g m^{-2})
CON	12	6.81 ± 6.49 b	-	150	51.1 ± 82.5 c
HOR	12	2.74 ± 2.53 ab	59.77	150	21.1 ± 44.1 b
LEG	12	4.00 ± 2.58 b	41.26	150	31.1 ± 42.0 b
BRA	12	1.36 ± 1.58 a	80.03	150	10.0 ± 24.0 a

Different lowercase letters mean differences between treatments at p<0.05.

Figure 3.3 shows the cumulative soil loss for the study period for the different treatments as well as the precipitation per event. The total soil loss over the study period from the CON treatment was 25.8 t ha^{-1};15.5 t ha^{-1} from LEG; 10.6 t ha^{-1} from HOR and 4.7 t ha^{-1} from BRA. Each time a heavy rainfall occurred, soil loss dramatically increased, and it was more pronounced in the CON treatment and in the first year. From the beginning of the study, the soil loss rate of CON was higher than that of the cover crops. The CON was still increasing at the same speed during the second cropping season, and the BRAwas separated from annual cover crops. During the 2012/2013 season, when rainfall events were more intense, the behaviour of the CON and BRA treatments did not change. However, LEG began gaining distance from HOR a year before the change in LEG species, despite having a similar cover percentage. For the last season, the BRA almost fully controlled the soil erosion.

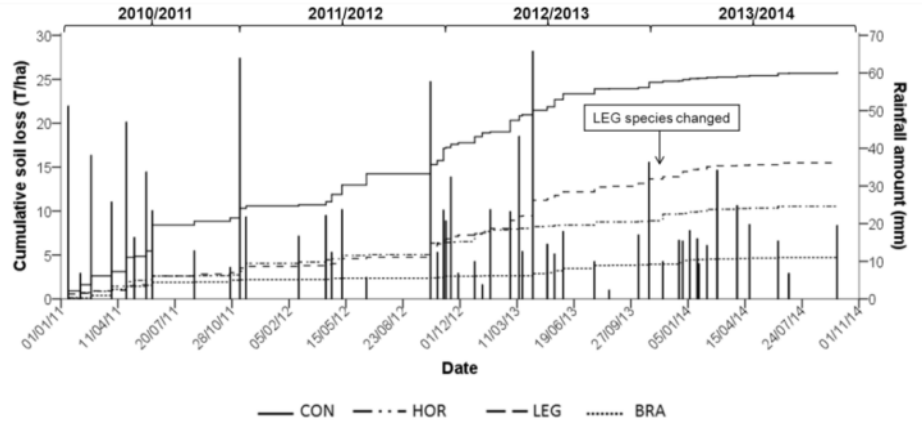


Figure 3.3. Cumulative soil loss (g m^{-2}) per treatment (CON: control, HOR: barley, LEG: legume and BRA: *B. distachyon*) and the rainfall amount (mm) registered per event in the columns.

In accounting for the average soil loss per season, the soil loss during the spring was higher than that of the summer (Table 3.4) because of that season's more intense and erosive rainfall events (Table 3.2). However, when looking at seasonal differences within treatments, CON was the only one with significant differences between spring and summer. The other treatments did not experience significant differences between seasons. Regarding the differences between treatments within seasons, BRA

significantly reduced soil loss with respect to CON and LEG in autumn and winter, whilst in spring, CON had the highest soil loss, significantly different from BRA and HOR.

Table 3.4. *Average and standard deviation (SD) of soil loss per event (g m^{-2}) during the different seasons for the treatments control (CON), barley (HOR), legume (LEG) and B. distachyon (BRA). Number of rainfall events in brackets.*

Treatment	Seasons Autumn (14)	Winter (16)	Spring (16)	Summer (4)
CON	45.1±42.7 ab B	39.8±41.2 ab B	75.7±73.0 b B	25.7±28.0 a A
HOR	27.2±41.4 a AB	19.3±23.5 a AB	20.3±17.4 a A	10.4±17.1 a A
LEG	33.8±30.4 a B	26.5±24.8 a B	35.8±43.3 a AB	21.3±23.1 a A
BRA	5.5±6.9 a A	5.7±8.6 a A	16.4±18.2 a A	10.1±16.2 a A
Mean	27.9±35.7 ab	22.8±29.2 ab	37.1±49.3 b	16.9±20.6 a

Different lowercase letters in each row mean differences between seasons. Different uppercase letters in each column mean differences between treatments at p<0.05.

A correlation among soil losses and the rainfall event characteristics along with the cover percentage in the microplots has been conducted (data not shown). Strong correlations ($p < 0.01$) were found between all the analysed variables and the soil loss. The best correlated variable with soil loss was the cover, with a negative relation ($r = -0.48$). All the others have a positive relation: 0.25 for P, 0.27 for I15, 0.18 for I30, 0.26 for I, 0.21 for KE and 0.23 for R.

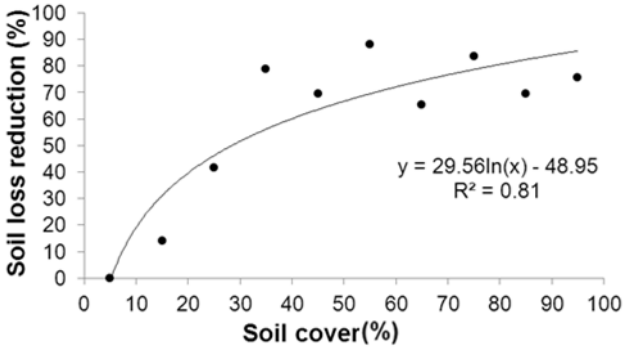


Figure 3.4. *Soil loss reduction compared with covered soil.*

A statistical linear modelling analysis was performed by employing the studied variables and the transformed soil loss data. A model (Eq. 3.3) with an R^2 coefficient of 0.293 ($F = 42.178$, $df = 2$, $p < 0.001$) was obtained. Only two of the seven studied variables had significance in the model: cover was the most important predictor, with a weight of 0.76, and KE at 0.24. The rest

of climatic variables did not help to explain the dependent variable because of their strong correlation with KE.

(Eq. 3.3) $$Soil\ loss\ =\ e^{2{,}865-0{,}023*Coverage+0{,}141*KE}-1$$

Because of the importance of the two variables in explaining soil loss, a more detailed analysis was carried out.

As shown in Fig. 3.4, a good adjustment with a logarithmic equation between soil loss reduction and ten categories of cover was found (R^2 = 0.81).When more soil is covered, less soil is lost. This relationship is stronger with low percentages of covered soil, in the first half of the curve.

The KE was the other relevant variable in relation to soil loss in the regression model. A linear relationship was found between the cumulative soil loss and the cumulative KE per treatment (Fig. 3.5). A high correlation was found in every case (R^2 > 0.91) with a higher slope for CON treatment, followed by LEG and HOR, and BRA had the smallest one, meaning that it had the lowest soil loss rate in function of KE.

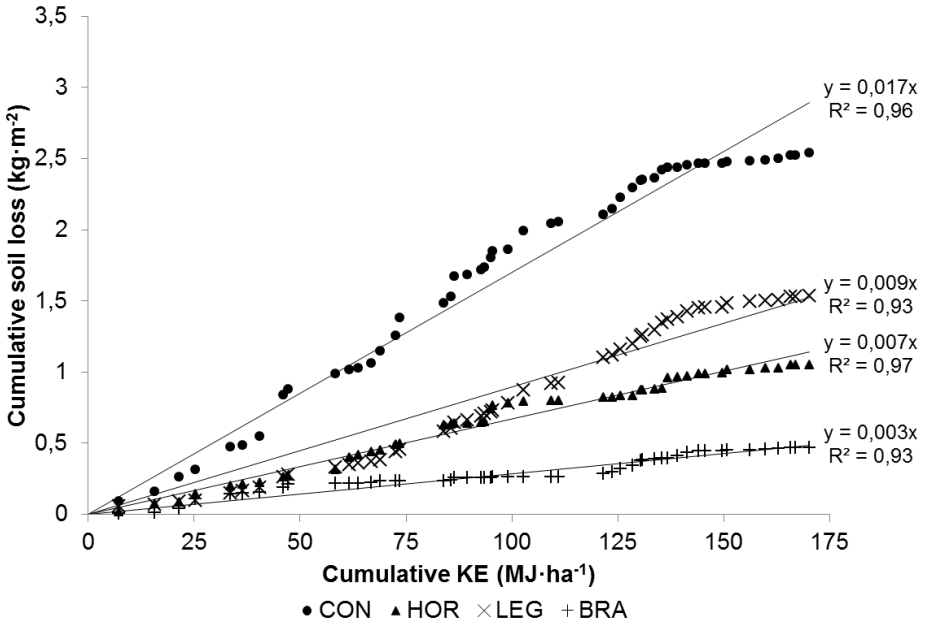


Figure 3.5. Linear regression between cumulative KE and cumulative soil loss for the different treatments (CON: control, HOR: barley, LEG: legume and BRA: *B. distachyon*).

Only 11 of 50 recorded rainfall events (22 %) were highenergy events (KE > 4 MJ ha^{-1}), producing 30–42 % of the total mobilised sediments, depending on the treatment (Table 3.5). The average soil loss values within treatments with respect to KE class 1 and class 2 events were quite similar, whilst class 3 had the highest values. The only treatments for which there were significant differences ($p < 0.05$) between class 3 and the other classes were CON and LEG.

With regards to soil loss between treatments, the BRA was the best treatment, reducing the soil loss in each class of KE (Table 3.5) and controlling almost all the soil loss. For classes 1 and 2, soil loss was significantly lower ($p < 0.05$) for BRA regarding LEG and CON treatments. BRA also was the best treatment controlling soil loss under class 3 events, significantly better than LEG and CON. In this case, there were also significant differences ($p < 0.05$) between HOR and CON.

Table 3.5. *Cumulative soil loss for the treatments control (CON), barley (HOR), legume (LEG) and B. distachyon (BRA).; the percentage of soil loss relative to the total soil loss within the treatment; the average and standard deviation (SD) of soil loss per event for each management and rainfall kinetic energy (class 1: KE≤2 MJ ha^{-1}, class 2: 2<KE≤4 MJ ha^{-1} or class 3: KE>4 MJ ha^{-1}). Number of cases in brackets*

Treatment	Rainfall kinetic energy	Cumulative soil loss (g m^{-2})	Percentage of soil loss (%)	Average and SD of soil loss per event (g m^{-2})
CON	Class 1 (51)	763.0	29	44.9±42.9 b A
	Class 2 (66)	786.5	30	35.7±33.8 b A
	Class 3 (33)	1034.0	40	94.0±81.6 c B
HOR	Class 1 (51)	355.4	34	20.9±28.0 ab A
	Class 2 (66)	364.5	34	16.6±20.7 ab A
	Class 3 (33)	336.3	32	30.6±37.5 ab A
LEG	Class 1 (51)	370.7	24	21.8±16.4 b A
	Class 2 (66)	534.2	34	24.3±21.1 b A
	Class 3 (33)	649.9	42	59.1±52.4 bc B
BRA	Class 1 (51)	108.3	23	6.4±9.3 a A
	Class 2 (66)	219.8	47	10.0±15.9 a A
	Class 3 (33)	143.3	30	13.0±13.2 a A

Different lowercase letters in each column mean differences between treatments within the same rainfall total energy. Different uppercase letters in each column mean differences between rainfall total energy within each treatment at p<0.05.

In Table 3.6, the soil loss is shown within three cover groups that are independent of the treatments, namely low (0–20 %), medium (20–40 %)

and moderate-high (>40 %) for the three classes of rainfall KE. High-energy storms with scarce cover yield the highest rates of soil loss (76.7 g m^{-2} on average). Classes 1 and 2 produced significantly higher rates of soil loss under low cover than when the cover was above 40 %. For class 3 rainfall events, low cover produced significantly more soil loss than medium and moderate-high cover groups. With medium and moderate-high cover, the rainfall events do not seem to generate an increase in soil loss with a higher KE, although there is a trend in the results.

Table 3.6. *Average and standard deviation (SD) of soil loss per event, with the number of cases in brackets (N). Soil cover: low (0-20%), medium (20-40%) and moderate-high (>40%); and the rainfall kinetic energy (class 1: KE≤2 MJ ha^{-1}, class 2: 2<KE≤4 MJ ha^{-1} or class 3: KE>4 MJ ha^{-1})*

Soil covered	Rainfall total energy		
	Class 1	Class 2	Class 3
< 20%	33.9±37.8 (41) a B	28.6±29.1 (42) a B	76.7±69.5 (23) b B
20 – 40%	13.1±14.4 (7) a AB	18.4±17.9 (23) a AB	22.4±23.6 (12) a A
> 40%	7.8±9.6 (20) a A	12.2±21.0 (23) a A	14.5±16.3 (9) a A

Different lowercase letters in each row mean differences between rainfall total energy for the same cover. Different uppercase letters in each column mean differences between covers at p<0.05.

3.4. OC concentration and texture of sediments

The relationship between the OC and the texture of sediments and the primary characteristics of rainfall events were studied by using their degree of correlation (Table 3.7). Significant and positive relations were found for OC and both silt and clay +silt fractions ($p < 0.05$); therefore, the fine fractions and OC were linked. Sand had a negative correlation with I15, I30 and I, whilst fine fractions (silt, clay or both) had a positive correlation with several rainfall properties, primarily with the rainfall intensities. As expected, the OC mobilisation was also related to rainfall intensity, in this case with I and I30 ($p < 0.10$) (Table 3.7).

Table 3.7. *Spearman's correlations between organic carbon (OC) and the soil textural classes (Sand, Silt, Clay and Silt+Clay) of sediments. The rainfall amount (P), maximum intensity in 15 minutes (I_{15}), maximum intensity in 30 minutes (I_{30}), maximum intensity in 1 hour (I), Kinetic Energy (KE), and erosivity (R Factor).*

	OC	Sand (2000-20 µm)	Silt (20-2 µm)	Clay (<2 µm)	Silt+Clay (<20 µm)
OC		-0.700*	0.750*	0.200	0.700*
P	-0.024	-0.055	-0.297	0.527	0.055
I_{15}	0.602	-0.762*	0.470	0.652*	0.762*
I_{30}	0.635†	-0.796**	0.620*	0.450	0.796**
I	0.627†	-0.710*	0.440	0.599†	0.710*
KE	0.190	-0.127	-0.212	0.552†	0.127
R	0.262	-0.491	0.139	0.636*	0.491

** p<0.01; * p<0.05; † p<0.10.

In Table 3.8, the results for the textural fractions and the OC of the sediments were grouped according to the intensity of the event that produced the soil loss. Moderate events have intensities of less than 20 mm h^{-1}, and high-intensity events were between 20 and 50 mm h^{-1}. There is a 40 % increase in the clay concentration in moderate-intensity sediments relative to the reference, and there is a statistically significant increase of 80 % in sediments from high-intensity events. Although there were no significant differences, a decreasing trend in the sand fraction under moderate and high rainfall events appeared.

The OC was 2 and 2.5 times higher in sediments (moderate and high-intensity groups, respectively) than in the original soil. The difference was statistically significant between the reference and high-intensity sediment groups.

Table 3.8. *Average and standard deviation (SD) of textural fractions and OC of the reference soil (Ap_1) and sediments of two groups according to the rainfall intensity, which was moderate 2<I≤20 mm h^{-1} and high intensity 20<I<50 mm h^{-1}. The number of samples is given in the brackets. The rainfall amount (P), maximum intensity in 15 minutes (I_{15}), maximum intensity in 30 minutes (I_{30}), maximum intensity in 1 hour (I), Kinetic Energy (KE), and erosivity (R Factor).*

	Reference soil (Ap_1) (N=4)	Sediments grouped by rainfall intensity	
		Moderate (N=5[1])	High (N=5)
P (mm)		34±12	49±22
I_{15} (mm h^{-1})		6.5±1.7a	21.0±10.3b
I_{30} (mm h^{-1})		5.7±1.5a	13.3±6.5b
I (mm h^{-1})		7.9±2.0a	29.3±12.3b
KE (MJ ha^{-1})		4.8±1.7a	8.5±3.5b
R (MJ mm ha^{-1} h^{-1})		15.0±5.3a	68.5±42.7b
Sand (2000-20 µm) (g kg^{-1}))	5.8±1.1	4.59±1.4	3.8±0.9
Silt (20-2 µm) (g kg^{-1})	2.9±1.4	3.3±1.2	4.0±1.2
Clay (<2 µm) (g kg^{-1})	1.2±0.2 a	1.7±0.6 ab	2.2±0.6 b
Silt+Clay (<20 µm) (g kg^{-1})	4.1±1.2	5.0±1.4	6.2±0.9
OC (%)	0.6±0.1 a	1.3±0.4 ab	1.6±0.4 b

[1]N=5, except for OC that was N=3. *Different lowercase letters in rows mean differences between groups at p<0.05.*

3.5. Farmer perceptions

The number of farmers who participated in the survey represents 10 % of the farmers in this south-eastern county of Madrid, according to the last census with district-level reporting (INE 2002). Table 3.9 shows the different results of the survey. The age of farmers working in that region may be considered high, at an average of 54 years old. The participants highlighted that agriculture is not their primary source of income. They often declare that they have not received any education or training about soils, and most of them continue following family traditions when managing their crops. Nearly all of them (95 %) receive subsidies to support their farming activities. However, the number of subsidies related to soil conservation or ecological practices is below 17 %. Soil management is primarily based on tradition, and the farmers literally practice 'what has always been done'. After tradition, the reason for selecting a particular management practice is economic profit, and the third reason is based on product quality followed by environmental

reasons. Contrary to other studies, only 7 % of farmers cite subsidies as an important push factor to adopt a particular farming decision.

Table 3.9. *Farmer and exploitation profiles and a brief review of the bio-physical factors affecting the soil as identified by land users. The justifications for their management practices and some socioeconomics elements affecting the adoption of SLM practices.*

	Results of the survey
Nº of farmers	119
Age	54±14 years old (Mean ± SD)
Gender	86% males and 14% females
Level of studies	Primary 42.0% Secondary 22.7% Professional training 16.8% University18.5%
Reasons for being involved in farming activities	Family tradition (81%) Vocation (13%) Others (6%)
Education about soils	77% of farmers declare not having received any education or training with regard to soils.
Sources of income	48% of farmers have other activities to obtain their incomes, mainly in the third sector (services: transport, leisure, etc).
Agrarian subsidies	98% receive subsidies to support farming activities. However, the number of aids related to soil conservation or ecological practices are below 17%.
Farm size nº of ha	Mean 184 ha SD 328 (Min 1 ha; Max 1700 ha)
Nº of municipalities where they have plots	Mean 2 SD 1,6 (Min 1; Max 12)
Crops	The most common crops are olive groves, rain-fed cereals, irrigated cereals, vineyards and horticultural crops, in decreasing order. Farmers tend to grow different crops. The most common combination is olive groves + rain-fed cereals + vineyards.
Nº of olive growers	83
Reasons for their management practices	Tradition 50% Profitability 31% Product quality 24% Environmental sustainability 18% Known practices 18% Typical in the region 17% Subsidies 7% Commercial brands advice 2%

Bio-physical factors affecting soil degradation identified by land users	In order of importance farmers are able to acknowledge: steep slopes, waterlogging, erosion, low water retention, low fertility, compaction, soil organic matter depletion, pollution, salinisation, alkalinity and acidity.
Soil improvement measures	79% of farmers consider that they can contribute to solve soil problems especially by: Increasing SOC 40% Tillage improvement 21% Improving the use of fertilizers 13% Land levelling works 12% More sustainable land management practices 9% Improving the use of pesticides 2%
Use of cover crops in olive orchards	5/83
Needs to improve soil management	Training 29% Better technology 21% Institutional aids 19%
Training demands	62% of farmers would like to participate in trainings related to: Oliviculture 16% Rain-fed cereals 11% Viticulture 7% Organic farming 7% Pesticides 6% Tillage 3% Pruning 2% Institutional aids 3% Horticulture 2%
Sources of agrarian information	Neighbours and acquaintances (27%) Regional extension services (26%). Internet (14%). Commercial agricultural suppliers (12%), Farmers associations (10%). Specialized publications, newspapers or university professionals (<4%)

When considering soil conservation problems in order of importance, the farmers were concerned about steep slopes, waterlogging, erosion, low water retention, low fertility, compaction, soil organic matter depletion, pollution, salinization, alkalinity and acidity. They believe that they can help to solve soil problems (79 %), especially by increasing soil organic carbon (SOC), fertilisers and even pesticides, but not so often by improving their ploughing method (Table 3.9). They declared that they would need better

training and improved technology. Government aid ranks in third place among their requirements for improving soil management.

The sources of information for farmer professional activities are primarily regional extension services and farmer neighbours and acquaintances. Internet is providing useful information for farmers, and it is more important than comercial agricultural suppliers or farmer associations. A few farmers (<4 %) use specialised publications, newspapers or university professionals if they are looking for advice.

Only 5 out of the 83 olive growers who took the survey used cover crops on their land and they do so for economic reasons, not due to environmental concerns. Two farmers describe how they let spontaneous vegetation grow to save labour and fuel costs; they use herbicides in the spring to avoid water competition, but they do not consider this practice to be cover cropping. Moreover, the growers mention a social disapproval towards those who 'do not work the soil'; they frequently mention that letting vegetation grow in the olive groves 'is for lazy farmers'.

4. Discussion

The effect of cover crops assessed in this study showed different efficiency in controlling soil loss, but all of them achieved better results than the CON supporting our hypothesis. On average, the reduction in annual soil loss in comparison with the CON was 40, 60 and 80 % for LEG, HOR and BRA, respectively (Table 3.3), similar to the results of (Espejo-Perez *et al.* 2013) who found a soil loss reduction of 76 % on average.

This finding is consistent with reductions in soil loss from plant cover as reported in other olive-growing regions in Spain, which were between 56 and 91 % (Ordóñez-Fernández *et al.* 2007, Marquez-Garcia *et al.* 2013). Gómez *et al.* (2009b) also found that once cover crops are established, they reduce runoff and sediment concentrations more efficiently than conventional tillage.

Our results for the soil loss of cover crops (1.36, 2.74 and 4.00 t ha^{-1} $year^{-1}$ for BRA, HOR and LEG, respectively) are close to those measured by Taguas *et al.* (2013) in an olive microcatchment under no-tillage treatment with a

spontaneous grass cover in a vertic soil (1.8 ± 2.3 t ha^{-1} $year^{-1}$) and above those found by Gómez *et al.* (2009b), who recorded 0.4 t ha^{-1} $year^{-1}$ on average in an olive orchard on a Sandy loam soil.

The actual soil erosion rates in Europe ranged from 3 to 40 t ha^{-1} $year^{-1}$ (Verheijen *et al.* 2009). Gómez *et al.* (2009b) measured 19.4 t ha^{-1} $year^{-1}$ under conventional tillage, which was almost threefold higher than the rates found by our team (6.81 t ha^{-1} $year^{-1}$), because of differences in the high rainfall amount (576 mm on average), soil type and scale of measurements.

Tolerable soil loss depends on driving factors, namely, weathering (e.g. the soil type, climate, and land use) and dust deposition (Verheijen *et al.* 2009), with a proposed European limit ranging from 0.3 to 1.4 t ha^{-1} $year^{-1}$. In shallow soils, Bienes *et al.* (2002) established a limit of 5 t ha^{-1} $year^{-1}$, Kassam *et al.* (1991) reported 3 t ha^{-1} $year^{-1}$ and Arnoldus (1977) published 2.2 t ha^{-1} $year^{-1}$ for practically nonrenewable and shallow soils. Therefore, we can say that tillage as applied in this study is not a sustainable practice, even for small scale measures. Local farmers usually till their olive groves three times per year, so the soil loss will be greater tan the rate measured in this study. A permanent cover crop is clearly sustainable under current conditions; annual cover crops were at the limit.

Gómez *et al.* (2014) found that the greatest soil loss in an olive grove in SW Spain was related to rill and gully processes (16.1 t ha^{-1} $year^{-1}$ in a 5-year period). Nevertheless, Bienes & Marques (2008) found that the soil loss in a catchment from rill processes during a highly erosive single event was only 1 to 14 % higher than the soil loss measured in the microplots. Under our experimental conditions, splash and interrill erosion are likely to be the primary factors, and thus, our rates of soil loss slightly underestimated the soil loss at the catchment level. Even so, these small plots underestimate the soil loss, being one of the limitations of the use of microplots in erosion studies as (Boix-Fayos *et al.* 2006) pointed out. Our team (Bienes *et al.* 2000) recorded soil losses of up to 10.3 t ha^{-1} $year^{-1}$ in bare soil from USLE erosion plots (20 × 4 m^2) under more intense rainfall events in the study area.

The rainfall events were more intense and had higher KE values during spring than summer, despite the great variation between events (Table 3.2). Because of these characteristics, the highest rates of soil loss occurred in the

spring, whilst summer presented lower values in this period (Table 3.4). Conversely, Gómez *et al.* (2014) found autumn and winter to be the seasons with the greatest soil loss. In our study, differences in soil loss were statistically significant only for the CON, although the same trend can be observed in BRA. Interannual soil loss variations from water erosion were very important (Table 3.4), but the differences among repetitions were also high because of natural and measured variability as noted by Bagarello & Ferro (2004) and Boix-Fayos *et al.* (2006), with a high coefficient of variation (Gómez *et al.* 2001). For this reason, it was difficult to find significant differences for the different cropping seasons between treatments.

The behaviour of soils under annual cover crops was slightly different. The average soil loss during spring was quite similar to that of the autumn for LEG, whilst in HOR it was slightly lower (Table 3.4), possibly because of the faster growing of cereals. The protective effect of the annual cover crops that usually were at the maximum during spring (Fig. 3.2) protected the bare soil from the direct impact of raindrops and stopped runoff. Seeding was performed in the autumn and the soil remained bare for several weeks.

The high correlation between soil loss and cover with a negative relation was described by Dunjo *et al.* (2004) to the same degree. In the spring, both annual and permanent cover crops covered the soil in different proportions but always over CON (Fig. 3.2), but in all cases, it was enough to protect the soil from rainfall erosivity. This is the reason why it is vital to inform the farmers that maintaining minimum cover during the spring and autumn will limit soil and fertility loss (Gómez *et al.* 2009b). Thus, for gypsiferous soils in a semiarid climate, it should be compulsory to protect the soil against erosion in the spring and autumn; such prevention measures must be adapted to the particular climate (Fleskens & Stroosnijder 2007).

Although the high-energy events (class 3: KE > 4 MJ ha^{-1}) only made up 22 % of the total, they drove to the highest proportion of soil loss in CON and LEG, at 40 and 42 %, respectively (Table 3.5), primarily because of the high proportion of bare soil during these events. The worst situation was the loss of soil under CON treatment from high-energy events (Table 3.5), in other words, with low soil cover (Table 3.6) similar to the results of Martinez-Mena *et al.* (2012). Soil loss under class 2 (2 < KE ≤4MJ ha^{-1}) events was significantly

reduced with at least 40%soil cover, supporting the results of Marques *et al.* (2008) at cover percentages above 60 %. For south of Spain, Espejo-Perez *et al.* (2013) determined that with a cover of over 20 % soil was well protected against more events.

The important effect of protecting soil against erosion is crucial under low cover percentages. In semiarid gypsiferous soils, it is very difficult to increase the soil cover beyond 55 %. Nevertheless, in this study, we note the necessity of soil cover, even at low values, and how much soil erosion can be reduced with these cover crops (Fig. 3.4). Furthermore, the effort and economic investments needed to achieve higher covers seem to justify the soil loss reduction, although water and nutrient balance were not studied in this work. Nevertheless, similar research of permanent and mowed cover crops in vineyards near the study region (Ruiz-Colmenero *et al.* 2011, 2013) demonstrated that the loss of SOC, nitrogen and phosphorus was reduced by 50 %; runoff was also reduced between 75 and 84 %. However, soil moisture was not higher due to the water used by the crops.

In this study, we did not record any event over 50 mm h^{-1}, although these events are not considered infrequent (García-Díaz *et al.* 2015). In 2007, our team recorded a single event in the study area (P = 43 mm, I = 55 mm h^{-1}, return period of 7 years according to Elías-Castillo & Ruiz Beltrán (1979), which produced a soil loss of 93.47 t ha^{-1} in a sloping olive grove managed by minimum tillage (Bienes *et al.* 2012). In Central Spain, García-Díaz *et al.* (2015) found that there was a progressive increase in the I and R factors from 1995 until 2012, whilst the annual rainfall amount remained similar. As Nearing *et al.* (2005) found, the higher the intensity of the rainfall event, the more soil was lost by erosion (Table 3.5). Unless the situation changes, the problem of erosion in the area of study will be worse in the future.

Given that erosion is a selective process (Martinez-Mena *et al.* 2001), changes in texture are frequently mentioned in the literature. Martinez-Mena *et al.* (2002) found less sand (>50 µm) in sediments that were eroded after rain events of high or medium intensity than low-intensity events, which was similar to our results (Table 3.8). Different authors find different particle size enrichment, e.g. Martinez-Mena *et al.* (2002) and Pieri *et al.* (2009) describe silt enrichment (2–20 µm). In this study, the primary change

was found for clay fractions (Table 3.8) with an enrichment rate of 1.6 on average.

Although the sediment fractions and rainfall intensity (I, I15 and I30) were correlated (Table 3.7), no significant differences appeared among the high and medium events. Despite that finding, there was an increasing trend in fine-sized sediment particles with high-intensity events. This finding can be explained by the aggregate breakdown under high-intensity events in which the splash is the primary erosion process. Martinez-Mena *et al.* (2002) found a decrease in coarse fractions with runoff time for high-intensity events (56.0 ± 2.4 mm h^{-1}), whereas a time-independent size distribution of the eroded material indicated transport-limited erosion under medium-intensity events (31.4 ± 1.4 mm h^{-1}). In addition, Wang *et al.* (2014) found that a higher KE (>105 J m^{-2} h^{-1}) resulted in a higher abundance of fine particles, supporting our results (Table 3.8).

The OC mass of the sediments was 1.5 % on average, a little less than the 1.8 % described by Marques *et al.* (2008) and higher than the 1.21 % found by Gómez *et al.* (2009b). This 1.5 % implies an enrichment rate of 2.4, which is similar to the 2.38 reported by Martinez-Mena *et al.* (2008) in an olive grove in SE Spain. There are other studies that report a similar OC enrichment of sediments (e.g. Martinez-Mena *et al.* 2012 and Marquez-Garcia *et al.* 2013). This enrichment of the sediments in clay fractions and OC is from organo-mineral associations (Porta *et al.* 1999). Rainfall events of higher intensity (I_{30} or I) led to particularly greater OC loss (Table 3.8), according to the results of Martinez-Mena *et al.* (2008). Although statistically significant differences did not appear when sediments from events of different intensities were compared, there seems to be a trend. These results were the opposite of those of Jacinthe *et al.* (2004), who found more OC in the sediments that were mobilised under low-intensity storms in different watersheds. In any case, when considering the basin scale, this process leads to a decline in soil fertility on-site, and water pollution off-site, from the rich OC-suspended sediments that were transported by runoff (Pieri *et al.* 2009).

There are other benefits of no tillage managements to improve the sustainability of olive groves. In addition to soil loss control, there is an increase in soil organic matter and therefore carbon sequestration (Parras-

Alcantara *et al.* 2015); an increase in water and nutrient availability (Colen *et al.* 2016); and a promotion and conservation of soil quality and health, as well the stability of ecosystems (Correia *et al.* 2015).

Despite the environmental benefits reported by scientific evidence, agricultural soil degradation is not obvious to farmers, and therefore, changing their management practices is not a priority for them. This general statement has been acknowledged in the region where less than one third of farmers would be willing to change their traditional tillage practice by cover crops (Marques *et al.* 2015). Currently, only 6 % of farmers who participated in the survey were using cover crops (Table 3.9). Moreover, according to the results, there is little probability of spontaneous cover crop adoption in this region.

The poor understanding of long-term land degradation processes by farmers, the lack of a holistic perspective to propose flexible and suitable solutions adapted to the local contexts as well as insufficient use of land users' own experiences have been identified as major constraints for the adoption of SLM practices (Liniger *et al.* 2004). Remarkably, the farmers acknowledge their need for training and highlight the importance of extension services for obtaining information; therefore, there is a need to strengthen cooperation among farmers, researchers and agrarian extension services to facilitate decision support. Conversely in Ethiopia, Assefa & Hans-Rudolf (2015) found that farmers have a wealth of experience in identifying the severity of soil erosion and its effect on soil fertility decline, even so farmers abandoned the tradition of fallowing. Vila Subirós *et al.* (2015) identified a lack of consensus on land management priorities, being necessary to promote participative methods and incorporate environmental service assessment as key elements in the decision-making processes.A similar conclusión found Teshome *et al.* (2016) highlighting that policy makers should take into consideration land-related factors in designing and implementing SLM policies and programmes to influence farmers' investments in SLM practices.

The results of this survey prioritise the need for information over access to governmental aid or subsidies. This finding supports recent literature that questions the efficiency of subsidies because there is no simple relation

between financial reward and behavioural change (de Snoo *et al.* 2013, Merckx & Pereira 2015).

5. Conclusions

Olive groves that are managed under tillage produced unsustainable rates of soil loss, even at small scales, under the study conditions. Gypsiferous soils are vulnerable to water erosion processes if they are not protected by vegetation, even under moderate intensity rainfalls. This study shows that soil loss is correlated to scarcity of vegetation cover and kinetic energy of rainfall. Spring and autumn had higher intensity rainfalls, and therefore, soil loss is also higher during these seasons, primarily in the spring. Farmers should adopt tailored soil cover practices during those periods.

Permanent cover crops (*B. distachyon*) in olive groves demonstrated their efficiency to prevent water erosion. After 1 year, the establishment of this cover is enough to reach a sediment yield that can be considered tolerable. Annual cover crops (*H. vulgare* and *V. ervilia*) were also efficient during the spring, but they needed time to be established unlike *O. viciifolia*, which was not suitable for this area because it did not grow properly during the dry seasons.

The OC in the soil was lost with fine soil fractions, enriching sediments in OC (average concentration 1.5 %). This finding underscores the current state of organic matter depletion characteristics in these poor and shallow soils. Erosion not only implies soil loss particles but a decrease in OC which results in the loss of agricultural land due to abandonment and reduced productivity.

Farmers must be conscious of the importance of vegetation cover. Cover crops in olive groves are rare in this región because farmers are reluctant to change from traditional tillage to cover crops due to the risk of competition for water and nutrient resources. Their practices are driven by tradition and economics. Change to cover crops would be possible if there was an economic profit and not only an environmental benefit. In this region, subsidies are given limited importance in achieving changes in farmer behaviour with regards to management practice decisions. Farmers easily understand and declare the need for active practices to conserve soil organic

matter; this recognition can be used as a link to introduce some other important needs to improve physical chemical soil quality. In this context, the work of extensión agents and institutions responsible for education and training is considered important, particularly to increase awareness of the use of cover crops and their influence on olive production and the environment.

Acknowledgements

This work was supported by the Madrid Institute for Rural, Agricultural and Food Research and Development-IMIDRA under Grant FP12-CVO and the Madrid Region-AGRISOST Project.

Capítulo 4

Influencia de distintas cubiertas vegetales sobre las propiedades físico-químicas del suelo

Este capítulo reproduce íntegramente el texto del siguiente manuscrito:

Blanca Sastre, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz. Effects of cover crops on soil properties in an olive grove in gypsiferous soil under semiarid conditions. En revisión tras incluir los comentarios de los revisores en *Journal of Agriculture, Ecosystems and* Environment.

(ver Anexo 1)

Resumen

Los olivares mediterráneos normalmente se han manejado labrándolos, lo que ha conducido a tasas insostenibles de erosión, pérdida de materia orgánica y degradación de la estructura del suelo. Las cubiertas vegetales se han revelado como una práctica de manejo sostenible del territorio para el control de la erosión y la regeneración de los suelos degradados, pero su eficiencia depende de las condiciones específicas de suelo y clima. Se ha llevado a cabo un ensayo en un olivar de secano en suelos yesíferos bajo clima semiárido en la zona centro de España.

Diferentes parámetros del suelo han sido estudiados (cobertura vegetal, densidad radicular, carbono orgánico, nitrógeno orgánico, estabilidad de agregados, porosidad, infiltración, almacenamiento de agua y resistencia a la penetración) bajo distintos manejos: tres cubiertas vegetales, dos de ellas anuales (leguminosa y cebada) y una permanente (*Brachypodium distachyon*) y un mínimo laboreo. Después de 3 años de manejo, las cubiertas vegetales han mejorado levemente el carbón orgánico particulado, estabilidad de agregados, microporosidad a 0-5 cm de profundidad y capacidad de almacenamiento de agua a 30 cm; *B. distachyon* además incrementó el carbono orgánico, la relación C/N y la cantidad total de agua útil, además de reducir la resistencia a la penetración en las capas más profundas. Se necesitan más de 3 años para recuperar la calidad del suelo en suelos yesíferos bajo clima semiárido.

Palabras clave: Laboreo, Cubierta permanente, cobertura de suelo, carbono orgánico, porosidad, estabilidad de agregados.

Abstract

Mediterranean olive groves are usually managed with tillage, which lead to unsustainable rates of soil erosion, organic matter depletion and soil structure degradation. Cover crops have been revealed as a sustainable land management practice for erosion control and regeneration of degraded soil, but cover crops efficiency depends on site-specific soil and climate. A trial in a rainfed olive grove in gypsiferous soils under semiarid climate has been developed in Central Spain.

Several soil parameters (plant cover, root density, organic carbon, organic nitrogen, aggregate stability, porosity, infiltration, water storage and soil penetration resistance) have been studied under different managements: three cover crops, two annuals (legume and barley) and one permanent (*Brachypodium distachyon*); and minimum tillage. After three years of soil management, slight improvements in particulate organic carbon, aggregate stability, microporosity at the upper depth and soil water storage at 30 cm were found in cover crops; *B. distachyon* also increased organic carbon, C/N ratio and plant available water and reduced penetration resistance in the deepest layers. More than 3 years are needed to recover soil quality in gypsiferous soils under semiarid climate.

Keywords: Tillage; Permanent cover crop; Groundcover; Organic carbon; Porosity; Aggregate stability**.**

1. Introduction

In Mediterranean region the interaction between climate, topography, soil characteristics and human activity could led to short- and mid-term unsustainability of many landscapes (García-Ruiz *et al.* 2013). Inappropriate agricultural practices are one of the main driving forces of soil degradation in Europe, causing soil erosion and a decline in organic matter content (Jones & Montanarella 2003, Gucci *et al.* 2012). The reconciliation of cultivation and soil conservation is complicated in Mediterranean environments (García-Ruiz *et al.* 2013), mainly in rainfed olive groves which commonly are cultivated on hillslopes and marginal lands (Gómez *et al.* 2009b, Zdruli 2014). In this fragile areas the scarcity and variability of water resources and its susceptibility to desertification compromises soil productivity (Taguas & Gómez 2015) and makes olive tree cultivation a potentially land degradation activity in most of Spain (García-Ruiz 2010, Fernandez-Romero *et al.* 2016b).

Traditionally, Mediterranean olive groves are managed with tillage (Xiloyannis *et al.* 2008). The most visible threat of tillage is soil erosion, e.g. Fleskens & Stroosnijder (2007) and Gómez *et al.* (2009b); but moreover, this practice decreases soil organic matter content because of increasing mineralization rates (García-Ruiz 2010, García-Díaz *et al.* 2016), reduces infiltration capacity due to soil structure degradation (Palese *et al.* 2014), and also destroys the roots in the plough layer reducing the tree water uptake (Gómez *et al.* 1999).

Taguas & Gómez (2015) found that despite the use of different soil management techniques and the compliance of Common Agricultural Policy (CAP) agro-environmental regulations, unsustainable soil losses are still taking place. They concluded that the application of other conservation technologies in the agro-environmental requirements of CAP, as efficient use of cover crops, should be researched. Cover crop is one of the most effective sustainable land management (SLM) practices for erosion control and regeneration of degraded soil (Duran-Zuazo & Rodriguez-Pleguezuelo 2008, Marques *et al.* 2016). Cover crops reduce runoff and soil erosion (Fleskens & Stroosnijder 2007, Kairis *et al.* 2013) by raindrops interception, favors autumn-winter rainwater storage in soil, improves soil structure (Palese *et al.*

2014) and increases SOC content (Vanderlinden *et al.* 1998, Marquez-Garcia *et al.* 2013). In the last ten years, cover crops in olive groves have been increasing in Spain, prevailing spontaneous vegetation (Gonzalez-Sanchez *et al.* 2015). Nevertheless, cover crops efficiency depends on site-specific climate, soil and agronomic practices (Francia Martinez *et al.* 2006, Ruiz-Colmenero *et al.* 2013), being the use of cover crops controversial in semiarid areas due to the scarce water availability (Gómez *et al.* 2009a, Alcántara *et al.* 2011, Ruiz-Colmenero *et al.* 2011).

Soils of the study area are developed on gypsiferous material under semiarid climate, within dryland category, according to UN-CCD (Arnold 1992). Gypsiferous soils formed under arid or semi-arid conditions, cover over 100 million ha in the world (Verheye & Boyadgiev 1997). This soil type appears in Mediterranean Region (Zdruli *et al.* 2010), mainly in Spain (Virto *et al.* 2015) and North Africa and the Midde East (Zdruli 2014). Mediterranean Region is the largest olive production area worldwide with $10.0x10^6$ ha from a total of $10.3x10^6$ ha in the world (FAOSTAT 2015), thus, olive groves on gypsiferous soils are not infrequent in Mediterranean environments. Despite that fact, most of the bibliography concerning cover crops in olive groves have been developed on calcic soils, e.g. Gómez *et al.* (2009a), Espejo-Perez *et al.* (2013) and Marquez-Garcia *et al.* (2013) in Spain, Kairis *et al.* (2013) in Greece and Palese *et al.* (2015) in Italy. The conclusions of the researches in calcic soils cannot be applied to gypsiferous soils due to the different soil properties. Gypsiferous soils are characterized by limited water retention, lack of plasticity and cohesion, structural deterioration, cemented and indurated layers, an imbalanced ion ratios, low organic matter content and medium to high CEC (van Alphen & Rios Romero, 1971, Verheye & Boyadgiev 1997).

Soil recovery after the stop of disturbance is a slow process in semiarid areas. Acin-Carrera *et al.* (2013) stated that more than 4 years were needed to observe signs of recovery after the cessation of tillage, and gysiferous soils make more difficult soil conditions improvement, e.g. Bienes *et al.* (2016) found, after 11 years of restoration, little improvements in gypsiferous soil quality. Therefore, the current study can give valuable information to rainfed olive growers in semiarid areas in favor of cover crops, especially those with rainfed olive groves on gypsiferous soils.

The aim of this paper is to evaluate the effect of three cover crops, two annuals and one permanent, to improve soil properties in a rainfed olive grove, under semiarid conditions and gypsiferous soil, compared to minimum tillage. This study considers possible changes in: root density, organic carbon and nitrogen and theirs fractions, aggregate stability, soil porosity, bulk density, infiltration, water content and penetration resistance after three years of management.

2. Materials and methods

2.1. Site description and climatic parameters

This study was performed in an experimental olive grove (*Olea europaea* L.) located in Central Spain, in southern Madrid (UTM 30N, ETRS89: X= 455654, Y= 4435959). The mean elevation is 540 m.a.s.l., and the slope ranges from 9 to 12%. The soil is classified as *Haplic Gypsisol* (IUSS Working Group WRB 2014), with a *xeric* moisture regime. A pit was opened at the beginning of the study; the main characteristics are reported in Table 4.1. A high silt percentage was measured in all the horizons, with a low CEC, medium to high EC and low soil organic carbon and total nitrogen. These properties make gypsiferous soils prone to degradation, and explain the low rate of recovery after degradation, mainly due to the poor development of vegetation.

Table 4.1. *Basic physical and chemical properties of the soil. Sand (2000-20 µm), Silt (20-2 µm), Clay (<2 µm), BD: bulk density, CEC: cation exchange capacity, EC: electrical conductivity of a saturated soil extract, SOC: soil organic carbon, SN: soil nitrogen.*

Horizon	Depth (cm)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	BD (Mg m^{-3})	CEC (cmol kg^{-1})	EC (mS cm^{-1})	SOC (%)	SN (%)
Ap_1	0-12	10	53	36	11	1.2	20.2	2.6	0.72	0.12
Ap_2	12-26	16	41	47	12	1.4	16.8	1.9	0.93	0.11
By	26-43	27	49	39	13	1.2	8.1	2.2	0.17	0.04
Cy	43-55	45	58	42*		nd	13.3	2.5	0.17	0.02

*nd: no data. * In Cy-horizon silt and clay flocculated so there was no feasible to separate them, the texture class was estimated texture 86 by feel.*

The climate is Mediterranean semiarid, with long hot summers (quite often above 35ºC in July and August) and cold winters. The mean annual

temperature is 13.6ºC and reference evapotranspiration (ET_0 Penman-Monteith) is 1112 mm. The annual precipitation is approximately 390 mm with high inter and intra-annual variability.

The olive plantation was established in 2004 with trees in 6 x 7 m^2 spacings (238 trees ha^{-1}), on an area of approximately 3 ha. The cultivar is Cornicabra, the most widely grown cultivar in Central Spain, drought tolerant and cold resistant (Rallo *et al.* 2005).

2.2. Experimental design

Before the start of the trial, in November 2010, the whole area was tilled with a chisel at 0.30 m depth following the traditional management. The tillage was performed in 6 m-wide inter-rows, covering 0.47 ha of surface (222 m long by 21 m width) including two rows of 38 olive trees with the same treatment on each side.. Each treatment was performed in 3 consecutive inter-rows. The treatments consisted of the following, three cover crops: 1) barley (*Hordeum vulgare* L.) annual cover, that was seeded each autumn at 70 kg ha^{-1}; 2) sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.) a legume that was seeded each autumn (42 kg ha^{-1}); 3) purple false brome (*Brachypodium distachyon* L. P. Beauv.) hereafter Brachypodium, a permanent grass cover seeded once (the first year, 40 kg ha^{-1}) during the study period; and 4) minimum tillage, hereafter control, consisted of one pass per year with a chisel at 0.15-0.20 m deep in mid-November, to control weeds. Seed doses were different because the target was to seed with the same number of seeds per hectare. As barley seeds were bigger than the other two cover crops seeds, the dose of barley was higher.All of the treatments were mechanically mowed once in the spring (during the first fortnight of May), except in 2013, when the vegetation was mowed twice (the second cut was at the end of May) because of high vegetation growth resulting from the abundant rains of that spring. Plant debris was left on the surface.

2.3. Plant and soil measurements

2.3.1. Plant cover and root density

Plant cover (%) was measured bimonthly, using quadrats 25 × 25 cm^2, considering the mean of plant cover judged by 6 trained observers.

Root density (RD) was determined in sample soils using a drill (2.18 cm diameter) at 0-10, 10-20 and 20-30 cm depth in five samples per treatment in summer 2013. Soil samples were dried at 60ºC until constant weight, weighed, wet sieving at 0.20 mm, and then water and roots were vacuum filtered in a Büchner funnel and Kitasato flask over a tared filter paper. Filter paper and roots were oven-dried at 105ºC and weighed, obtained root weight per soil weight. RD (kg m^{-3}) was calculated as root dry mass by bulk density per each depth. Bulk density was calculated as dry soil sample weight divided by the known volume of the sample taken with the cylindrical dril (37.32 cm^3).

2.3.2. Soil organic carbon and nitrogen

Three composites samples per treatment were taken in the middle of the inter-row the third year at two depths: 0-5 and 5-10 cm. These samples were air-dried and sieved through a 2 mm sieve. Samples were separated into particulate organic-matter fraction (POM) and mineral-associated organic-matter fraction (MOM) as follows: soil samples were dispersed in 30 mL of sodium hexamethaphosphate (5 g L^{-1}) by shaking for 15 h on a shaker. Then, the dispersed soil samples were passed through a 50 µm sieve, and the different fractions were oven-dried at 50ºC (Cambardella and Elliott, 1992).

Organic carbon and total nitrogen were determined by wet oxidation (Walkley & Black 1934) and Kjeldahl digestion (Dewis & Freitas 1970) respectively, from the mineral soil (<2 mm) and POM and MOM fractions: soil organic carbon in mineral soil (SOC), total nitrogen in mineral soil (SN), soil carbon in MOM fraction (C-MOM) and total nitrogen in MOM fraction (N-MOM). Wet oxidation underestimate carbon content (Jolivet 1998). Despite that fact this error is systematical and the method is widely used thus results of different treaments can be compared without making a big

mistake. The stock values of SOC and SN, expressed for a specific thickness, was obtained as follows:

(Eq. 4.1) $$\text{Stock} = \text{conc.} \times \text{BD} \times \text{d} \times (1 - \delta 2\text{mm}) \times 10^2$$

Where: Stock of C or N (Mg ha^{-1}); conc. is the concentration of C or N (%); BD is the bulk density (Mg m^{-3}); d is the thickness (m); and δ2mm is the proportion of gravel larger than 2 mm.

Soil carbon in POM fraction (C-POM) and total nitrogen in POM fraction (N-POM) were determined by the substract of C-MOM to SOC and N-MOM to SN fractions. C- POM, N-POM, C-MOM and N-MOM fractions were calculated by multiplying the dry mass of each fraction by the respective C and N concentration and following the equation 4.1.

2.3.3. Aggregate stability

Aggregate stability was measured by two tests: counting number of drops (CND; Imeson & Vis 1984) and water-stable aggregates (WSA; USDA 2001). CND test attempts to mimic the impact of raindrops on the macroaggregates (Cerdà 1998) while WSA measures the aggregates that stand up to the forces of water. Three sub-samples, composed by 30 air-dried macroaggreagates (size 4 to 4.75 mm Ø) to CND test were selected per treatment. Other three sub-samples, composed by 10 g of sieved mineral soil (size 0.25-2 mm) were selected per treatment for WSA. The percentage of WSA was calculated from the soil obtained in water (stable fraction) divided by the sum of the weights of both the stable and unstable material.

2.3.4. Porosity

2.3.4.1. Intrapedal porosity

The petroleum method was employed to asses intrapedal porosity (Mursec 2011). Three sub-samples composed by 30 air-dried macroaggregates (size 4 to 4.75 mm Ø) were selected. This method consists of weight the aggregates, submerged in petroleum oil for 24 h to allow pores to infill and the difference in mass used to calculate porosity.

2.3.4.2. Macro, meso and microporosity

Five topsoil undisturbed samples per treatment (0-5 cm depth) were randomly collected using core stainless cylinders (100 cm^3). The core samples were saturated with water by capillarity in a sandbox to determine pF between 0 and 2.0 (0.1 to 10 kPa) by successive weight measurements. Water retention between 2 to 4.2 pF (10 to 1500 kPa) was determined using a progressive drying process with pressure plate extractors (Richards 1941). Finally, the samples were completely dried in oven (24 h at 105 °C). These dried samples also allowed the determination of the bulk density (Blake & Hartge 1986).

The relationship between pore size and water retention capacity had been established as follows: macropores (>60 µm) corresponding to matric potentials between pF 0 to 1.8; mesopores (60 to 10 µm) correspond to pF values between 1.8 and 2.54; and micropores (<10 µm) having pF >2.54. Pores smaller than 0.2 µm diameter, correspond to matric potentials higher than pF 4.2. These sizes of macro, meso and micropores are consistent with current literature, e.g. (Taboada *et al.* 2004, Bienes *et al.* 2016). Available water capacity (AWC) was determined by the difference between water volumes at pF 2.54 and 4.2; and permanent wilting point (PWP) as the volume of water between pF 4.2 and 7 (oven dried at 105 °C, 24 h).

All measured data were fitted to a van Genuchten model using RETC software (van Genuchten *et al.* 1991) to obtain the parameters of the empirical equation 4.2 modified by van Genuchten & Nielsen (1985). Water retention curves were plotted.

(Eq. 4.2) $$\theta(h) = \theta_r + \ \theta_s - \theta_r \ \times \ [1 + (\alpha \ \times h)^n]^{-m}$$

Where: $\theta(h)$= water content at tension h (m^3 water m^{-3} soil); θ_s=saturated water content (m^3 water m^{-3} soil); θ_r=residual water content (m^3 water m^{-3} soil); α= inverse of the air entry suction (m^{-3}); h=the suction pressure (m^{-3}); n=a dimensionless value related to the smoothness of pore size distribution; and m=1-(1/n).

2.3.5. Infiltration and soil volumetric water content

A small single ring (Ø=12 cm) was employed to assess steady state infiltration (USDA 2001), four repetitions per treatment were done.

Soil volumetric water content (θ) was measured in the inter-rows in three points per treatment. Each point had two EC-5 soil moisture sensors (Decagon Devices Inc.) at 15 and 30 cm depth plugged into a data logger, which recorded θ data each 15 minutes along the study period.

2.3.6. Soil penetration resistance

Soil penetration resistance (PR) was assessed employing a hand penetrometer 06.01 (Eijelkamp). Data were collected at eight random points per treatment in summer. PR readings were made at the following soil depths: 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 and 45 cm.

2.4. Statistical analysis

Statistical analyses were performed using SPSS 19 software (IBM Corp. 2010). Analysis of variance (ANOVA) and Multivariate analysis of variance (MANOVA) were applied for the statistical procedures of the results, mean comparisons were made using the Least Significant Difference (LSD) method at $p< 0.05$ level. The data were transformed before parametric testing when necessary ($1/\ \overline{x}$ or $\ln x$). When the homogeneity of variance between groups was not met for the ANOVA analysis, post-hoc comparisons were done with Games-Howell test.

3. Results

3.1. Plant cover and root density

Figure 4.1 shows plant cover means per treatment and season in 2013, after three years of management. In autumn, after seeding annual cover crops and tilling control treatment, Brachypodium was the treatment with the highest percentage of plant cover (around 90 %). In winter, both annual cover crops significantly increased plant cover regarding control, barley reached 30 % and sainfoin 50 %. After spring mowing, sainfoin cover suffered a reduction to a similar percentage as control (10 %), while barley and Brachypodium

almost had a 50 % of plant cover. In summer, Brachypodium significantly increased plant cover up to 85%, followed by barley (40 %), control and sainfoin (10 %).

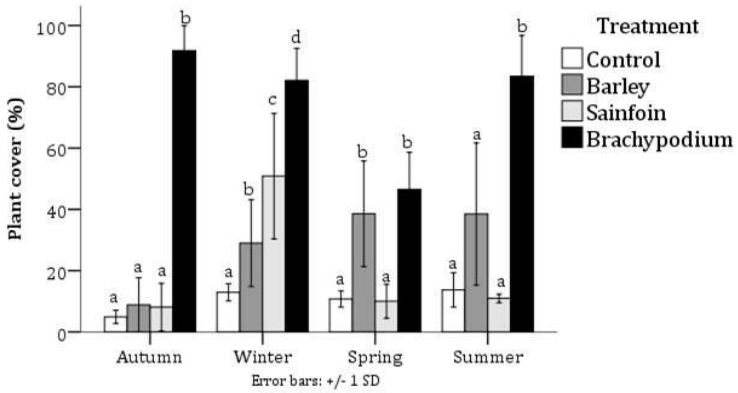


Figure 4.1. *Plant cover (%) per treatment and season in 2013. Error bar: Standard deviation. Different letters mean differences between treatments at p<0.05 according to Games-Howell test.*

RD was affected by treatment and depth but not by their interaction (Table 4.2). The LS means of RD from the ANOVA showed that Brachypodium and sainfoin had the highest values (6.9 and 7.5 kg m^{-3} respectively), while barley had the lowest RD (4.0 kg m^{-3}). Despite barley had more plant cover than sainfoin, a higher RD was found in the latter treatment. There were statistically significant differences between the upper layer and the other two, with almost two-fold RD in 0-10 cm than in 20-30 cm depth.

There were statistically significant differences among treatments only in the 0-10cm depth (Fig. 4.2), Brachypodium and sainfoin had higher values of RD than barley. No differences between treatments were found at the other two depths.

Table 4.2. *Two-ways ANOVA table for Root density (RD) and LS means as a function of the different treatments and depths (the number of cores per treatment was 5) after 3 years of management.*

		RD (p-value)
LSD (prob>F)	Treatment	0.010
	Depth	0.010
	Treatment x Depth	ns
Factors		RD (kg m-3)
Treatment	Control	5.34±0.85 ab
	Barley	3.97±0.85 a
	Sainfoin	7.48±0.85 b
	Brachypodium	6.94±0.89 b
Depth (cm)	0-10	8.18±0.74 b
	10-20	5.30±0.74 a
	20-30	4.30±0.76 a

ns: not significant. Different letters mean differences between levels of the factor according to LSD test (p<0.05).

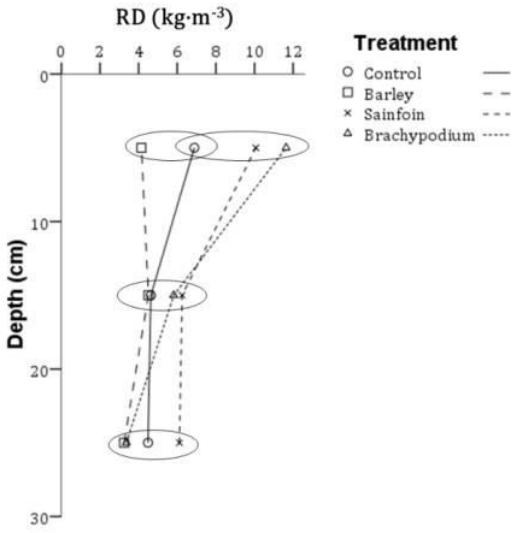


Figure 4.2. *Root density (RD) in the profile for the different treatmetns and depths after 3 years of management. Different circles mean significant differences between treatments for the same depth according to LSD at p<0.05.*

3.2. Soil organic carbon and nitrogen

Table 4.3 includes MANOVA results for SOC and SN and theirs fractions: C-MOM, C-POM, N-MOM and N-POM; and the relationship from POM to total (C-POM/SOC and N-POM/SN) and C/N ratio for the treatments and the depths studied (0-5 and 5-10 cm). SOC and SN were affected by treatment and depth. C-MOM and N-MOM were only affected by treatment, while C-POM, N-POM, C-POM/SOC and N-POM/SN were affected only by depth. C/N ratio was not influenced by either of these factors. No interactions were found. After three years, Brachypodium significantly increased SOC content (6.8 Mg ha^{-1}) regarding the other treatments, and C-MOM (5.4 Mg ha^{-1}) regarding annual cover crops. SN and N-MOM were lower in sainfoin (0.51 and 0.43 Mg ha^{-1} respectively) than in Brachypodium (0.72 and 0.55 Mg ha^{-1} respectively) and control (0.64 and 0.55 Mg ha^{-1} respectively). Despite there were not statistically significant differences between groups, there was a trend to increase C-POM, C-POM/SOC, N-POM and N-POM/SN in cover crops regarding control, and also in C/N ratio. Between depths, there was a significant decrease in depth across all the variables except for C-MOM, N-MOM, and C/ N ratio. C-POM and N-POM increased by two-folds in the upper layer.

After three years of C-input by the cover crops, SOC content in the soil profile (0-10cm) were 10.9 Mg ha^{-1} in Control, 10.9 Mg ha^{-1} in Barley, 8.8 Mg ha^{-1} in Sainfoin and 13.7 Mg ha^{-1} in Brachypodium treatment, no statistically significant differences were found (data not shown). No significant changes were observed in SOC compared to control at any depth (Fig. 3a, 3b). The highest content in SOC at 0-5 and 5-10 cm depth were found in Brachypodium, 7.9 Mg ha^{-1} (corresponding to 1.1%) and 5.7 Mg ha^{-1} (0.8%) respectively, although no statistically significant difference appeared in the upper layer. SOC content of control was 5.6 Mg ha^{-1} corresponding to 0.8% (Fig. 3a). Brachypodium also increased C-MOM regarding the other treatments at 0-5 cm (6.1 Mg ha^{-1}), but no differences were found between treatments for C-POM at any of the depths. Similar results were found for SN, N-MOM and N-POM for 0-5 cm and 5-10 cm depths (Fig. 3c and 3d respectively). It is noteworthy the low content in SOC, C-MOM, SN and N-MOM of sainfoin at both depth.

Table 4.3. MANOVA (prob>F) and LS mean of chemical and physical soil properties for the treatments and depths after 3 years of management. SOC: soil organic carbon, C-MOM: mineral-associated carbon, C-POM: particulate carbon, C-POM/SOC ratio, SN: soil nitrogen, N-MOM: mineral-associated nitrogen, N-POM: particulate nitrogen, N-POM/SN ratio, C/N ratio, CND: Counting number of drops, WSA: Water-stable aggregates.

Parameters	Factor (p-value)			Factors					
	Treat-ment	Depth	Treat-ment x Depth	Treatment				Depth (cm)	
				Control	Barley	Sainfoin	Brachypodium	0-5	5-10
Chemical parameters									
SOC (Mg ha^{-1})	0.006	0.012	ns	5.4 a	5.5 a	4.4 a	6.8 b	6.2 b	5.0 a
C-MOM (Mg ha^{-1})	0.001	ns	ns	4.7 bc	4.3 ab	3.6 a	5.4 c	4.7 a	4.3 a
C-POM (Mg ha^{-1})	ns	0.025	ns	0.8 a	1.2 a	0.8 a	1.4 a	1.4 b	0.7 a
C-POM/SOC (%)	ns	0.048	ns	13.7 a	18.8 a	18.2 a	20.0 a	21.3 b	14.1 a
SN (Mg ha^{-1})	0.026	0.011	ns	0.64 b	0.62 ab	0.51 a	0.72 b	0.68 b	0.56 a
N-MOM (Mg ha^{-1})	0.000	ns	ns	0.55 bc	0.51 b	0.43 a	0.55 c	0.55 a	0.51 a
N-POM (Mg ha^{-1})	ns	0.023	ns	0.08 a	0.11 a	0.09 a	0.09 a	0.14 b	0.05 a
N-POM/SN (%)	ns	0.026	ns	12.2 a	15.9 a	14.7 a	12.4 a	19.1 b	8.5 a
C/N ratio	ns	ns	ns	8.6 a	8.8 a	8.7 a	9.5 a	8.9 a	8.9 a
Physical parameters									
CND	0.001	0.000	0.011	8.3 a	11.0 c	9.8 b	12.3 d	11.0 b	10.0 a
WSA (%)	0.000	0.001	0.000	32.3 a	42.0 bc	37.0 ab	44.3 c	46.5 b	31.4 a
Intrapedal porosity (%)	ns	0.040	0.011	38 a	39 a	40 a	39 a	38 a	40 b

ns= not significant. Different lowercase letters in each row indicate differences between levels of the factor according to LSD test at $p<0.05$.

Although no statistically significant differences were found between treatments for different depths or between depths for different treatments (data not shown), in the 0-5 cm layer there is a trend of cover crops to increase C-POM/SOC ratio (26 % in barley, 23 % in sainfoin and 22 % in Brachypodium) regarding control (15 %); and a higher value of N-POM/SN ratio (23 %) in sainfoin regarding the other treatments (19 % in control, 21 % in barley and 14 % in Brachypodium). Conversely, at 5-10 cm depth sainfoin had almost the half of N-POM/SN (6 %) than the grasses (11 % for barley and Brachypodium) and equal to control (6 %). In C/N ratio neither statistically significant differences appeared. Brachypodium had the highest C/N ratio at 0-5 cm depth (10.0) and control had the lowest (8.1) with barley and sainfoin in an intermediate place (9.1 and 8.5 respectively); whilst at 5-10 cm this ratio was almost the same for all the treatments (ranged between 8.4 and 9.1).

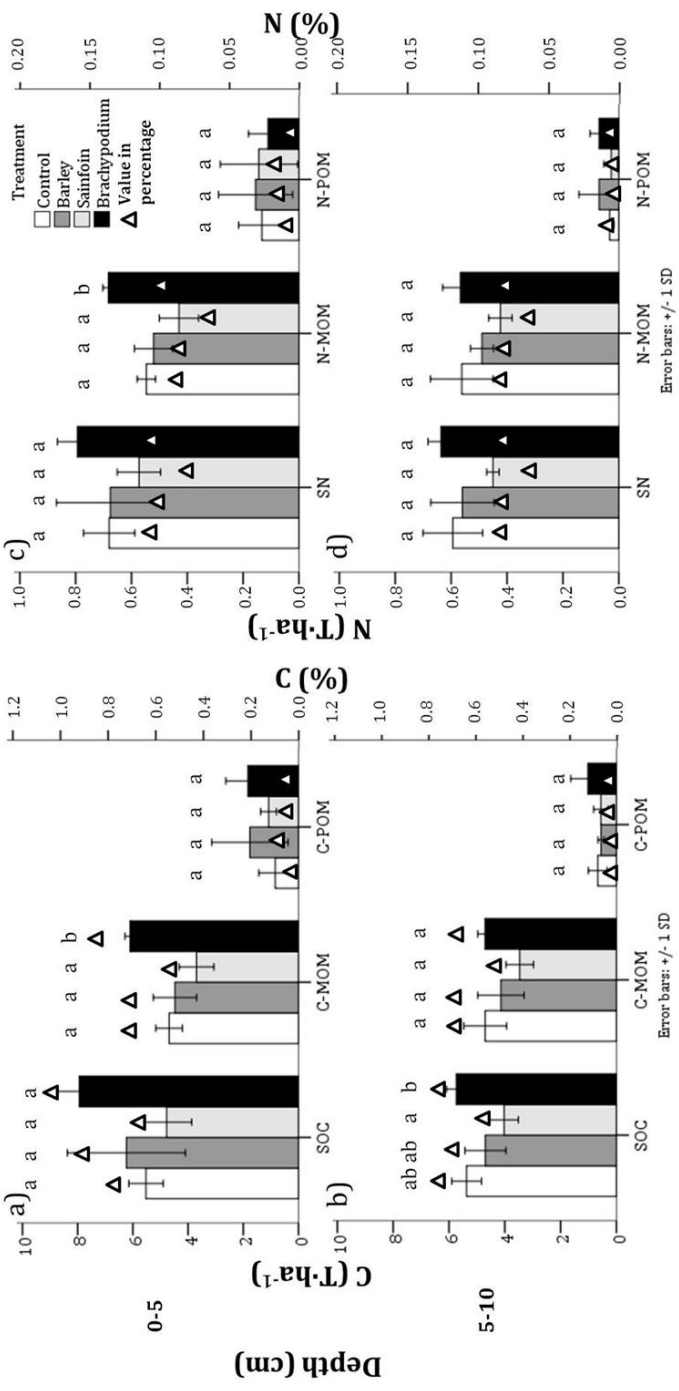


Figure 4.3. Organic Carbon: Total (SOC), mineral-associated (C-MOM) and particulate (C-POM) at 0-5 cm (a) and 5-10 cm depth (b); and Nitrogen: Total (SN). mineral-associated (N-MOM) and particulate (N-POM) at 0-5 cm (c) and 5-10 cm depth (d) after 3 years of management. Triangles show the data in percentage (%) of C or N in the total of soil. Different letters mean differences between

3.3. Aggregate stability

Both test for measure aggregate stability showed a significant influenced of treatment, depth and their interaction (Table 4.3). For both tests the most stable aggregates belong to Brachypodium, followed by barley, sainfoin and control. Aggregates from the upper layer were significantly more stable than the 5-10 cm depth.

Brachypodium and barley increased 50% aggregate stability in CND and around 40% in WSA regarding control in topsoil (Fig. 4.4a and 4.4b). At 5-10 cm depth, Brachypodium was the only treatment that significantly increased CND regarding the other (Fig. 4.4a), although there was a trend in cover crops to increase CND and WSA regarding control (Fig. 4.4a and 4.4b).

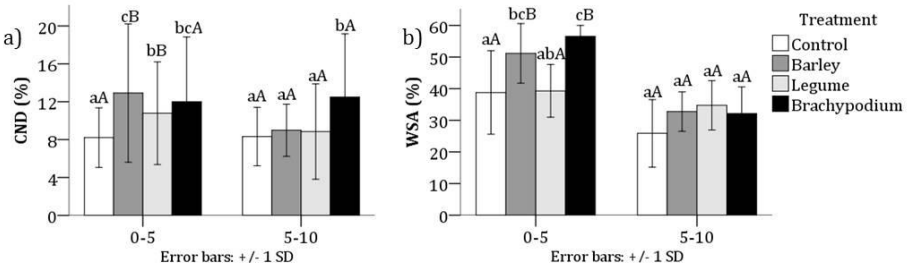


Figure 4.4. *Aggregate stability: CND test (a) and WSA test (b) after 3 years of management. Different lowercase letters mean differences between treatments for the same depth according to LSD test (p<0.05) and different uppercase letters mean differences between depths for the same treatment according to LSD test (p<0.05).*

3.4. Porosity

3.4.1. Intrapedal porosity

The intrapedal porosity of the macroaggregates increased with depth and it changed among treatments (Table 4.3). In the topsoil (0-5 cm) all the treatments showed a similar intrapedal porosity: 39, 38, 37 and 38 % in control, barley, sainfoin and Brachypodium respectively. At 5-10 cm depth barley and sainfoin increased up to 42%, followed by Brachypodium (39 %) and control (37 %) the lowest, reducing this percentage regarding 0-5 cm (data not shown).

3.4.2. Macro, meso and microporosity

Macro, meso and microporosity at 2.5-7.5 cm depth after 3 years of the different treatments are shown in Fig. 4.5. Statistically significant difference only appeared in total porosity (TP) and bulk density (BD), between barley (TP:53% and BD: 1.33 g cm^{-3}) and Brachypodium (TP: 46% and BD: 1.49 g cm^{-3}). Control and sainfoin were in an intermediate place with similar values (TP: 48.9 and 48.5 % and BD: 1.42 and 1.42 g cm^{-3} for control and sainfoin, respectively). Barley reached the highest value in macroporosity (6.2%), whilst in mesoporosity was control (24.3%). Cover crops increased microporosity regarding control (18.6%), mainly barley (24.5%), but annual cover crops also increased PWP up to 16% while control remained around 10%. There was a trend to increase AWC in Brachypodium treatment (9.1%), followed by control (8.5%), barley (8.1%) and in the last place sainfoin (7%).

Water retention curves (Fig. 4.6) show a similar behavior between different treatments. Barley had the highest θ values in each pF according to its greater macro, meso and microporosity; control had the lowest θ when pF>2.4 (lower microporosity), whilst Brachypodium had the lowest θ when pF<2.4 (lower macro+mesoporosity).

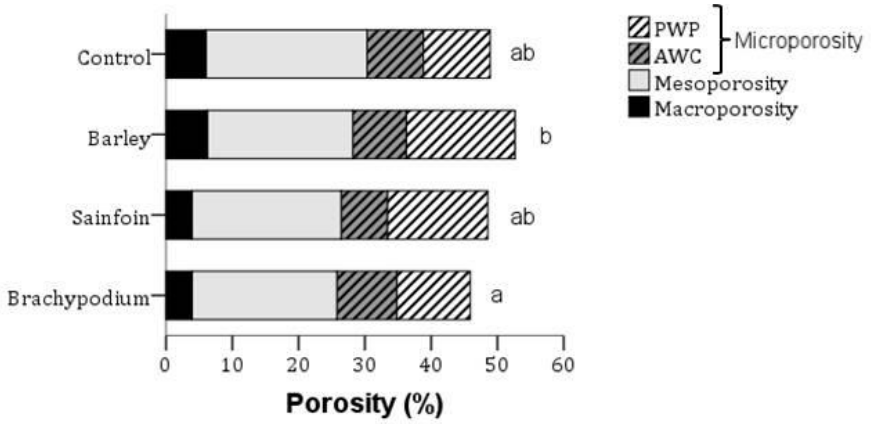


Figure 4.5. *Macroporosity (>60μm, pF:0-1.8), Mesoporosity (60-10 μm, pF:1.8-2.54), Microporosity (<10μm, pF:2.54-7.0), composed by: avalailable water capacity (AWC, pF:2.54-4.2) and Permanent wilting point (PWP, pF:4.2-7.0) after 3 years of management. Different letters mean significant differences between treatments in total porosity, according to LSD test (p<0.05).*

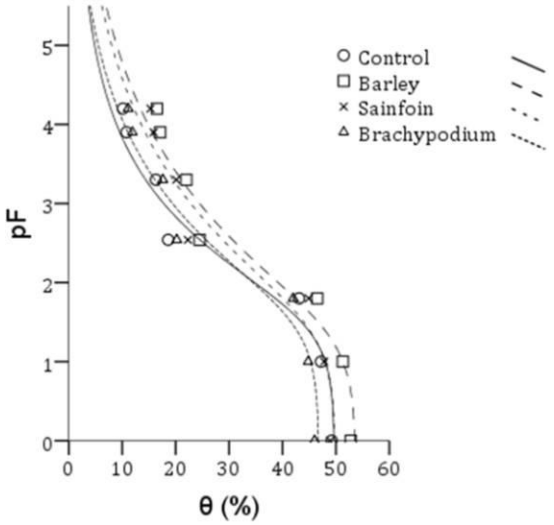


Figure 4.6. *Water retention curve for each treatment (n=5) after 3 years of management. θ: Volumetric water content.*

3.5. Infiltration and soil volumetric water content

Infiltration curves after 3 years of management are shown in Fig. 4.7, all the treatments had a moderately slow infiltration rate according to USDA (2001) ranged between 15.2 and 50.8 mm h^{-1}. Steady-state infiltration was greater in control (45 mm h^{-1}), followed by Brachypodium (38 mm h^{-1}), legume (21 mm h^{-1}) and barley (19 mm h^{-1}), although no significant differences were found (data not shown).

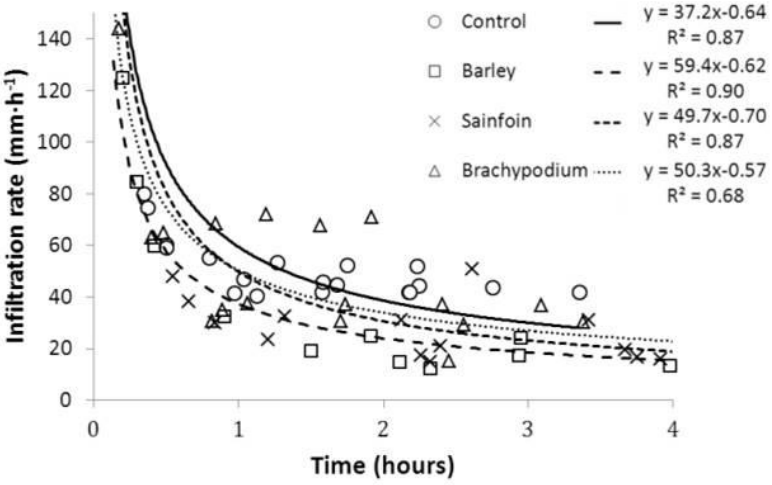


Figure 4.7. *Infiltration curves after three years of management (n=4) for the four treatments.*

After 3 years, there were statistically significant differences in θ between treatments and depths in all the seasons (Table 4.4). Winter showed the higher θ at 15 and 30 cm depth despite the rainy spring due to the lower ET_0. Control and Brachypodium held more water at 15 cm in all the seasons than barley and sainfoin. At 30 cm Brachypodium showed the same behavior than at 15 cm, while control had the lower water storage in every season. Annual cover crops were in an intermediate place. Comparing depths for each treatment and season, all the treatments had a higher θ at 15 cm than at 30 cm, except sainfoin that only overtook θ at 15 cm to 30 cm in autumn.

Table 4.4. *Mean and standard deviation of soil volumetric water content (m^3 m^{-3}) per season for the four treatments and two depths after 3 years of management.*

Depth (cm)	Treatment	Winter (n=267)	Spring (n=279)	Summer (n=276)	Autumn (n=273)
15	Control	0.22±0.02cB	0.20±0.03cB	0.13±0.03cB	0.17±0.04dB
	Barley	0.19±0.02bB	0.17±0.03bB	0.11±0.03bA	0.14±0.04bB
	Sainfoin	0.15±0.02aA	0.13±0.03aA	0.07±0.02aA	0.12±0.03aB
	Brachypodium	0.22±0.05cB	0.20±0.06cB	0.11±0.05bA	0.16±0.05cB
30	Control	0.14±0.02aA	0.11±0.03aA	0.08±0.03aA	0.09±0.03aA
	Barley	0.16±0.04bA	0.15±0.05bA	0.11±0.05bA	0.10±0.03bA
	Sainfoin	0.17±0.02bB	0.15±0.03bB	0.09±0.03bB	0.10±0.04bA
	Brachypodium	0.20±0.03cA	0.17±0.05cA	0.11±0.03cA	0.12±0.04cA

Lowercase letters indicate differences between treatments within each depth and uppercase letters indicate differences between depth for the same treatment, according to LSD test (p<0.05).

3.6. Soil penetration resistance

Soil moisture the date that the measurements were done was around 10% according to soil moisture sensors, which is close to PWP. PR was similar in the topsoil for all the treatments up to 10 cm (Fig. 4.8). At this depth, control and barley kept increasing while Brachypodium slightly decrease until achieve similar values to legume treatment at 25 cm, around 600 N cm^{-2}.

The main differences in PR were found between 10 to 30 cm depth between control and barley regarding sainfoin (Table 4.5). Differences between depths there were statistically significant only for control and barley. Beyond 30 cm depth PR could not be measured in control and barley (>1000 N cm^{-2}).

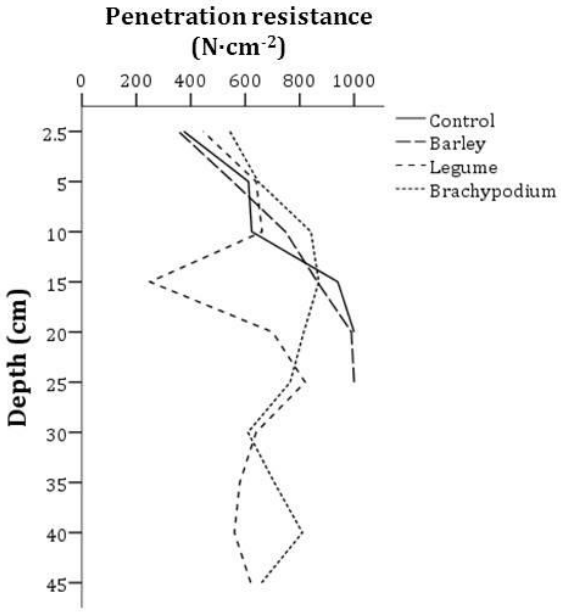


Figure 4.8. Penetration resistance from 2.5 to 45 cm depth for the different treatments after 3 years of management

Table 4.5. Mean and standard deviation (SD) values of Penetration resistance after 3 years of management at different depths. N: number of repetitions.

Depth	Treatment	N	Penetration resistance (N cm^{-2})
0-15 cm	Control	17	518±356 a A
	Barley	20	523±373 a A
	Sainfoin	21	571±407 a A
	Brachypodium	22	671±247 a A
10-30 cm	Control	6	960±67 b B
	Barley	7	920±150 b B
	Sainfoin	6	590±329 a A
	Brachypodium	12	817±155 ab A
30-45 cm	Control	0	--
	Barley	0	--
	Sainfoin	4	600±37 a A
	Brachypodium	9	698±155 a A

Different lowercase letters in each column mean differences between treatments for the same depth and different uppercase letters in each column mean differences between depths for the same treatment at $p<0.05$ according to Games-Howell test.

4. Discussion

4.1. Plant cover and root density

After 3 years of management, despite the large differences in plant cover among cover crops and control, there were few statistically significant changes in the studied soil properties. Brachypodium was the treatment with the higher percentage of plant cover throughout the year, as was expected because of the absence of soil disturbance except mowing in spring. Moreover this cover crop showed the highest RD in topsoil layer together with sainfoin. RD in the upper horizon was low compared to other studies (Duran-Zuazo & Rodriguez-Pleguezuelo 2008) ranged between 4 to 12 kg m^{-3} in barley and Brachypodium respectively, possibly because of a reduced root growth due to the aridity of the climate besides the gypsiferous poor soil. Although the barley cover was greater than sainfoin in most of the seasons, RD was higher in the legume treatment, which could be related to differences in root systems. Sainfoin has a deep taproot (Koivisto 2001), whilst barley has a diffuse shallow root system (Hackett 1968) with a lower biomass. Despite a very low plant cover by control treatment (ranged 5-15%), over 6 kg m^{-3} of RD was measured in the topsoil, indicating a persistent root system of the scarce weeds. In general, cover crops roots decreased below 10 cm depth, while the greatest root activity of rainfed olive trees is ranged between 0.15 and 1.00 m in depth (Fernández 2014). Therefore, water competition among cover crops and olive trees is not likely to be important.

4.2. Soil organic carbon and nitrogen

In Brachypodium treatment SOC stock increased almost 1 Mg ha^{-1} per year regarding control, due to a higher plant cover, RD and also plant debris of the cover crop. This difference (10.9 Mg ha^{-1} in control and 13.7 Mg ha^{-1} in Brachypodium) was not statistically significant, similar to the results of Gonzalez-Gonzalez *et al.* (2012) and Parras-Alcantara *et al.* (2015), while Palese *et al.* (2014) found significant differences after 7 years of permanent spontaneous vegetation regarding 2-3 tillage per year. Parras-Alcantara *et al.* (2015) stated that tillage increased SOC outputs owing to the degradation of

soil aggregates. Statistical differences in SOC between annual cover crops and control treatment were not found due to the circumstance that control treatment consisted of a shallow tillage only once a year, which combined with the dry environment slowed down the degradation process in a poor soil that changes slowly, as Bienes *et al.* (2016) found. The lowest SOC content found in the soil profile in sainfoin treatment (8.8 Mg ha^{-1}) was due to a higher mineralization rate of leguminous crop residues, as was stated by Plaza-Bonilla *et al.* (2015).

Roots are one of the main sources of carbon and nitrogen in soil (Zdruli *et al.* 2004, Rasse *et al.* 2005). SOC and SN decreased in depth, a mean of 20% in SOC and 22% in SN on mean, similar to the results reported by. The reduction with depth in mean was of 20% in SOC and 22% in SN, similar to the results reported by Alvarez *et al.* (2007). In semiarid areas is crucial to preserve plant cover in order to maintain the soil organic-carbon stock (Duran-Zuazo & Rodriguez-Pleguezuelo 2008, Fernandez-Romero *et al.* 2016b). According to Zdruli *et al.*, (2004), in order to maintain a good quality soil, at least 2% in SOC should be storage in the topsoil. In this study, after three years of soil management, soils of Brachypodium and barley treatments contained around 7.9 and 6.2 Mg ha^{-1} respectively corresponding to 1.1 % and 0.9% of SOC in the top layer, whilst control had 5.6 Mg ha^{-1} corresponding to 0.8%. As larger C amount is lost by soil erosion, Almagro & Martinez-Mena (2014) estimated that 20 years of green manure incorporation will be necessary in a rainfed Mediterranean olive grove under dry climate to recover the full potential for soil C sequestration. Thus, the 2% in SOC objective should be a medium to long-term objective in rainfed olive groves under semiarid climate, so the use of cover crops can facilitate achieving this goal.

Because of about 95% of the soil nitrogen is contained in the organic matter Duran-Zuazo & Rodriguez-Pleguezuelo (2008), the pattern in C and N stocks was similar between treatments for each depth.

The trend of cover crops, annuals and permanent, to increase C-POM and C-POM/SOC at 0-5 cm depth is because the crop residue inputs result in a more reactive pool of organic C creation (Rodrigues *et al.* 2015), being POM the labile fraction of soil organic matter, that responds readily to soil

management (Wander 2004). Similar results were found by Martinez-Mena *et al.* (2008) and Martin-Lammerding *et al.* (2011) in soils under tillage and plant cover management. Sainfoin had the lowest stocks in SN, N-POM and N-MOM, contrary to was expected basing on bibliography important amounts of N could be fixated, e.g. Giller (2001) suggests that rates of N2 fixation of 1 to 2 kg N ha^{-1} growing season day^{-1} should be possible in all legumes), and Kumar and Goh (2000) estimated a N_2 fixation of 20-373 N ha^{-1} $year^{-1}$.As with happened with SOC and SN, C-POM and N-POM decreased with depth, in accordance with the results of Wander (2004).

C/N ratios ranged between 8 and 10 for all treatments and depths, indicating a proper humification of the organic matter. Control had a low C/N ratio at 0-5 cm depth (8.1), whilst Brachypodium increased this ratio (10.0), although no statistically significant difference was found. Gómez *et al.* (2009b) and Soriano *et al.* (2014) found an increase in C/N ratio in cover crops regarding conventional tillage due to the higher contribution of residue input on the surface. As legume has a low C/N in its litter due to a high N content (Almagro & Martinez-Mena 2014), sainfoin treatment had a soil C/N ratio close to control, that had a low residue input and, therefore, low C/N ratio. This low C/N ratio in sainfoin involved a higher mineralization rate of the residues (Martin-Lammerding *et al.* 2011), and thus, a lower content in SOC, C-MOM, SN and N-MOM in the topsoil (0-5 cm depth).

4.3. Aggregate stability

Organic matter decomposition, plant-derived C (Barthes *et al.* 2000, Verchot *et al.* 2011) and POM (Martin-Lammerding *et al.* 2011) contributes to aggregate formation and stabilization. This is the reason why Brachypodium and barley, the treatments with the higher SOC and C-POM content, also had the most stable aggregates. This correlation was described by other authors (Gómez *et al.* 2009b, Santín-Montanyá *et al.* 2013) in different soils. Roots also contributes to aggregate stability, e.g. de Baets *et al.* (2006) found an exponential decline in relative soil detachment rate in increasing RD between 0 and 4 kg m^{-3} in topsoil samples of grass. In this study, aggregate stability seems to be more related to C-POM content than to RD, since small differences were found in the upper layer in RD between control and cover crops, whilst control had the least stable aggregates. Given that topsoil layer

had higher SOC and C-POM content than subsurface layer, aggregates were more stable at 0-5 than 5-10 cm depth.

4.4. Porosity

No differences in intrapedal porosity in the topsoil layer were found contrary to Park & Smucker (2005) who described in a corn plantation that long-term tillage reduced this parameter. This lack of differences could be due to the minimum tillage applied and the short time studied (3 years), although a positive effect of cover crops (mainly annuals) in intrapedal porosity was detected.

The low values in macroporosity in all the treatments (<10%) indicate a generalized compact soil according to Pagliai & Vignozzi (2002) which is due to the poor condition of gypsiferous soils. Brachypodium treatment reduced TP and therefore, increased BD. Similar soil compaction at 0-10 cm depth by a permanent spontaneous vegetation was found by Zucca *et al.* (2013) and Palese *et al.* (2014). Palese *et al.* (2014) also found a reduction in macroporosity in conventional tillage regarding spontaneous vegetation at 10-20 cm depth, but not at 0-10 cm, similar to our results. Micropores are responsible for the water holding capacity of soil, thus an increase of this parameter by cover crops is crucial to improve water storage.

At the same time that Brachypodium reduced TP, increased AWC (9 %) although not statistically differences appeared. If the trend to increase AWC continues, as a result of changes in soil management at medium to long-term, more water storage capacity for rainfed olive trees will be available in permanent cover crop.

4.5. Infiltration and soil volumetric water content

Scant infiltration measured in all the treatments was related to the high silt content that slow down the infiltration rate (Bagarello *et al.* 2016) and the low macro and mesoporosity, which are directly involved in water fluxes within the soil (Palese *et al.* 2014). The absence of differences in macro and mesoporosity and intrapedal porosity between cover crops and control led to no significant differences in infiltration rates. Infiltration depends on soil texture among other parameters, this is the reason because other

researchers found a significant low infiltration in tilled soils regarding cover crops in clay soils, vertic in Gómez *et al.* (2004) and *Haploxeralf* in Gucci *et al.* (2012).

Despite similar porosity and infiltration rates between cover crops and control, a different behavior in water storage was recorded at 15 and 30 cm depth between treatments. θ at 15 cm was higher in all seasons regarding 30 cm depth except for sainfoin, due the taproot system of sainfoin (Koivisto 2001) that allows a deeper water infiltration. Because of the greatest root activity of rainfed olive trees is ranged between 0.15 and 1.00 m in depth as was mentioned previously, water stored at 30 cm is more important for olive trees water status and nutrition. Control was the soil management with the lowest θ at 30 cm depth in every season, showing the greatest differences regarding cover crops in winter (14 to 43 % more θ in cover crops) and spring (36 to 55 % more θ in cover crops). Similar results were reported by Gucci *et al.* (2012) at 60 cm depth. Two of the periods of high sensitivity to water stress in olive tree happen during spring, blooming and fruit growth (Fernández 2014), thereby an increase in water availability for the trees could improve fruit yield and reduce the alternate bearing. Brachypodium treatment had the highest θ in all the seasons, followed by both annual cover crops. Soil under Brachypodium management did not suffer of soil disturbance (tillage) since the cover crop seeding (November 2010); thus, soil structure and pores connection have developed more in the permanent than in annual cover crops, allowing a better water storage in the soil profile. These results are similar to those found by Palese *et al.* (2014) who reported a better autumn-winter rainwater storage in the soil with sustainable systems. The differences between annual cover crops are caused by the different root system, fasciculated in barley and taprooted in sainfoin, thus water can move faster and deeper into the soil in the legume treatment. These results question the generalized idea of land farmers that tillage increases soil water content.

4.6. Soil penetration resistance

Brachypodium was the treatment with the highest PR in the surface layer (0-10 cm), which responds to the high RD and low porosity measured, as was described by Pagliai & Vignozzi (2002). Below this layer, barley and control

quickly increased PR, indicating a great soil compaction of the deepest layers. PR scarcely increased in the deepest layer in Brachypodium and sainfoin, indicating higher values of porosity than in the topsoil and thus, more storage pores as reflected the highest θ at 30 cm depth.

4.7. Further considerations

The improvement in different parameters of soil quality due to the permanent cover crop, *Brachypodium distachyon*, are due to the character of permanent of this coverage. Soil under this management did not suffer of disturbance (tillage) since the cover crop seeding, except mowing in spring. This absense of soil alteration can be reach with other coverages as seeding glovers (Fleskens & Stroosnijder 2007) or spontaneous groundcover (Espejo-Pérez *et al.* 2013).

No differences between treatments were found in fruit or oil yield in the tree cropping seasons studied or in the Virgin Olive Oil quality (Sastre *et al.* 2016).

5. Conclusions

After three years of soil management in a rainfed olive grove, cover crops have slightly improved soil quality parameters regarding a single tillage. These feeble results can be explained by the fragile and easily degraded gypsiferous soils and the aridity of the climate of the study area, that delayed in time the positive effects on soil quality of cover crops reported in other studies. Despite that, the result of this study point to that a change from tillage to cover crops would increase soil quality through two ways: 1) increasing SOC, C-POM, SN, that recover soil fertility; and 2) improving soil structure, that lead to more water storage and consequently water available for olive trees. Brachypodium, the permanent cover crop, with the practically absence of soil disturbance since the seeding in 2010, got the better results in most of the soil quality parameters studied.

Water is the main limiting factor for olive yield in traditional olive groves in semiarid areas. Therefore SLM practices properly applied, as cover crops, not only will redound in environmental benefits but in more water and nutrients

availability for olive trees, and thus could increase olive yield and reduce alternate bearing.

More years with the same soil managements are needed to find out if the trends seen in this study consolidate in the future, in order to persuade rainfed olive growers to adopt cover crops as an alternative to the conventional tillage in semiarid areas.

Acknowledgements

Funding: This work was supported by the Institute for Rural, Agricultural and Food Research and Development of Madrid-IMIDRA [project FP12-CVO] and the Consejería de Juventud, Educación y Deporte of Comunidad de Madrid and co-funded by the ESIF [project AGRISOST-CM (S2013/ABI-2717].

Capítulo 5

Influencia de las distintas cubiertas respecto al laboreo sobre la producción del olivar y la calidad analítica y sensorial del VOO

Este capítulo reproduce íntegramente el texto del siguiente manuscrito:

Blanca Sastre, M. Ángeles Pérez-Jiménez, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz, Cristina de Lorenzo. The effect of soil management on olive yield and VOO quality in a rainfed olive grove of Central Spain. *Journal of Chemistry*, 2016, Article ID 4974609, 15 pp. doi: 10.1155/2016/4974609

(ver Anexo 1)

Resumen

Los olivares de secano se han manejado tradicionalmente con laboreo para reducir la competencia por el agua y los nutrientes. En los olivares mediterráneos en pendiente esta práctica ha conducido a altas tasas de erosión, resultando en una reducción de la fertilidad del suelo. Las cubiertas vegetales se han empleado como un manejo sostenible del olivar, pero estudios previos han encontrado efectos diferentes sobre la producción de fruto y hay escasa información de su influencia sobre la calidad del Aceite de Oliva Virgen (VOO). El objetivo de este estudio es evaluar el efecto de los distintos manejos del suelo en la producción de aceitunas y de aceite y en las características físico-químicas y sensoriales del VOO en un olivar de secano (238 árboles ha^{-1}) de la variedad Cornicabra, la principal de la zona centro de España. No se ha encontrado ningún efecto del manejo del suelo en la producción de aceituna ni de aceite durante tres campañas agrícolas. La calidad del VOO fue principalmente influenciada por la campaña, pero pequeñas diferencias han aparecido en los años más secos entre los tratamientos estudiados. Se encontraron pequeñas diferencias en el índice de madurez, los pigmentos y algunos ácidos grasos así como en parámetros sensoriales.

Palabras clave: cubiertas vegetales, laboreo, polifenoles, pigmentos, ácidos grasos.

Abstract

Rainfed olive groves have been traditionally tilled in order to reduce the competition for water and nutrients. In sloping Mediterranean olive groves, this practice leads to high erosion rates, resulting in a reduction in soil fertility. Cover crops have been employed as a sustainable olive grove management, but previous studies found differences in their effect on fruit load and there is scarce information of their influence on the virgin olive oil (VOO) quality. The aim of this study is to evaluate the effect of different soil managements on olive and oil yield and VOO physicochemical and sensory characteristics in a rainfed olive grove (238 trees ha^{-1}) of Cornicabra cultivar, the main in Central Spain. No effect of soil management was found in olive or oil yield along three cropping seasons. VOO quality was mainly influenced by the year, but slight differences were found in the driest year between the studied treatments. Small differences in fruit ripening, pigments and several fatty acids as well as in sensory parameters were found.

Keywords: cover crops, tillage, polyphenols, pigments, fatty accids.

1. Introduction

Olive tree (*Olea europaea* L.) is one of the most drought tolerant tree crops in the world (Connor & Fereres 2005). They are able to tolerate low availability of soil water by means of morphological and physiological adaptation (Connor 2005, Tataranni *et al.* 2015). Three periods of high sensitivity to water stress can be considered (Fernández 2014): flowering; fruit growth, 6 to 10 weeks after blooming; and oil accumulation, 18 to 22 weeks after blooming. Water stress in the first period reduces the number of fruits, while water stress in the other two periods reduces fruit fresh weight. A positive relationship between water stress of olive trees and phenolic compounds (Patumi *et al.* 2002, Gómez-Rico *et al.* 2006), volatile profile (Servili *et al.* 2007, Gómez-Rico *et al.* 2009), monounsaturated fatty acid levels, and sensory properties (Berenguer *et al.* 2006) of olive oil has been described.

In the Mediterranean basin, rainfall and underground water resources are the only supplies for most of the olive trees (Palese *et al.* 2010). In this area, traditional olive groves were designed with low plant density according to total rainfall and paying attention to canopy size (Connor 2005). Actually around 50% out of 2,500,000 ha of olive groves in Spain is tilled (MAGRAMA 2013) to avoid weed competition for water and nutrients, in order to increase olive tree yield. This conventional practice gives rise to a large area of bare soil that is prone to erosion processes, one of the most important land degradation driving processes in Mediterranean areas (Panagos *et al.* 2014, EEA 2015).

Cover crops in olive groves have proved to be an effective tool in reducing soil erosion (Fleskens 2007, Gómez *et al.* 2009a, Kairis *et al.* 2013) and improving water storage and physical properties (Palese *et al.* 2014), but its effect on olive tree yield is controversial. A negative effect on fruit yield due to cover crops was reported by Gucci *et al.* (2012) in a high density olive grove and by Caruso *et al.* (2011) in a young and intensive olive grove. Nevertheless, other authors (Gómez *et al.* 1999, Corleto & Cazzato 2008, Ferraj *et al.* 2011, Palese *et al.* 2014) did not find a significant reduction in olive yield in mature olive groves.

The influence of cover crops on food quality has been studied in vineyards (Lopes *et al.* 2008, Ruiz-Colmenero *et al.* 2011, Perez-Alvarez *et al.* 2015, Jordan *et al.* 2016, Karl *et al.* 2016), apple orchard (Kuhn & Pedersen 2009), eggplants (Radicetti *et al.* 2016), and sweet cherries (Usenik *et al.* 2009). In olive groves, the influence of soil management on some oil quality parameters has been seldom studied (Corleto & Cazzato 2008, Huqi *et al.* 2009, Caruso *et al.* 2011, Gucci *et al.* 2012) and to our knowledge there are no previous studies on the effect of cover crops on sensory characteristics of virgin olive oil.

Cornicabra cultivar is the most common in Central Spain, being the second cultivar in extension in Iberian Peninsula (Rallo *et al.* 2005) covering over 270,000 ha (Barranco *et al.* 2005). Although Cornicabra cv. is considered one of the most drought-tolerant cultivars in Spain (Barranco *et al.* 2005), small amounts of water increase olive and oil yield (Gómez-Rico *et al.* 2007, del Rio & Vallejo 2012). The oil of Cornicabra is valued for its high stability and food sensory characteristics (Salvador *et al.* 2001b), with medium bitterness and pungency mainly due to the content in total phenols (Uceda *et al.* 2008) and high oleic acid and low linoleic acid content (Salvador *et al.* 2001a). Phenolic compounds, oleic acid, and monounsaturated fatty acids (MUFA) of VOO have beneficial effects on human health (López-Miranda *et al.* 2010), and thus a higher content in total phenols and a high ratio of MUFA to polyunsaturated fatty acids (PUFA) are desirable in VOOs.

In order to recommend a more sustainable practice to rainfed olive growers of Central Spain, we performed a comparative trial in an intensive olive grove of Cornicabra cv. to evaluate the effect of three different cover crops and minimum tillage on olive yield and physicochemical and sensory virgin olive oil parameters.

2. Materials and Methods

2.1. Field Conditions, Climatic Data, and Plant Material

This study was performed in an experimental olive grove (*Olea europaea* L.) located in Central Spain, in southern Madrid (40º4’21’’N, 3º31’11’’W).The average elevation is 540 m.a.s.l., and the slope ranges from 9 to 12%.The soil

is classified as *Haplic Gypsisol* (IUSS Working Group WRB 2014), with a xeric moisture regime. The field capacity (FC) was 0.21 $m^3 \cdot m^{-3}$ and permanent wilting point (PWP) was 0.08 $m^3 \cdot m^{-3}$.This soil has a moderate silt content (29%) and it is low in organic matter (1.1%).

The climate is semiarid Mediterranean, with long hot summers (quite often above 35ºC in July and August) and cold winters (2.7ºC on average in December). The average annual temperature is 13.6ºC and reference evapotranspiration (ET_0) is 1112 mm. The annual precipitation is approximately 390 mm with high inter- and intra-annual variability (Elías-Castillo & Gimenez Ortiz 1965, Urbano 1992). During the last 17 years, the total precipitation has strongly decreased (40%) in comparison with a previous period (1933–1969) in the study area (García-Díaz *et al.* 2015). Since it is a rainfed olive grove, as most of the region, the amount and distribution of rainfall and ET_0 are very important. Thus, there is an automatic weather station in the olive grove to record the temperature, rainfall amount, relative humidity, solar radiation, wind speed and direction, and atmospheric pressure every 10 minutes. With the previous data, Penman-Monteith ET_0 was calculated according to FAO (Allen *et al.* 1998).

The olive plantation was established in 2004 with trees in 6 × 7m spacings (238 trees·ha^{-1}), with an area of approximately 3 ha.

2.2. Soil Management and Treatments

Before the start of the trial, in November 2010, the whole area was tilled with a chisel at 0.30 m depth following the traditional management. The tillage was performed in 6 m wide interrows. Each treatment was performed in 3 consecutive interrows. The treatments consisted of the following: (1) barley annual cover (*Hordeum vulgare* L.) that was seeded each autumn at 70 kg·ha^{-1}; (2) sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.), a legume that was seeded each year (42 kg·ha^{-1}); (3) purple false brome (*Brachypodium distachyon* L. P. Beauv.), henceforth Brachypodium, a permanent grass cover seeded once (the first year) during the study period at 40 kg·ha^{-1}; and (4) control, consisting of one pass per year with a chisel at 0.15–0.20 m deep in mid-November. All of the treatments were mechanically mowed once in the spring (during the first fortnight of May), except in 2013, when the

vegetation was mowed twice (the second cut was at the end of May) because of high vegetation growth resulting from the abundant rains of that spring. Plant debris was left on the surface.

2.3. Soil Moisture Measurements

Three EC-5 soil moisture sensors (Decagon Devices Inc.) per treatment were placed in the interrow at 30 cm depth plugged into a data logger, which recorded data each 15 minutes. Data were fortnightly downloaded to a laptop.

2.4. Olive Harvesting, Yield and Oil Elaboration, and Oil Content Determination

Fruit olives were harvested in three consecutive cropping seasons: 2011/2012, 2012/2013, and 2013/2014. Ten healthy olive trees per treatment were randomly selected each year and fruits were hand-picked, when the maturity index (MI) was around 3.5.This MI was selected in order to obtain an optimal oil content and quality (Beltrán *et al.* 2008). Yield per tree was measured in field. Olives collected of the same treatment were mixed up and 3 subsamples of 5 kg (3 subsamples × 4 treatments) were carried to the laboratory. MI was determined at the laboratory for each subsample of fruits following the method of Beltrán *et al.* (2008) based on skin and pulp fruit colors. Olive oils from each subsample were extracted in the last two years using the Abencor system (MC2 Ingenierias y Sistemas), determining the industrial oil yield (Martínez Suárez *et al.* 1975). Oil yield per hectare was obtained multiplying fruit yield per tree by industrial oil yield by the number of trees per hectare.

2.5. Analysis of Virgin Olive Oil

In 2012 and 2013, different VOO parameters (2 years × 4 treatments × 3 repetitions) were analyzed.

2.5.1. Physicochemical Quality Parameters

Free acidity is expressed as percentage of oleic acid; peroxide value (PV) is expressed as milliequivalents of active oxygen per kilogram of oil (meq O_2

kg^{-1}); and UV spectrophotometric indices (K_{232}, K_{270}, and ΔK extinction coefficients) were determined following the analytical methods described in the European Commission Regulation 2568/91 and later amendments (DOUE of 11 July 1991).

2.5.2. Total Phenolic Content

Total phenolic compounds were determined after methanol extraction and subsequent reaction with Folin-Ciocalteu reagent and measured at a wavelength of 725 nm (Vázquez Roncero *et al.* 1973). Results are expressed as mg of caffeic acid equivalents per kg of oil.

2.5.3. Pigments (Chlorophylls and Carotenoids) and Chromatic Coordinates

Carotenoids and chlorophylls were determined at a wavelength of 470 and 670 nm, respectively, in cyclohexane, according to the method of Minguez-Mosquera *et al.* (1991). The concentrations of chlorophyll and carotenoids were expressed as mg of pheophytin and lutein per kg, respectively. Chromatic coordinates were measured by the software CINTRAL to obtain the color according to the CIEL a^* b^* method (Standard UNE 72031:1983, of 15 April 1983).

2.5.4. Fatty Acid Composition

The fatty acid composition of the oils was determined by gas chromatography as fatty acid methyl esters (FAMEs). FAMEs were prepared by saponification/methylation with sodium methylate according to European Regulations (EEC 2568/91) of 11 July 1991. A chromatographic analysis was performed in an Agilent Technologies 6850 series II Network GC system gas chromatograph equipped with a 60m × 0.25mm × 0.20 µm film thickness fused capillary column Supelco 24111 (Agilent Technologies) coupled to a flame ionization detector. Samples were introduced into the column at 170ºC during a period of 30min; after this time, the temperature was increased by 5ºC/min to 200ºCand maintained for 12min. The flow rate of He, used as carrier gas, was 0.5 mL/min. Injector and flame ionization detector temperatures were 230ºC and 250ºC, respectively. FAMEs were identified by comparing their retention times with those of standard compounds.

Fatty acid composition was calculated as the percentage of total fatty acids, after their conversion to methyl esters, according to Regulation EEC 2568/91 (DOUE of 11 July 1991).

2.5.5. Sensory Analysis

Sensory analysis was performed by the "Panel de Catadores de Aceite de Oliva Virgen de la Comunidad de Madrid," according to the method described in the European Commission Regulation (EC) 640/2008 (DOUE of 5 July 2008). This method allows for the classification of VOOs based on the detection of negative attributes (fusty/muddy, musty, winey, rancid, wet wood, and others) as well as the measurement of the intensity of three positive attributes (green or ripe fruitiness, bitterness, and pungency).The panel was constituted at least by 8 trained tasters that scored the descriptors on a normalized sheet (from 0 to 10).

Chemical determinations were performed twice per sample, obtaining the mean for statistical analysis.

2.6. Statistical Analysis

Statistical analyses were performed with the software package SPSS 19 (IBM Corp. 2010) for Windows. When needed, data were log-transformed before parametric testing. Repeated-measures ANOVA was performed for yield data and MAN(C)OVA analyses were performed on the VOO data to assess the differences between treatments and years, employing MI as covariate. LSD test ($p < 0.05$) was used to establish significant differences between groups.

After MANOVA a Discriminant Function Analysis was performed to assess how the dependent variables discriminate groups.

3. Results and Discussion

3.1. Meteorology and Soil Water Content

Year 2012 registered the lowest total rainfall amount in the studied period (237 mm) while 2011 and 2013 were quite similar, 292 and 300 mm, respectively. Distribution of the rainfall varied among years: autumn was the rainiest season in2011 and2012, while in 2013 spring was the rainiest (Figure 5.1). Reference evapotranspiration (ET_0) values were similar among the three years: 1209, 1217, and 1218 in 2011, 2012, and 2013, respectively. Summers have been characterized by high ET_0 and scarce rainfalls.

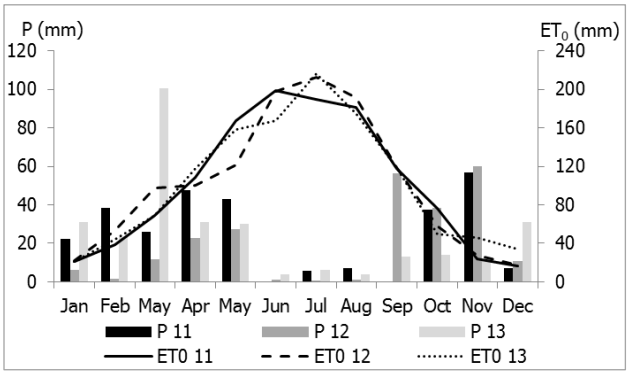


Figure 5.1. *Monthly rainfall (P) and reference evapotranspiration (ET_0) for the 3 years of the trial.*

Control was the treatment with the lower soil moisture at 30 cm depth along the three years. During the rainfalls of spring in 2011 and 2013, these differences decreased; the same happened with the autumn rainfall in 2012 (Figure 5.2). In summer, all the treatments endured several days below the PWP ($0.08 m^3 \cdot m^{-3}$), mainly in 2011, which implied water stress to the olive trees in the phase of oil accumulation (Fernández 2014).

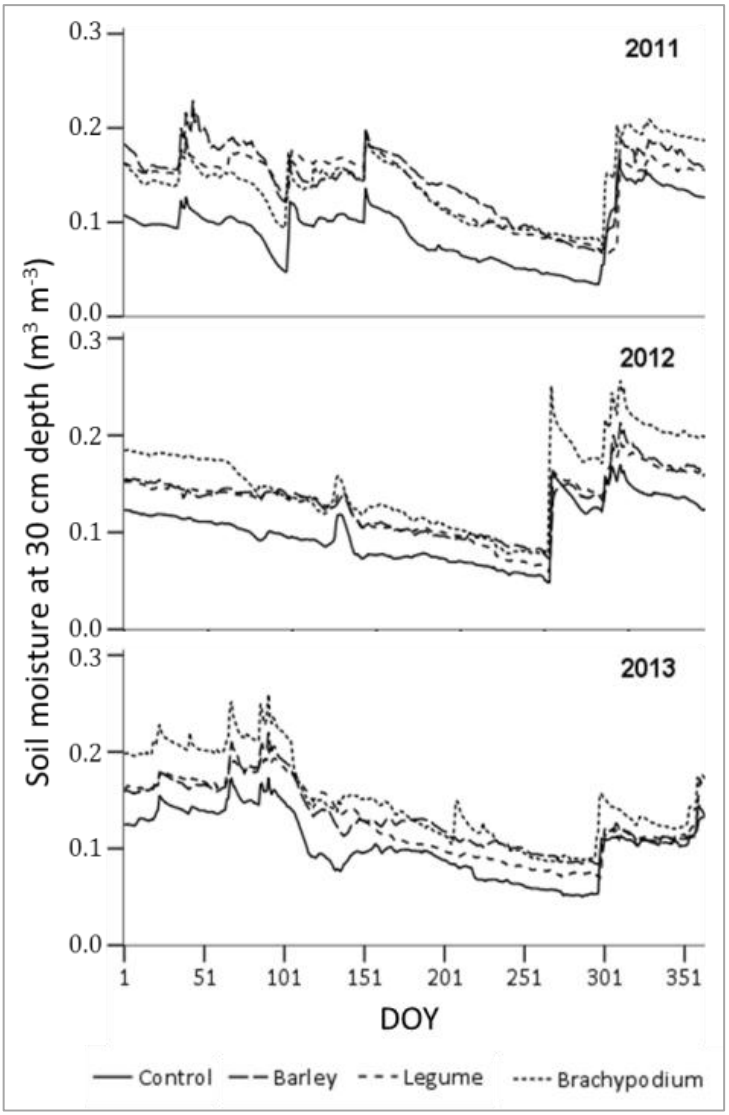


Figure 5.2. *Daily soil moisture (m^3 m^{-3}) at 30 cm depth in 2011, 2012 and 2013 for the four treatments. DOY: Day of the Year.*

3.2. Fruit and Oil Yield

Olive harvest dates were quite similar, 1 December 2011, 11 December 2012, and 2 December 2013. MI was around 3.5 in 2011 and 4 in 2012. In 2013, we had to harvest with a low MI, about 3, because of frost alert at the beginning of December. Despite the low soil moisture measured during all the studied

period in all the treatments, thanks to the olive tree high capacity to cope with water stress (Moriana *et al.* 2007), especially in Cornicabra cv. (Barranco *et al.* 2005), olive trees under semiarid climate without irrigation have low fruit production on a year basis. Mean and standard deviation of fruit yield per tree and oil yield per hectare are shown in Figures 5.3a and 5.3b. 2013 was the year with the highest yield in both parameters (9.1 kg·tree^{-1} of fruit and 476 kg·ha^{-1} of oil on mean), whereas 2012 was the year with the lowest yield (1.6 kg·tree^{-1} of fruit and 90 kg·ha^{-1} of oil on mean) being considered as "off" year (low or no yield). Fruit and oil yields were affected by year but not by treatment; no interaction was detected (Table 5.1). There were statistically significant differences between the three crop seasons in both fruit and oil yield (2012 < 2011 < 2013) according to LSD test. This alternate bearing is typical of olive tree, mainly in Cornicabra cultivar (Barranco *et al.* 2005), with high yields in the "on" years (heavy yield) followed by "off" years of low yields.

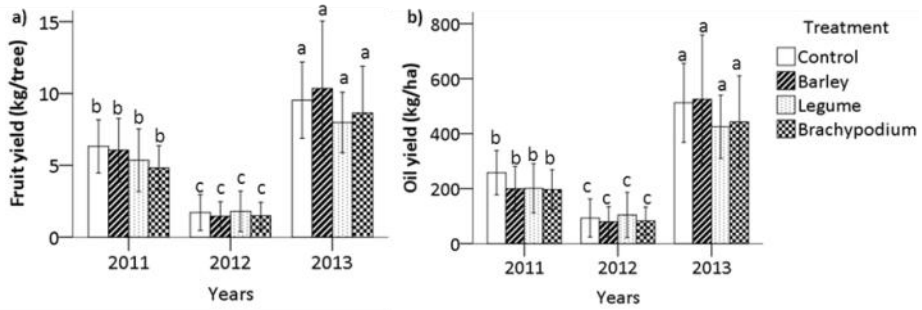


Figure 5.3. *Fruit yield (a) and Oil yield (b) mean and SD for the three years. Data are means of 10 replicates. Different letters mean statistically significant differences (p<0.05) among years.*

This absence of differences in fruit and oil yield among different soil management systems was also observed by other researchers between tilled and non tilled (Gómez *et al.* 1999, Ferraj *et al.* 2011, Palese *et al.* 2014, Simoes *et al.* 2014) and rainfed and irrigated olive groves in Cornicabra cv. (Gómez-Rico *et al.* 2007). By contrast, Moriana *et al.* (2003) found a reduction in Picual cv. under water stress and Caruso *et al.* (2011) reported over 40% olive yield reduction in young trees of Frantoio cv. managed with cover crops regarding tilling management. Corleto & Cazzato (2008) found a reduction in fruit yield with perennial species as cover crops but not with

annual legume species regarding conventional tillage on Coratina cv. Therefore, proper management of cover crops is crucial to avoid fruit yield reductions, mainly species selection and time of mowing.

Table 5.1. *Repeated-measures ANOVA table (prob>F) for fruit yield per tree and oil yield per ha for the three years (n=10).*

	Fruit yield	Oil yield
Treatment	ns	ns
Year	<0.001	<0.001
Treatment x Year	ns	ns

ns: not significative

3.3. VOO: Physicochemical Parameters

All the VOO samples had their analytical parameters within the ranges established for the highest quality category "Extra Virgin Olive Oil" in the Regulation 1348/2013 of 17 of December of 2013.These thresholds are 0.8% for acidity, 20 meq $O_2 \cdot kg^{-1}$ for peroxides, 2.50 for K_{232}, 0.22 for K_{270}, and 0.01 for ΔK.

MANOVA results are shown in Table 5.2 for the physicochemical determinations in the VOOs of 2012 and 2013. MI was included as a covariate due the important effect of this index over several VOO parameters (Gómez-Rico *et al.* 2006, Gómez-Rico *et al.* 2007, Trentacoste *et al.* 2010) but in our study it was not statistically significant on either of the measured variables (data not shown), so it was excluded as a covariate and included as a dependent variable in the analysis. Treatment and year influenced significantly most of the measured parameters (Table 5.2).There was no statistically significant effect of treatment or year in peroxide index or K_{270}, while K_{232} and ΔK were only affected by the year.

Table 5.3 shows VOO parameters as a function of the treatments and years. In relation to the effect of the different treatments on the fruit, legume coverage led to earlier olive maturation (3.7) with barley resulting in the opposite effect (3.3). Control and Brachypodium VOOs had slightly higher values of free acidity (0.22 and 0.21%, resp.), but these differences were not due to the maturity of the VOOs considering that both treatments had intermediate maturity (3.5).

Table 5.2. MANOVA (prob>F) for VOO parameters as a function of treatment and year (n=3).

	MI	Quality parameters					TP	Pigments				Color		
		Ac	Pe	K_{270}	K_{232}	ΔK		CarP	ChloP	Pi	Chlo/Car	L*	a*	b*
Treatment	0.000	0.005	ns	ns	ns	ns	ns	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000
Year	0.000	0.000	ns	ns	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Tre x Year	ns	0.001	ns	ns	ns	ns	0.001	ns	ns	ns	0.004	ns	0.047	0.000

MI: Maturity Index; Tre x Year: treatment and year interaction; Ac: free fatty acids; Pe: Peroxide index; TP: Total phenols; CarP: Carotenoid pigments; ChloP: Chlorophyll pigments; Pi: Total pigments; Chlo/Car: Chlorophyll/Carotenoid ratio. ns: not significative.

Table 5.3. VOO parameters LS means from the MANOVA as a function of the different treatments and years (n=3).

	MI	Quality parameters					TP	Pigments				Color		
		Ac	Pe	K_{270}	K_{232}	ΔK		CarP	ChloP	Pi	Chlo/Car	L*	a*	b*
Treatment														
Control	3.5b	0.22a	3.8a	0.13a	1.68a	-0.001a	414a	7.9b	10.4b	18.4b	1.1c	84.4ab	-11.6b	94.1b
Barley	3.3c	0.20b	4.2a	0.13a	1.68a	-0.001a	394a	9.4a	13.7a	23.1a	1.3a	82.7c	-11.9b	104.6a
Legume	3.7a	0.20b	3.5a	0.12a	1.69a	-0.001a	412a	6.9c	9.6b	16.5b	1.2bc	85.7a	-10.5a	85.4c
Brachypodium	3.5b	0.21a	4.1a	0.14a	1.70a	-0.001a	424a	9.2a	12.6a	21.8a	1.2b	83.7bc	-12.3b	102.6a
Year														
2012	4.2a	0.26a	4.0a	0.13a	1.71a	-0.002b	479a	5.0b	4.1b	9.0b	0.8b	88.4a	-9.7a	80.4b
2013	2.8b	0.15b	3.8a	0.12a	1.67b	0.000a	343b	11.8a	19.1a	30.9a	1.6a	79.8b	-13.5b	113.0a

MI: Maturity Index; Ac: free fatty acids; Pe: Peroxide index; TP: Total phenols; CarP: Carotenoid pigments; ChloP: Chlorophyll pigments; Pi: Total pigments; Chlo/Car: Chlorophyll/Carotenoid ratio. Different letters in each column mean differences between treatments or years..

Regarding the pigments, legume VOOs had lower values for carotenoid, chlorophyll, and total pigments because of a higher MI similar to observations by other authors (Roca & Minguez-Mosquera 2001, Moyano *et al.* 2008); the highest chlorophyll to carotenoid ratio was found in barley (1.3) while control had the lowest (1.1). As control had the same MI as Brachypodium, the differences in pigment content should be explained through changes in the plant soil relationship produced by the soil management. VOOs obtained from legume coverage had a significantly higher value of color lightness (L^*) and lower value of greenish color (a^*) than the other treatments, which is due to the lower content in carotenoid and chlorophyll pigments (Escolar *et al.* 2007).

Comparing the results by year, MI was lower in 2013 than in 2012 despite an earlier ripening date in 2013 due to a higher fruit load of the trees, similar to the results of Dag *et al.* (2011). In 2012, VOOs had slightly higher acidity (0.26%) than in 2013 (0.15%) probably due to the higher MI. UV absorbance at 270 and 232 nm indicates the presence of oxidized compounds; some authors found that K_{270} and K_{232} increased with water stress (Barranco *et al.* 2005, Palese *et al.* 2010) as in the present study. The maximum level of total phenols accumulation is reached at veraison (Monteleone *et al.* 1998) that is closely related to the MI of VOOs in 2013, although the higher content in total phenols was in 2012. This contradiction could be related to the scarce precipitation of that year, as a linear relationship has been described between total phenols and water stress by some authors (Berenguer *et al.* 2006, Moriana *et al.* 2007). Nevertheless, Palese *et al.* (2008) stated that the differences in total phenols, K_{232}, and other quality parameters between rainfed and irrigated olive trees were due to the different plant crop load and fruit ripening pattern instead of water availability. VOOs of 2012 had a significantly higher value of color lightness and lower greenish color, with less content in carotenoids, chlorophyll, and total pigments and lower chlorophyll to carotenoid ratio than in 2013, which is related to a higher MI (Roca & Minguez-Mosquera 2001, Moyano *et al.* 2008).

Figure 5.4 shows the mean and standard deviation per treatment and year for those parameters with significant interaction. Free acidity (Figure 5.4a) was higher in control in 2012 regarding the other treatments, while in 2013 this place corresponded to Brachypodium. These changes were not

correlated with MI but they could be related to soil water content (Figure 5.2) and other changes in plant-soil relationship. Barley had a different behavior regarding total phenols (Figure 5.4b) in both years, the highest content in 2012 and the lowest in 2013. In 2013, no effect of treatment was observed in chlorophyll to carotenoid ratio (Figure 5.4c) and b^* (Figure 5.4e) parameters, while important differences between treatments appeared in 2012. These differences in total phenols and pigments may be responding to a higher water stress of barley on the driest year over the olive trees as was pointed out by Hernández *et al.* (2005). Regarding a^* parameter (Figure 5.4d), control and barley were more similar to legume in 2012 and to Brachypodium in 2013. These differences among treatments should be explained through the effect of cover crops on soil moisture dynamic along the crop season and available nutrients for olive trees, as was described in vineyards in which legume cover crops increased soil N availability and vine N uptake (Perez-Alvarez *et al.* 2015) affected must quality.

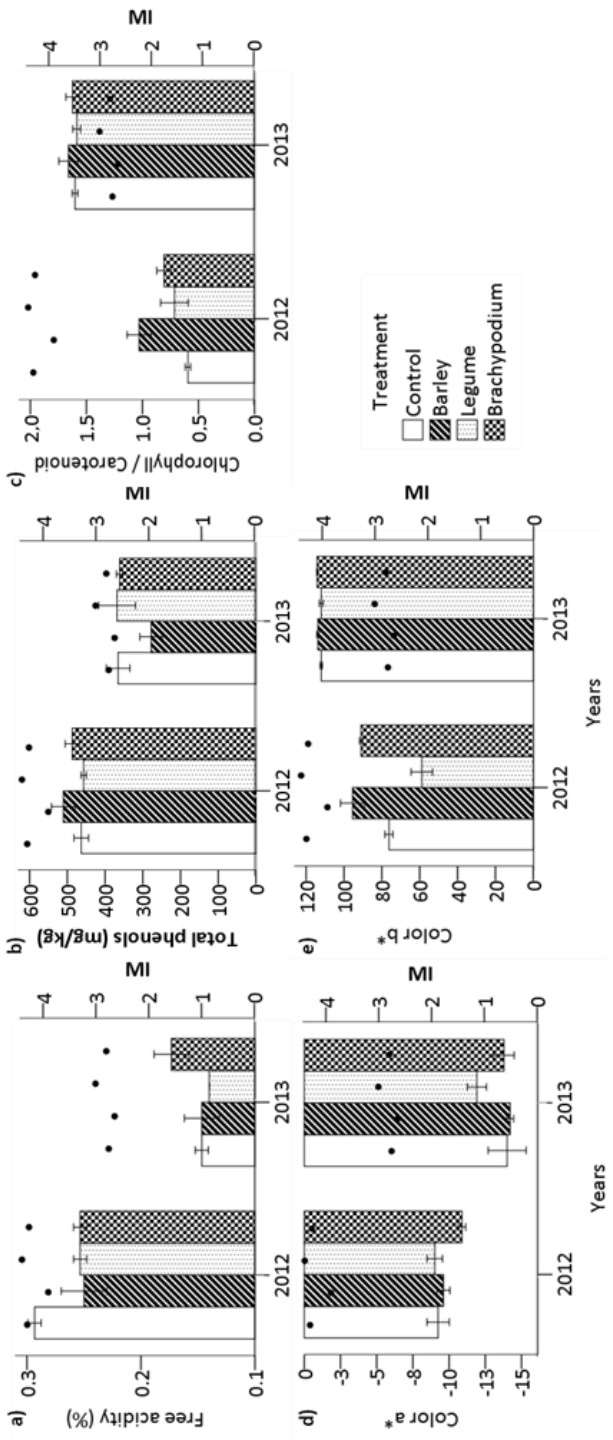


Figure 5.4. Free acidity (a), total phenols (b), chlorophyll to carotenoid ratio (c), color a* (d) and b* (e) mean and standard deviation and maturity index (MI) as dots, of different treatments and years.

3.4. VOO: Fatty Acid Composition

Most of the fatty acids were mainly influenced by year (Table 5.4) and not by soil management, as is the case of oleic acid, for instance, which remained stable across treatments. Similar results were also reported by other authors in relation to water stress (Gómez-Rico *et al.* 2007, Uceda *et al.* 2008) but oleic acid increases throughout fruit ripening involving a reduction in palmitic acid (Gómez-Rico *et al.* 2007). On mean oleic acid percentage (79.5%) was similar to Cornicabra olive oils described by other authors (Salvador *et al.* 2001b, Uceda *et al.* 2008), but with a lower percentage in linoleic acid (3.1%) similar to observations by Gómez-Rico *et al.* (2009). Margaric, stearic, linoleic, and linolenic acids were influenced by treatment besides the year. MUFA to PUFA ratio and oleic to linoleic acid ratio were influenced by treatment and year and by their interaction. Although these statistically significant differences were observed (Table 5.4), their magnitude was very low (Table 5.5).

Brachypodium and barley treatments give rise to oils with higher content of linoleic (3.18%) and linolenic (0.6%) acids, while control had higher content of margaric and stearic acids, 0.05 and 3.09%, respectively (Table 5.5).The highest rates in MUFA to PUFA and oleic to linoleic acid corresponded to legume, 23 and 27%, respectively, while Brachypodium had the lowest, 21 and 25%, respectively. Linoleic acid increases during ripening while stearic (Gutiérrez *et al.* 1999) and palmitic acids and MUFA to PUFA and oleic to linoleic acid ratios decrease (Roca & Minguez-Mosquera 2001, Rotondi *et al.* 2004). Nevertheless, these results do not match the MI of the different treatments: barley VOOs had lower MI, followed by control and Brachypodium and the most mature legume VOOs. Therefore, barley should have the highest stearic acid percentage and in fact it had the lowest value (2.85%), although this difference with the other VOOs was very low. In the same way, legume VOO should have lower MUFA to PUFA and oleic to linoleic acid ratios, but it was the treatment with the highest value. Gómez-Rico *et al.* (2007) found that MUFA to PUFA ratio was higher in oils obtained under rainfed conditions. Thus, legume could be exerting higher water stress on the olive trees, although it kept more soil water content than control (Figure 5.2), or legume cover could have a positive effect on the nutrients of

the soil (Perez-Alvarez *et al.* 2015, Rodrigues *et al.* 2015, Radicetti *et al.* 2016) influencing VOO fatty acids.

The most mature VOOs of 2012 had higher content of linoleic acid (Gutiérrez *et al.* 1999) and lower content of palmitic acid (Gómez-Rico *et al.* 2007). Stearic acid does not accumulate during the ripening process (Gutiérrez *et al.* 1999), which is the reason why the content in stearic acid in 2012, the year with the higher MI, was significantly lower than in 2013. MUFA to PUFA ratio was expected to be higher in water stressed olive trees (Gómez-Rico *et al.* 2007) but this fact was not observed between the driest 2012 and 2013 probably due to the predominant effect of maturity in olive fruits, as was pointed out by Dag *et al.* (2011).

Figure 5.5 shows mean and standard deviation for those parameters with significant interaction. Brachypodium VOOs had the highest palmitoleic acid content in 2012 (Figure 5.5a), and control VOOs of 2013 had the highest percentage of stearic acid (Figure 5.5b). The higher value of oleic to linoleic acid (Figure 5.5c) and MUFA to PUFA (Figure 5.5d) ratios was reached in 2013 by legume. The differences in parameters that were not explained by MI or soil water content could be related to changes in plant-soil relationships.

Table 5.4. MANOVA (prob>F) of Oil Fatty Acids (%) as a function of treatment and year (n=3).

	C14:0	C16:0	C16:1	C17:0	C17:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1	C22:0	C24:0	MUFA/ PUFA	Oleic/ Linoleic
Treatment	ns	ns	ns	0.049	ns	0.002	ns	0.034	0.003	ns	ns	ns	ns	0.005	0.002
Year	0.000	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028	0.000	0.000	0.006	0.000	ns	ns	0.000	0.000
Tre x Year	ns	ns	0.026	ns	ns	0.027	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0.010	0.018

Tre x Year: treatment and year interaction; Fatty acids: C14:0 myristic, C16:0 palmitic, C16:1 palmitoleic C17:0 margaric, C17:1 margaroleic, C18:0 stearic, C18:1 oleic, C18:2 linoleic, C18:3 linolenic, C20:0 arachidic, C20:1 gondoic, C22:0 behenic, C24:0 lignoceric. ns: not significative.

Table 5.5. Oil Fatty Acids (%) LS means from the MANOVA as a function of treatment and year (n=3).

	MI	C14:0	C16:0	C16:1	C17:0	C17:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1	C22:0	C24:0	MUFA/ PUFA	Oleic/ Linoleic
Treatment																
Control	3.5b	0.010	12.0	0.87	0.05a	0.08	3.09a	79.4	3.07ab	0.56b	0.43	0.27	0.12	0.05	22.3ab	26.0ab
Barley	3.3c	0.010	11.6	0.87	0.04b	0.08	2.85c	79.9	3.18a	0.59a	0.43	0.27	0.12	0.05	21.7bc	25.4b
Legume	3.7a	0.009	12.1	0.88	0.04ab	0.08	2.93bc	79.6	2.98b	0.56b	0.43	0.27	0.12	0.05	23.1a	27.0a
Brachypodium	3.5b	0.010	12.0	0.90	0.04ab	0.08	2.95b	79.3	3.18a	0.61a	0.44	0.27	0.12	0.05	21.3c	25.0b
Year																
2012	4.2a	0.014a	11.2b	1.00a	0.04b	0.07b	2.62b	80.1a	3.38a	0.64a	0.42b	0.29a	0.12	0.05	20.3b	23.7b
2013	2.8b	0.006b	12.7a	0.76b	0.05a	0.08a	3.29a	78.9b	2.83b	0.52b	0.45a	0.25b	0.12	0.05	23.9a	28.0b

MI: Maturity index; Fatty acids: C14:0 myristic, C16:0 palmitic, C16:1 palmitoleic C17:0 margaric, C17:1 margaroleic, C18:0 stearic, C18:1 oleic, C18:2 linoleic, C18:3 linolenic, C20:0 arachidic, C20:1 gondoic, C22:0 behenic, C24:0 lignoceric. ns: not significative.

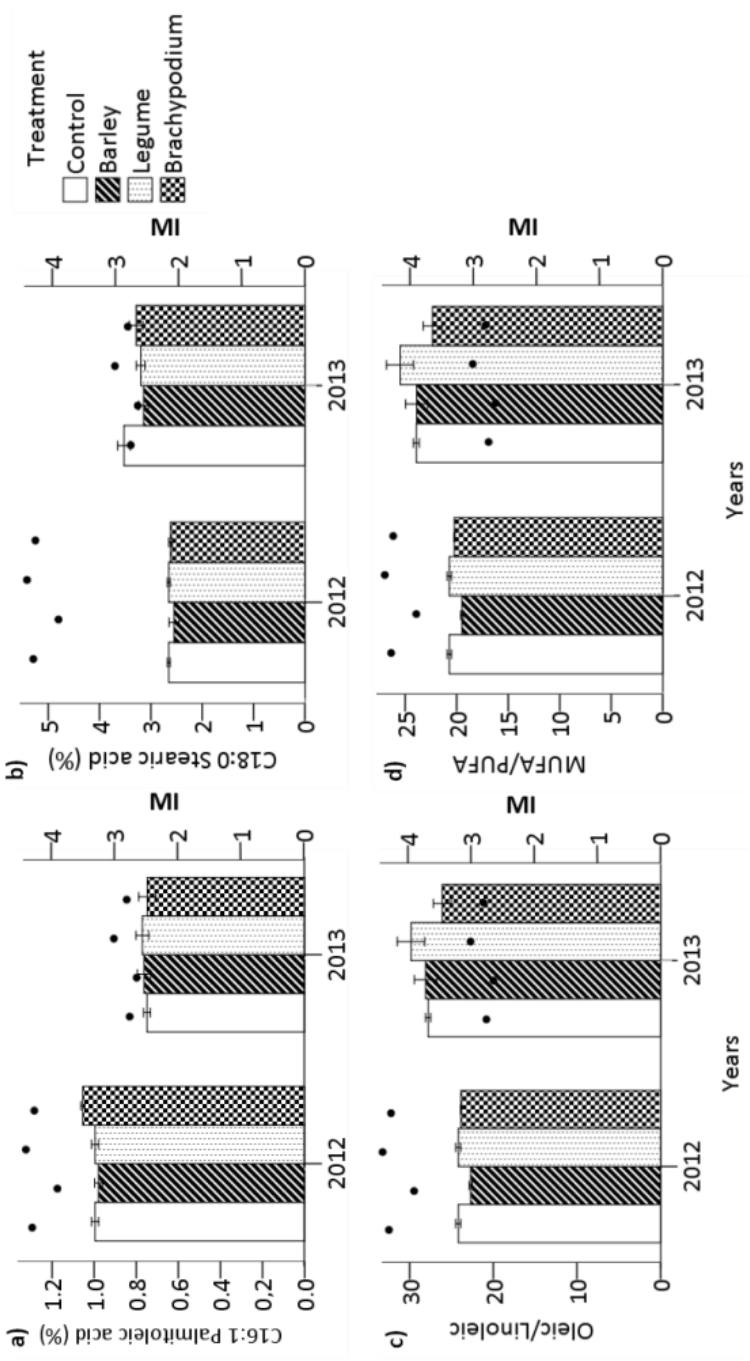


Figure 5.5. Palmitoleic (a) and Stearic (b) Acids, Oleic to Linoleic (c) and MUFA to PUFA (d) ratio mean and standard deviation and maturity index (MI) as dots of different treatments and years.

3.5. VOO: Sensory Analysis

As in previous parameters, year had a higher influence on bitterness and pungency than soil management (Table 5.6). Barley treatment produced slightly less bitter and pungent VOOs, over 1 point below the other VOOs. Fruitiness was not affected by treatments. In relation to year effect, in 2013, VOOs had around 3 points less in bitterness and pungency, but with similar fruitiness despite a lower MI in this year. These "sweeter" 2013 VOOs can be explained by the higher rainfall amount that year which produced a reduction in total phenols content (Table 5.3) as has been observed by other authors (Gómez-Rico *et al.* 2006, Palese *et al.* 2008).

Table 5.6. *VOO sensory characteristics LS means and standard deviation for treatments and years (n=3). Covariates appearing in the model are evaluated at the following values:* Maturity Index = 3.5.

	Fruity	Bitterness	Pungency
Treatment			
Control	3.9±0.2a	2.7±0.1b	3.9±0.2a
Barley	3.6±0.3a	1.9±0.2c	2.9±0.2b
Legume	3.7±0.3a	3.0±0.1ab	4.1±0.2a
Brachypodium	3.8±0.2a	3.1±0.1a	3.6±0.2a
Year			
2012	4.4±0.7a	4.1±0.4a	5.3±0.6a
2013	3.1±0.7a	1.3±0.4b	2.0±0.6b

Different letters in each column mean differences between treatments or years.

MANOVA results are shown in Table 5.7. Bitterness and pungency were influenced by treatment, by year, and by their interaction (Table 5.7). The interaction of treatment and year also was statistically significant for fruitiness.

Table 5.7. *MANOVA (prob>F) of VOO sensory characteristics as a function of treatment and year (n=3)*

	Fruity	Bitterness	Pungency
Treatment	ns	0.000	0.024
Year	ns	0.002	0.009
Treatment x Year	0.044	0.049	0.002

ns: not significative

Figure 5.6 shows mean and standard deviation of fruitiness (Figure 5.6a), bitterness (Figure 5.6b), and pungency (Figure 5.6c) of the oils for the

different treatments and years. Control treatment almost did not change fruitiness, bitterness, or pungency between years, opposite to cover crops VOOs that diminished 2 points in fruitiness in 2013 regarding the previous year. Brachypodium reduced less tan 1 point of the bitterness and pungency from 2012 to 2013, while legume slightly increased both parameters. In 2012, Brachypodium VOOs stood out among the other VOOs for higher bitterness and pungency, while in 2013 barley stood out for less bitter and pungent VOOs. Despite these statistically significant differences, their magnitude was not high enough to state that the VOOs were sensorially different.

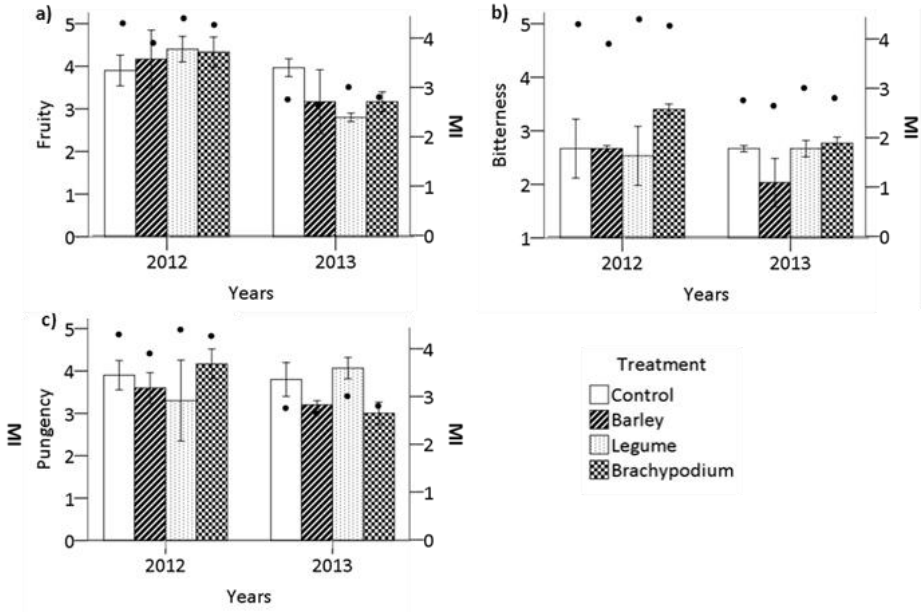


Figure 5.6. Fruity (a), bitterness (b) and pungency (c) mean and standard deviation and maturity index (MI) as dots, of different treatments and years.

3.6. Global Treatment Effect

The MANOVA was followed up with discriminant analysis employing all the variables. As previously mentioned, the main influence of the year on the VOO quality was due to a rainfall amount and crop load higher in 2013/2014 crop season. Due to this important effect of the year on the VOOs quality, discriminant analysis was conducted separately in each year (Figure 5.7). The most useful variables from all the measured ones to discriminate treatments

were MI, free acidity, total phenols, carotenoid and chlorophyll pigments, L^* and a^* color, MUFA to PUFA ratio, and pungency.

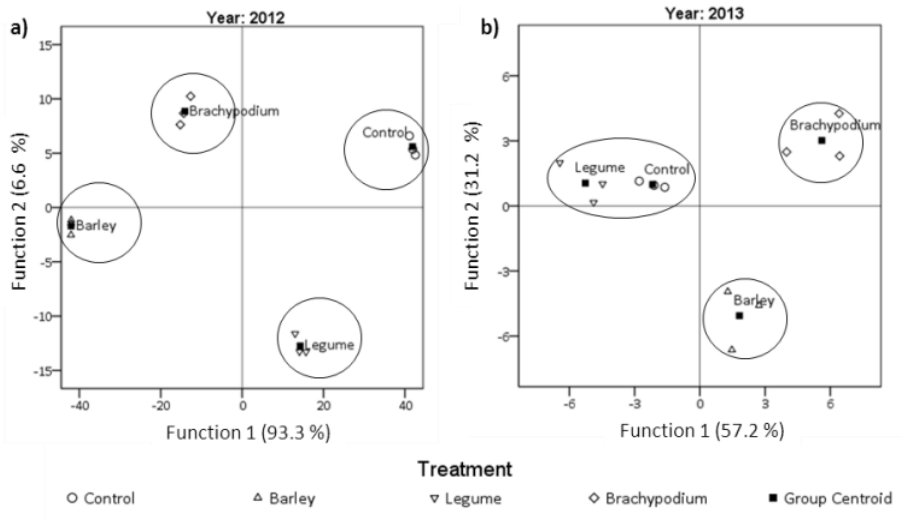


Figure 5.7. *Canonical discriminant functions of the VOOs from different treatments in 2012 (a) and 2013 (b) years. Amount of variability explained by each function in brackets.*

The differences in VOOs between treatments were greater in the driest year, 2012, as can be seen in the longer scale in both functions of this year (±40 in *x*-axis and ±15 in *y*-axis) regarding 2013 (±6 in *x* -axis and ±6 in *y* -axis). In 2012 (Figure 5.7a), the first discriminant functions explained 93.3% of the variance, canonical R^2 = 1.00, with a cumulative variance of 99.9% with the second, canonical R^2 = 0.99. The first axis separates control from barley VOOs. Control VOOs were characterized by high MI and free acidity, while barley VOOs were characterized by low MI and higher content of total phenols and carotenoid and chlorophyll pigments, but a low MUFA to PUFA ratio. The second axis differentiates Brachypodium with the greenish VOOs (low a^*) from legume VOOs with higher MI and less content of carotenoid and chlorophyll pigments.

In 2013 (Figure 5.7b), the first discriminant functions explained 57.2% of the variance, canonical R^2 = 0.96, with a cumulative variance of 88.4% with the second, canonical R^2 = 0.93. Legume and control VOOs were quite similar, characterized by a higher content in total phenols and MUFA to PUFA ratio. On the other hand, Brachypodium and barley VOOs had higher content of

carotenoid and chlorophyll pigments, but Brachypodium had more free acidity, greenish color, and lower MUFA to PUFA ratio; and barley VOOs were mainly characterized by low content of total phenols and "sweeter" oils.

The influence of water stress, fruit ripeness, crop load, and nutrient availability and their interactions could explain changes in VOO parameters between soil management treatments (Palese *et al.* 2008, Gómez-Rico *et al.* 2009, Palese *et al.* 2010, Dag *et al.* 2011). High contents of phenolic compounds, MUFA, and oleic acid have beneficial properties on health (López-Miranda *et al.* 2010), but, despite the statistically significant differences found in VOOs between treatments or years, they were too low to get involved in changes in the beneficial effect on health.

4. Conclusions

Our results support the adoption of cover crops as sustainable management of rainfed olive groves in Central Spain in the drought-tolerant cultivar Cornicabra. Cover crops have not reduced fruit or oil yield either in heavy or in low yield years. Thus, the economic profits of land farmers are maintained, while improving environmental benefits with reducing soil erosion and increasing soil organic carbon.

Virgin olive oil quality was mainly influenced by the year, but slight differences appeared in some physicochemical and sensory characteristics assigned to soil management. In the year with higher rainfall amount, with more soil water content in autumn and high fruit load, there were fewer differences between the treatments of cover crops and minimum tillage. Therefore, slight differences were found in VOOs in the driest year, which could be caused by differences in soil water availability and nutrient uptake by olive tree. More research is required to investigate the influence of cover crops on water and nutrients uptake in Mediterranean semiarid olive groves and their influence on the final product. To overcome the year-by-year differences due to the alternate bearing cycle of olive trees and annual variations of Mediterranean climate, more cropping seasons are needed to find out whether the trends seen in this study will consolidate in the future.

Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests regarding the publication of this paper.

Acknowledgments

This work was supported by the Madrid Institute for Rural, Agricultural and Food Research and Development (IMIDRA) under Grant FP12-CVO and S2013/ABI-2717 AGRISOST Projects.

Capítulo 6
Discusión general

El objetivo final de la investigación desarrollada en esta Tesis Doctoral era evaluar en un olivar de secano en suelo yesífero bajo clima semiárido:

1) la pérdida de suelo por erosión hídrica a escala de microcuenca de un olivar en pendiente con laboreo tradicional en un plazo medio de tiempo;

y el efecto de distintas cubiertas vegetales y del laboreo sobre:

2) las pérdidas de suelo por erosión,
3) la variación de distintos parámetros edáficos, y
4) la producción y calidad del Aceite de Oliva Virgen (VOO).

Se partía de la hipótesis de que la pérdida de suelo debida a las prácticas agrícolas tradicionales en los olivares de secano era muy elevada, y que las cubiertas vegetales podían ser una alternativa de manejo para reducir dicha erosión a la vez que mejorarían distintas propiedades del suelo, sin que afectaran significativamente a la cantidad y calidad del VOO. Esta hipótesis se ha cumplido en base a los resultados obtenidos en los distintos estudios desarrollados en el marco de esta Tesis Doctoral. En concreto, en el **capítulo 2** se ha constatado la elevada pérdida de suelo producida por el manejo tradicional con laboreo en cultivos leñosos ubicados en suelos yesíferos y que, junto a los sedimentos movilizados, se arrastra materia orgánica y nutrientes ocasionando un empobreciendo de las zonas donde se produce la erosión (artículo en revisión, Sastre *et al.* 2017b). En el **capítulo 3** se ha medido una importante reducción de la pérdida de suelo en todas las cubiertas vegetales estudiadas respecto al laboreo (más de un 40% de reducción), destacando la cubierta permanente con una reducción del 80% (Sastre *et al.* 2017a). En el **capítulo 4** se ha encontrado que las cubiertas anuales apenas han supuesto una mejora de las propiedades del suelo, aunque sí han aumentado el contenido de humedad a 30 cm. Esta ausencia de mejoras significativas en las propiedades del suelo por parte de las cubiertas anuales se ha achacado a las malas características estructurales de los suelos yesíferos y al clima semiárido, que ha impedido un buen desarrollo de estas cubiertas, ralentizando las mejoras en las propiedades del suelo. La cubierta permanente, sin embargo, ha tenido un claro efecto positivo con un incremento del carbono orgánico y nitrógeno total del suelo y la mejora de varias propiedades edáficas (aumento de la capacidad de agua disponible y

reducción de la resistencia a la penetración por debajo de 20 cm de profundidad), además de aumentar el contenido de agua en el suelo a 30 cm (Sastre *et al.* 2017c, en revisión). Por último, en el **capítulo 5** se ha comprobado que las cubiertas vegetales no alteran la cantidad y calidad del VOO (Sastre *et al.* 2016) aunque su efecto está condicionado por la cantidad de lluvia de la campaña, apareciendo pequeñas diferencias en algunos parámetros el año más seco. Los resultados obtenidos permiten recomendar el empleo de cubiertas vegetales para conservar el suelo como manejo alternativo al laboreo tanto a los olivicultores como a los técnicos que desarrollan y aplican normativa agraria para la protección del suelo en la zona centro, sin que haya pérdidas en la productividad del cultivo.

A continuación se discuten con más detalle la pérdida de suelo en olivares debida al manejo tradicional con laboreo, el efecto en la reducción de la pérdida de suelo del manejo alternativo con cubiertas vegetales, su efecto sobre las propiedades del suelo y sobre la cantidad y calidad del VOO y, por último, se exponen algunas consideraciones para la aplicación de esta medida en los olivares de la Comunidad de Madrid.

Pérdida de suelo en cultivos leñosos manejados con laboreo

La aplicación del método del ^{137}Cs para estimar la redistribución del suelo en la zona centro de España es algo novedoso, por lo que no existía información previa del contenido en ^{137}Cs de puntos de referencia, siendo éste un aspecto crítico para la aplicación de esta herramienta (Sutherland 1996). Se ha estudiado el perfil del suelo de dos puntos de referencia cercanos a la zona de estudio (Fig. 2.2), dando como resultado un contenido total de 1.001 Bq m^{-2} de ^{137}Cs concentrados en los primeros 15 cm del suelo, similar al contenido en puntos de referencia medidos por otros grupos en el noreste (Navas *et al.* 2007) y sur de España (Mabit *et al.* 2012). La deposición del radionucléido fue mayor en zonas donde las precipitaciones eran más altas (Zapata 2003), por ello los puntos de referencia caracterizados en la zona de estudio con una precipitación media de 395 mm se aproximaron a los 993 Bq

m^{-2} medidos en el punto de referencia del estudio de Navas *et al.* (2007) realizado en Aragón con 300 mm de precipitación.

Los tres modelos de ^{137}Cs empleados para la estimación de la redistribución del suelo en la microcuenca han ofrecido unos resultados similares entre sí, siendo los resultados del modelo más completo (MBM2) muy parecidos a los del MBM1, por lo que en caso de no tener toda la información para la aplicación del MBM2 se podría utilizar el MBM1, pero no es recomendable la aplicación del PM debido a la infraestimación de los resultados que ofrece (Tabla 2.3).

La pérdida neta de suelo estimada en la microcuenca a medio plazo (37 años) con el modelo MBM2 ha sido de 5,9 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ (Tabla 2.3), siendo la pérdida media en la zona de olivar en pendiente de 32 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ (Fig. 2.3c). Gran parte de los sedimentos movilizados en la microcuenca se han depositado en la zona llana con cereal con un patrón similar al descrito por Rabesiranana *et al.* (2016) ocasionando daños en el cultivo por aplastamiento. Un 32% del total de sedimentos han salido aguas abajo de la microcuenca produciendo otro impacto *off-site,* se han depositado en la carretera, por lo que tiene que ser limpiada periódicamente con el coste económico que ello implica. En otro casos los impactos *off-site* conllevan desde inundaciones de barro en infraestructuras y en parcelas aledañas, contaminación de masas de agua por arrastre de compuestos nitrogenados, colmatación de embalses y lagos, etc. (Boardman 2006, de Vente *et al.* 2008, Ledermann *et al.* 2010, Mullan 2013 y Molina-Navarro *et al.* 2014).

Dichas pérdidas de suelo se encuentran dentro de la media europea situada entre 3 y 40 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ (Verheijen *et al.* 2009), pero son claramente insostenible si se tiene en cuenta que la tasa media de formación del suelo a nivel mundial es de 0,15 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ (FAO and ITPS, 2015) o que el límite tolerable para la pérdida de suelo en Europa según Verheijen *et al.* (2009) se encuentra entre las 0,3 y 1,4 Mg ha^{-1} $año^{-1}$.

La pérdida de suelo estimada con el método del ^{137}Cs ha sido muy superior a la medida con parcelas de erosión en la misma zona de estudio: 6,8 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ en microparcelas de 1 m^2 (Tabla 3.3) durante 4 años, y 10,3 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ en las parcelas USLE de 80 m^2 (Bienes *et al.* 2000) a lo largo de 4 campañas. Por otro lado, en la misma parcela donde se ha estimado la

pérdida de suelo con el método del ^{137}Cs, en el año 2007 se evaluó una pérdida de suelo de 93,5 Mg ha^{-1} en una única tormenta de alta erosividad (P=43 mm, I=55 mm h^{-1}) (Bienes *et al.* 2012). Estos eventos de alta intensidad cada vez son más frecuentes en la zona centro de España (García-Díaz *et al.* 2015), aunque durante el periodo de estudio de esta Tesis Doctoral, no se ha registrado ningún evento lluvioso con una intensidad superior a 50 mm h^{-1} (Tabla 3.8). Estas diferencias en las estimaciones de pérdida de suelo entre los distintos métodos se deben a las limitaciones espaciales y temporales de las parcelas de erosión. A escala temporal, los ensayos en las parcelas de erosión suelen durar unos pocos años (García-Ruiz *et al.* 2017) por lo que los eventos extremos ejercen una gran influencia en los resultados obtenidos, aumentando sustancialmente la media si suceden en el tiempo de estudio, o infravalorando la pérdida si no se dan. La limitación debida al tamaño de las parcelas fue estudiada por Boix-Fayos *et al.* (2007). Los autores concluyeron que, a menor tamaño de parcela, la desconexión hidrológica con el sistema era mayor, con una menor energía en la escorrentía debido a las menores distancias que podía recorrer el agua y, por tanto, una menor fuerza de arrastre de sedimentos. De este modo, Poesen *et al.* (1994) determinaron que a escala de microparcela (< 1 m^2) solo se medía la pérdida de suelo producida por erosión laminar. Todo ello supone una limitación importante ya que la mayor parte de los sedimentos se arrastran en procesos de regueros y cárcavas según destacaron Valentin *et al.* (2005) y Gómez *et al.* (2014), aunque otros autores como García-Ruiz *et al.* (2017) defienden que las tasas de erosión se reducen según aumenta el área de experimentación, ya que hay una efectividad mayor de los sumideros de sedimentos en los fondos de valle y pies de ladera.

Como la erosión es un proceso selectivo, se han descrito frecuentemente cambios en la textura de los sedimentos (Martinez-Mena *et al.* 2001). En los sedimentos producidos por lluvias de intensidad media en esta Tesis Doctoral se ha medido una tasa de enriquecimiento de 1,6 en la fracción arcilla (<2 µm, Tabla 3.8), encontrándose una tendencia a un mayor enriquecimiento de partículas finas según aumentaba la intensidad de la lluvia (Tabla 3.7) como ya describieron Gómez *et al.* (2009a), Martinez-Mena *et al.* (2012) y Wang *et al.* (2014). En los resultados de pérdida de suelo a medio plazo se ha encontrado un enriquecimiento en la fracción limo dentro

de la zona de sedimentación (2-20 µm, Tabla 2.5) tal y como describieron Martinez-Mena *et al.* (2002) y Pieri *et al.* (2009) en lluvias de alta intensidad, siendo arrastradas las arcillas fuera de la microcuenca estudiada. El aumento de las fracciones finas a medida que aumenta la intensidad de las lluvias se explica por la rotura de los agregados por el impacto de la gota de lluvia (*splash*) siendo éste el principal mecanismo de erosión.

Los sedimentos movilizados además arrastran materia orgánica (Tablas 2.5 y 3.8) y nutrientes, como fósforo, magnesio y potasio (Tabla 2.5) debido a las asociaciones organo-minerales y a las uniones eléctricas con la fracción arcilla (Porta *et al.* 1999). El contenido en OC de los sedimentos obtenidos en las microparcelas ha sido de 1,5%, lo que implica una tasa de enriquecimiento de 2,4 similar a la tasa de 2,38 que encontraron Martinez-Mena *et al.* (2008), pero algo inferior al 1,8% de Marques *et al.* (2008) y superior al 1,21% de OC de Gómez *et al.* (2009b). Las lluvias de mayor intensidad condujeron a mayores pérdidas de OC (Tabla 3.8), como también indicaron Martinez-Mena *et al.* (2008) pero al contrario de lo descrito por Jacinthe *et al.* (2004) a escala de cuenca.

La pérdida de nutrientes por escorrentía también ha sido estudiada por Bienes *et al.* (2010) y García-Díaz *et al.* (2017) conduciendo a un empobrecimiento de los suelos erosionados. Este empobrecimiento en nutrientes de los suelos implica problemas de fertilidad en los cultivos, teniendo que aportar fertilizantes que a su vez son adsorbidos en las partículas del suelo, y que al ser arrastrados por la erosión producen problemas de eutrofización en las masas de agua (Mullan 2013). Sin embargo, el olivar tradicional de la Comunidad de Madrid no suele recibir ningún tipo de fertilización, por lo que estas pérdidas de fertilidad del suelo se traducen en pérdidas de cosecha.

A diferencia de la pérdida de nutrientes mencionada en la zona de erosión de la microcuenca, el contenido en calcio ha sido un 50% superior en la zona de erosión que en la de sedimentación (Tabla 2.5), lo que se debe a la pérdida por erosión del horizonte Ap y a la emergencia en superficie del horizonte C en aquellos puntos donde los procesos erosivos han sido más intensos. El horizonte C está saturado de sulfato y carbonato cálcico (en especial del primero) (Tabla 1.3), que llega a la superficie por el laboreo como también

describió Switoniak (2014). La coloración blanquecina en la zona del olivar de la microcuenca (Fig. 2.4 y 2.5a) se debe a la aparición en superficie de dicho horizonte C, mientras que el color blanquecino de la zona de sedimentación se debe a la acumulación de limos (Tabla 2.5).

Cubiertas vegetales en olivar para frenar la pérdida de suelo

Frente a tales pérdidas de suelo se impone establecer un manejo alternativo al laboreo en olivares en pendiente. Las cubiertas han resultado muy efectivas en esta tarea como se ha comprobado en estudios previos en otras partes de la cuenca mediterránea (Tabla 3.1). Las cubiertas pueden ser inertes o vivas, y en este último caso, sembradas o espontáneas, anuales o permanentes (Rodríguez-Lizana 2003). En esta Tesis Doctoral se ha estudiado el efecto de tres cubiertas vegetales sembradas, dos anuales (cebada y leguminosa) y una permanente (*Brachypodium distachyon*) frente al tratamiento control consistente en un pase anual de cultivador.

Se ha medido una reducción de la pérdida de suelo respecto al tratamiento control del 40, 60 y 80 % para la leguminosa, la cebada y el Brachypodium respectivamente (Tabla 3.3). Resultados similares fueron descritos por Espejo-Perez *et al.* (2013), Marquez-Garcia *et al.* (2013) y Ordóñez-Fernández *et al.* (2007) con reducciones medias del 76 %, 56 % y 91 %. Gómez *et al.* (2009b) incluso comprobaron que una vez establecida la cubierta tanto la escorrentía como la concentración de sedimentos quedaban prácticamente eliminadas (0,1 % de coeficiente de escorrentía y 0,02 Mg ha^{-1} de pérdida de suelo el séptimo año de estudio).

Las pérdidas de suelo medidas en las microparcelas con cubiertas vegetales (1,36, 2,74 y 4,00 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ para Brachypodium, cebada y leguminosa) han sido similares a los encontrados por Taguas *et al.* (2013) (1,8 Mg ha^{-1} $año^{-1}$), pero algo superiores a los de Gómez & Giráldez (2007) (0,4 Mg ha^{-1} $año^{-1}$). Como se ha mencionado en el apartado anterior, la medida de la erosión con microparcelas infraestima la pérdida de suelo al no recoger todos los procesos erosivos ni disponer del tiempo suficiente para abarcar

eventos extremos y muy erosivos. Teniendo esto en cuenta, y que el límite tolerable de pérdida de suelo para Europa está entre 0,3 y 1,4 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ (Verheijen *et al.* 2009), las pérdidas de suelo medidas en el Capítulo 3 aplicando un mínimo laboreo son claramente insostenibles (6,81 Mg ha^{-1} $año^{-1}$), siendo la utilización de cubiertas anuales insuficiente para llegar a ese límite de sostenibilidad, mientras que la cubierta permanente de *Brachypodium distachyon* sería la única sostenible en el tiempo.

Durante el periodo de estudio se ha comprobado que las lluvias más intensas y erosivas en la zona centro de España sucedían en primavera, siendo el verano la estación más seca (Tabla 3.2). Es por ello que las mayores tasas de erosión se han producido en primavera y las menores en verano (Tabla 3.4), aunque estas diferencias sólo fueron estadísticamente significativas para el tratamiento control, debido a la elevada variabilidad de los datos como ya destacaron otros investigadores (Gómez *et al.* 2001, Boix-Fayos *et al.* 2006).

Las cubiertas anuales han mostrado diferencias en su eficiencia para controlar la erosión a lo largo del año debido principalmente a la cobertura vegetal. En la cubierta de leguminosa las pérdidas de suelo entre primavera y otoño fueron similares (Tabla 3.4), mientras que la cebada redujo más la pérdida de suelo en primavera frente al otoño debido a su crecimiento más rápido (Fig. 3.2). Como la siembra se realiza en otoño, tras una preparación previa del terreno (Tabla 1.4), el suelo queda desnudo durante varias semanas hasta que la vegetación comienza a crecer, protegiéndolo entonces del impacto de las gotas de lluvia y frenando la escorrentía. Esta relación negativa entre la cobertura y la pérdida de suelo (Fig. 3.4) fue del mismo orden a la descrita por Dunjo *et al.* (2004).

Los eventos lluviosos de alta energía (clase 3: KE>4 MJ ha^{-1}) sólo han supuesto un 22% del total, pero son los que han producido las mayores pérdidas de suelo en los tratamientos control y cubierta de leguminosa (Tabla 3.5) con un 40 y 42 % del total respectivamente, debido principalmente a que cuando se produjeron (otoño) la cobertura del suelo era baja. En general puede decirse que las mayores pérdidas de suelo se producen bajo eventos de alta energía y con escasa cobertura independientemente del tipo de cubierta (Tabla 3.6), similar a los resultados encontrados por Martinez-Mena *et al.* (2012). Las pérdidas de suelo

registradas bajo eventos de clase 2 ($2<KE\leq4$ MJ ha^{-1}) se reducían significativamente cuando la cobertura del suelo era superior al 40 %. Marques *et al.* (2008) suben este porcentaje hasta un 60 %, mientras que en el sur de España, Espejo-Perez *et al.* (2013) consideran que un 20 % de cobertura es suficiente para proteger el suelo.

En suelos yesíferos bajo climas semiáridos, como el de la zona de estudio, es muy difícil superar el 55 % de cobertura vegetal debido a las limitaciones de agua que sufre la vegetación y a la degradación que presentan estos suelos erosionados (bajo contenido en OM, baja estabilidad estructural y presencia de yeso que incrementa la presión osmótica, dificultando la succión del agua por parte de las plantas), pero pequeños incrementos de cobertura logran importantes reducciones de pérdida de suelo (Fig. 3.4). A pesar de que durante el tiempo de estudio no se ha registrado ninguna lluvia con intensidad superior a 50 mm h^{-1}, estos eventos no son raros y tienden a ser más frecuentes (García-Díaz *et al.* 2015), por lo que en un futuro próximo si no se aplican técnicas para proteger el suelo, los problemas de erosión en la zona centro serán incluso más severos.

En las condiciones edafoclimáticas tan limitantes de la zona de estudio, suelo yesífero y clima semiárido, debería ser obligatorio el mantenimiento del suelo cubierto tanto en primavera como en otoño, aunque dichas medidas de prevención tienen que adaptarse a las condiciones edafoclimáticas de cada zona de aplicación como destacan Fleskens & Stroosnijder (2007) y Gómez *et al.* (2017). En el sur de España Gómez *et al.* (2014) encontraron que las estaciones en las que se producían las mayores pérdidas de suelo eran otoño e invierno, pero recomendaban que la cubierta estuviera tanto en primavera como en otoño para limitar la pérdida de suelo y de fertilidad (Gómez *et al.* 2009b). La Junta de Andalucía recomienda que las cubiertas se mantengan entre el 15 de octubre y el 15 de marzo (Orden de 8 de abril de 2016) que es cuando el olivo sale de su parada invernal, mientras que en la Comunidad de Madrid, en base a los resultados encontrados en esta Tesis Doctoral, sería recomendable el mantenimiento de la cubierta hasta mediados de Mayo, ya que las lluvias de primavera son muy erosivas y los olivos madrileños salen más tarde que los olivos andaluces de la parada vegetativa invernal.

Tan solo el 6% de los agricultores entrevistados utilizan cubiertas vegetales en sus olivares (Tabla 3.9), mientras que para la mayor parte del resto de agricultores dejar vegetación en la parcela está socialmente mal visto, por lo que el empleo de cubiertas vegetales en los olivares de la región madrileña es poco probable.

El efecto de las cubiertas vegetales en las propiedades del suelo

Después de 3 años de manejo del suelo con cubiertas vegetales, y a pesar de las importantes diferencias en cobertura vegetal medidas (Fig. 3.2 y Fig. 4.1), apenas se han encontrado diferencias estadísticamente significativas en los parámetros del suelo estudiados (Capítulo 4). La cubierta permanente de Brachypodium ha sido la que más suelo cubierto ha mantenido durante todo el año (Fig. 4.1) tal y como era de esperar debido a la ausencia de alteración del suelo desde su siembra en noviembre de 2010, si exceptuamos la siega cada primavera. Como puede verse en la figura 3.2, durante el otoño las cubiertas anuales tienen una cobertura similar al tratamiento control, creciendo hasta el momento de la siega de primavera. La cubierta de cebada se recupera satisfactoriamente tras la siega, manteniendo una cobertura alrededor del 40%, mientras que la esparceta no llega al 20%. Brachypodium ha tenido el mayor contenido en raíces (Fig. 4.2) con 12 kg m^{-3}. Todos los tratamientos, excepto la cebada, han tenido mayor RD en el horizonte superficial respecto a los otros dos horizontes más profundos (Tabla 4.2), con una RD entre 4 y 12 kg m^{-3}, frente a los 5 kg m^{-3} de media por debajo de 10 cm. Estos resultados son inferiores a los medidos por Duran-Zuazo & Rodriguez-Pleguezuelo (2008), lo que se explica por un menor crecimiento radicular debido a la aridez del clima de la zona de estudio, además de la pobreza en nutrientes y la mayor presión osmótica propia de los suelos yesíferos (Tabla 1.2 y 1.3).

A pesar de la mayor cobertura superficial de la cebada respecto a la esparceta (Fig. 4.1), la densidad de raíces ha sido superior en la leguminosa debido a las diferencias en sus sistemas radiculares. La esparceta tiene una raíz principal pivotante y muy profunda (Koivisto 2001) lo que le permite

captar agua de horizontes del suelo profundos, mientras que la cebada tiene un sistema radicular fasciculado (Hackett 1968) con una menor biomasa (4 kg m^{-3} media entre 0-30 cm) y más somero. En el tratamiento control, que mantuvo una cobertura baja todo el año (entre 5 y 15%, Fig. 4.1), se midió una densidad de raíces de 6 kg m^{-3} en la profundidad 0-10 cm, lo que indica un sistema radicular persistente de la escasa vegetación arvense. Ya que la mayor actividad de raíces del olivo se produce entre 0,15 y 1,00 m de profundidad (Fernández 2014), la reducción de la RD de los tratamientos ensayados a partir de 10 cm de profundidad (Fig. 4.2) supone que la competencia por el agua y los nutrientes entre los olivos y las cubiertas vegetales no será muy importante.

El contenido de OC del suelo ha aumentado con la cubierta de Brachypodium casi 1 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ respecto al control (Tabla 4.3) debido a su mayor cobertura vegetal, densidad de raíces y, por tanto, aporte de residuos vegetales al suelo. A pesar de las diferencias entre el tratamiento control (10,9 Mg ha^{-1}) y Brachypodium (13.7 Mg ha^{-1}), éstas no fueron estadísticamente significativas como también vieron Gonzalez-Gonzalez *et al.* (2012) y Parras-Alcantara *et al.* (2015), mientras que Palese *et al.* (2014) encontró esa significación 7 años después de manejo con una cubierta espontánea permanente. Parras-Alcantara *et al.* (2015) han demostrado que el laboreo aumenta las salidas de SOC debido a la degradación de los agregados del suelo. En este estudio no se han encontrado diferencias significativas en el contenido de SOC entre las cubiertas anuales y el control, debido posiblemente a que el tratamiento control ha consistido en una única labor superficial lo que, unido a la aridez de la zona y a las características de los suelos yesíferos que evolucionan lentamente (Bienes *et al.* 2016), han ralentizado las mejoras que las cubiertas vegetales podrían haber supuesto. El menor contenido en SOC se ha medido en la cubierta anual de esparceta (8.8 Mg ha^{-1}) lo que se ha debido a una mayor tasa de mineralización de los residuos de esta leguminosa, como también describió Plaza-Bonilla *et al.* (2015) por su baja relación C/N.

En zonas semiáridas es crucial mantener la cubierta vegetal para garantizar un stock de SOC adecuado (Duran-Zuazo & Rodriguez-Pleguezuelo 2008, Fernandez-Romero *et al.* 2016b). Según Zdruli *et al.* (2004) para mantener una buena calidad del suelo es necesario que su capa superficial tenga al

menos un 2% de SOC. En este estudio, tras 3 años de manejo con la cubierta permanente de Brachypodium se ha alcanzado un 1,1% de SOC en la capa superficial, mientras que en el tratamiento control permaneció en 0,8 %. No obstante, estas 3 décimas representan un incremento considerable que evidencia que está teniendo lugar una recuperación de estos suelos degradados. Estos cambios en el stock de carbono son muy lentos, Almagro & Martinez-Mena (2014) estiman que en un olivar mediterráneo de secano bajo clima seco harían falta 20 años de incorporación de residuos vegetales para recuperar su potencial total de secuestro de carbono. Es por ello, que el objetivo del 2% de SOC en la capa superficial del suelo es un objetivo a medio o largo plazo en olivares de clima semiárido, y que el uso de cubiertas vegetales puede facilitar el logro de este objetivo.

Las raíces son una de las principales fuentes de carbono y nitrógeno del suelo (Zdruli *et al.* 2004, Rasse *et al.* 2005). De este modo, tanto el SOC como el SN se han reducido según ha aumentado la profundidad del suelo debido a la escasez de raíces por debajo de los 10 cm. La reducción media con la profundidad ha sido de un 20% en SOC y un 22% en SN (Tabla 4.3), similar a los resultados de Alvarez *et al.* (2007).

Dado que alrededor del 95% del N del suelo forma parte de la materia orgánica (Duran-Zuazo & Rodriguez-Pleguezuelo 2008), el patrón de los stocks de C y N ha sido similar entre tratamientos para cada profundidad (Fig. 4.3). La tendencia de las cubiertas vegetales, tanto anuales como la permanente, a aumentar el C-POM y el C-POM/SOC en la profundidad de 0-5 cm (Fig. 4.3a y 4.3c) se ha debido a que la entrada de restos vegetales ha creado un pool más reactivo de OC (Rodrigues *et al.* 2015), siendo la POM, la fracción lábil de la materia orgánica, la que responde más rápidamente al manejo del suelo (Wander 2004). Resultados similares han sido descritos por Martinez-Mena *et al.* (2008) y Martin-Lammerding *et al.* (2011) en suelos labrados y con cubiertas vegetales. Como sucedió con el SOC y el SN, C-POM y N-POM se han reducido con la profundidad, como ya había descrito Wander (2004).

La relación C/N ha oscilado entre 8 y 10 en todos los tratamientos y profundidades, indicando una humificación adecuada de la materia orgánica (Tabla 4.3). La relación C/N del tratamiento control ha sido baja en la

profundidad de 0-5 cm (8,1), mientras que Brachypodium la ha aumentado hasta 10 puntos, aunque no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas. Gómez *et al.* (2009b) y Soriano *et al.* (2014) han observado un aumento en la relación C/N con cubiertas vegetales respecto al laboreo convencional debido a su mayor contribución a la entrada de residuos en superficie. Dado que los residuos de leguminosas tienen una relación C/N baja por su elevado contenido en N (Almagro & Martinez-Mena 2014), la relación C/N del suelo del tratamiento de esparceta ha sido similar al control, este último con una baja entrada de residuos y, de este modo, una baja relación C/N. La baja relación C/N de la esparceta se ha debido a la alta tasa de mineralización de los residuos (Martin-Lammerding *et al.* 2011, Plaza-Bonilla *et al.* 2015), y como consecuencia el contenido en SOC, C-MOM, SN y N-MOM en el horizonte superficial (0-5 cm) ha sido bajo (Fig. 4.3a y 4.3c).

La descomposición de la materia orgánica, el C procedente de las plantas (Barthes *et al.* 2000, Verchot *et al.* 2011) y el POM (Martin-Lammerding *et al.* 2011) contribuyen a la formación y estabilización de los agregados. Esta es la razón por la que los agregados han sido más estables en la capa superficial (0-5 cm) que en el espesor 5-10 cm (Tabla 4.3) y que los tratamientos de Brachypodium y cebada, con los mayores contenidos de SOC y C-POM, son los que han tenido los agregados más estables (Fig. 4.4). Esta relación positiva entre SOC y estabilidad de agregados ha sido descrita por otros autores en otro tipo de suelos (Gómez *et al.* 2009b, Santín-Montanyá *et al.* 2013). Las raíces también contribuyen a la estabilidad de los agregados, por ejemplo de Baets *et al.* (2006) han establecido una reducción exponencial en la tasa relativa de desagregación del suelo según aumenta la densidad de raíces de gramíneas entre 0 y 4 kg m^{-3} en el espesor más superficial del suelo (0-5 cm). En base a los resultados de esta Tesis Doctoral, la estabilidad de agregados parece estar más relacionada con el contenido en C-POM que con las raíces, dado que las diferencias en RD en el espesor superficial entre el tratamiento control y las cubiertas vegetales ha sido escaso, pero los agregados han sido significativamente menos estables en el tratamiento control (Fig. 4.4).

La porosidad intrapedal no ha sido afectada por el tratamiento, aunque hay una tendencia a su incremento con las cubiertas vegetales (Tabla 4.3) debido al efecto de la materia orgánica y de los exudados de las raíces que se

introducen entre los agregados. Esta falta de diferencias puede haberse debido al corto periodo de tiempo de estudio (3 años) ya que Park & Smucker (2005) sí que encontraron una reducción de este parámetro en una plantación de maíz tras varias décadas de frecuente laboreo.

Los bajos valores en macroporosidad en todos los tratamientos, inferiores al 10 % (Fig. 4.5), indican una compactación generalizada del suelo según Pagliai & Vignozzi (2002), lo que se debe a las malas características estructurales de los suelos yesíferos (van Alphen & Rios Romero, 1971). El tratamiento con Brachypodium ha reducido la porosidad total de la capa superficial (2,5-7,5 cm) del suelo (Fig. 4.5), incrementando así la densidad aparente hasta 1,49 g cm^{-3} respecto al control (1,33 g cm^{-3}). Zucca *et al.* (2013) y Palese *et al.* (2014) observaron resultados similares de compactación del suelo con cubiertas vegetales espontáneas. Palese *et al.* (2014) tampoco encontraron diferencias en macroporosidad en el espesor 0-10 cm al igual que en nuestro caso (Fig. 4.5), pero sí entre 10 y 20 cm con una reducción en la macroporosidad en el laboreo respecto a la vegetación espontánea. Las cubiertas vegetales han mostrado una tendencia a incrementar la microporosidad (Fig. 4.5) sobre todo la cebada (24,5%) frente al control (18,6%). La microporosidad es la responsable de la disponibilidad de agua en el suelo. Sólo el tratamiento con Brachypodium ha aumentado dicha disponibilidad (AWC = 9 %) sin que estas diferencias sean estadísticamente significativas, ya que las cubiertas anuales además de incrementar la microporosidad aumentaron el punto de marchitez permanente con un resultado de una menor AWC. Si la tendencia al aumento de AWC continúa con los años como resultado de cambios en el suelo a medio y largo plazo, se logrará una mayor capacidad de almacenamiento de agua en los olivares de secano con cubiertas permanentes lo que puede ser muy positivo de cara al aprovechamiento del agua de lluvia, con el consiguiente repercusión positiva sobre la producción.

La mayor densidad aparente de Brachypodium también se ha reflejado en una mayor resistencia a la penetración en la capa superficial (0-10 cm, Fig. 4.8) lo que responde al mayor contenido de raíces y menor porosidad, tal y como describieron Pagliai & Vignozzi (2002). Bajo esta capa, la cebada y el control han incrementado drásticamente la PR, indicando una mayor compactación de las capas más profundas (Tabla 4.5). Sin embargo, la PR

apenas aumentó en los tratamientos de Brachypodium y esparceta, lo que demuestra una menor densidad aparente en profundidad que en la capa superficial y así, una mayor capacidad de poros de almacenamiento como refleja el mayor θ a 30 cm de profundidad (Tabla 4.4).

La escasa infiltración medida en todos los tratamientos (Fig. 4.7) está relacionada con la textura y estructura del suelo. Por un lado, el alto contenido en limo y arena muy fina de este suelo reduce las tasas de infiltración (Bagarello *et al.* 2016); y por otro lado, la baja porosidad total y en concreto, las reducidas macro y mesoporosidad que son las directamente relacionadas con los flujos de agua dentro del suelo (Palese *et al.* 2014). Otros autores sí que han medido una infiltración significativamente mayor en suelos arcillosos con cubiertas vegetales respecto al laboreo, por ejemplo en suelos vérticos (Gómez *et al.* 2004) o sobre otros del Gran Grupo *Haploxeralf* (Gucci *et al.* 2012), pero los suelos yesíferos con alto contenido en limo necesitan de más años para cambiar su estructura y así mejorar la infiltración (Bienes *et al.* 2016).

A pesar de que la porosidad y las tasas de infiltración has sido similares en todos los tratamientos, se han encontrado diferencias respecto al almacenamiento de agua a 15 y 30 cm de profundidad (Tabla 4.4 y Fig. 5.2). En general la cantidad de agua almacenada en el suelo ha sido baja, debido al truncamiento del perfil del suelo (Gómez *et al.* 2017) y a las malas propiedades hidráulicas de los suelos yesíferos (FAO 1990). El contenido de agua a 15 cm fue superior al de 30 cm en todas las estaciones y tratamientos (Tabla 4.4), excepto para la esparceta debido a su sistema radicular pivotante (Koivisto 2001) que ha permitido una infiltración más profunda del agua. A 15 cm de profundidad los tratamientos control y Brachypodium mantuvieron un mayor contenido de agua que las cubiertas anuales a lo largo de todo el año, siendo la estación con mayor humedad media el invierno, mientras que el verano tuvo la menor humedad. Debido a que la mayor actividad radicular de los olivos de secano se produce entre los 15 cm y 1 m como se mencionó previamente, la cantidad de agua almacenada a 30 cm es más importante para el estado hídrico y nutricional del olivo por lo que lo desarrollaremos más detalladamente. El tratamiento control ha tenido el menor contenido volumétrico de agua a 30 cm de profundidad en cada estación (Tabla 4.4 y Fig. 5.2), mostrando las mayores diferencias respecto a las cubiertas en

invierno (entre 14 y 43 % más θ en las cubiertas vegetales) y primavera (entre 36 y 55 % más θ en las cubiertas vegetales). Gucci *et al.* (2012) han encontrado resultados similares a 60 cm de profundidad. Dos de los periodos más sensibles al estrés hídrico en el olivo se dan en primavera, son la floración y el crecimiento del fruto (Fernández 2014). De este modo, un aumento de cantidad de agua disponible para el olivo en esos momentos puede mejorar la producción de aceitunas y reducir la alternancia (vecería) en la producción. El tratamiento de Brachypodium tuvo el mayor contenido θ a 30 cm de profundidad en todas las estaciones en cada una de las tres campañas estudiadas, seguido de ambas cubiertas anuales (Fig. 5.2). El contenido volumétrico de agua en el suelo fue similar para todas las cubiertas a comienzos de 2011, situándose Brachypodium por encima de las cubiertas anuales según avanzaba el tiempo (Fig. 5.2) ya que el suelo del tratamiento de Brachypodium no fue alterado (labrado) desde que se sembró en noviembre de 2010. Gracias a la no alteración en la cubierta permanente la estructura del suelo y la conectividad de los poros se han desarrollado mejor, permitiendo un mayor almacenamiento de agua en el perfil del suelo. Estos resultados son similares a los encontrados por Palese *et al.* (2014) que midieron un mayor almacenamiento del agua de lluvia en el suelo en otoño-invierno con los sistemas sostenibles. Las diferencias de θ entre las cubiertas anuales se deben a las diferencias en sus sistemas radiculares, fasciculado en la cebada y pivotante en la esparceta como se ha indicado anteriormente, lo que permite a esta última un movimiento más rápido y profundo del agua en el suelo. Estos resultados contradicen absolutamente la idea generalizada de los agricultores de que el laboreo mejora el contenido del agua en el suelo.

El efecto de las cubiertas vegetales en la cantidad y calidad del VOO

Para completar el estudio de las cubiertas vegetales se ha evaluado el efecto en la producción de aceituna y en la calidad del aceite elaborado respecto al tratamiento control.

El momento de recogida de aceituna se ha basado en el índice de madurez (MI), cuyo óptimo para maximizar la cantidad y calidad de aceite se establece en 3,5 (Beltrán *et al.* 2008), marcando el momento de la recolección. Se ha cosechado la aceituna en tres campañas consecutivas en fechas similares: 1 de diciembre de 2011, 11 de diciembre de 2012 y 2 de diciembre de 2013. El MI medio de las aceitunas de todos los tratamientos se ha situado alrededor de 3,5 en 2011 y 4,0 en 2012, mientras que en 2013 fue menor, alrededor de 3,0, debido a la alerta de heladas a comienzos de diciembre que podrían dañar la calidad del fruto y que nos obligó a adelantar la recogida.

En la campaña 2011/12 sólo se midió la producción de aceituna pero no se pudo elaborar aceite debido a una avería del sistema Abencor. Por ello los datos de producción se refieren a tres campañas, mientras que los análisis de aceites sólo a dos, las campañas 2012/13 y 2013/14.

Debido a las escasas lluvias de la zona (Fig. 5.1) y por tanto a la baja humedad del suelo durante el periodo de estudio, en todos los tratamientos (Fig. 5.2) las producciones obtenidas han sido pequeñas, a pesar de la elevada capacidad del olivo de hacer frente al estrés hídrico (Moriana *et al.* 2007) especialmente de la variedad Cornicabra (Barranco *et al.* 2005). La mayor producción de aceituna y aceite se ha obtenido en la campaña 2013/14 (Fig. 5.3), 9,1 kg árbol^{-1} de fruto y 476 kg ha^{-1} de aceite de media para todos los tratamientos, mientras que 2012/13 tuvo las menores producciones, 1,6 kg árbol^{-1} de fruto y 90 kg ha^{-1} de aceite siendo considerado un año *off* (de baja o nula cosecha). Esta alternancia en producción o vecería es típica de los olivos, principalmente en la Cornicabra (Rallo *et al.* 2005), con una elevada producción los años *on* seguido de años de baja o ninguna producción, años *off*.

La producción de aceituna y aceite se ha visto afectada por la campaña pero no por el tratamiento (Tabla 5.1), con diferencias estadísticamente significativas tanto en producción de aceituna como de aceite.

La ausencia de diferencias en producción de aceituna y aceite entre distintos sistemas de manejo también ha sido observada por otros investigadores entre laboreo y no laboreo (Gómez *et al.* 1999, Ferraj *et al.* 2011, Palese *et al.* 2014, Simoes *et al.* 2014), y entre olivares de secano y regadío de la variedad Cornicabra (Gómez-Rico *et al.* 2007). Por el contrario, Moriana *et al.*

(2003) han medido una reducción de la producción de aceituna en olivos de Picual sometidos a estrés hídrico, y Caruso *et al.* (2011) han encontrado una pérdida del 40 % de producción en olivos jóvenes de Frantoio manejados con cubiertas vegetales respecto al laboreo. Corleto & Cazzato (2008) observaron una reducción de la producción en la variedad Coratina con la cubierta vegetal permanente, pero no con leguminosas respecto al laboreo convencional. Es por ello que un manejo adecuado de las cubiertas vegetales es importante para evitar pérdidas de producción, principalmente la selección de especies y el momento de la siega, siendo especialmente sensibles los olivos jóvenes.

Los parámetros analíticos y organolépticos de todos los VOOs han estado dentro de los límites normativos (Reglamento UE 1348/2013, de 16 de Diciembre de 2013), obteniendo la máxima categoría de "Aceite de Oliva Virgen Extra". Dichos límites están fijados en 0,8% para la acidez libre, 20 meq O_2 kg^{-1} para los peróxidos, 2,50 para la K_{232}, 0,22 para la K_{270} y 0,01 para ΔK (Tabla 5.3).

El MI tiene una influencia determinante en los compuestos del VOO como señalan otros autores (Gómez-Rico *et al.* 2006, Gómez-Rico *et al.* 2007, Trentacoste *et al.* 2010). A pesar de esto, no se encontró un efecto significativo como covariable en el MANOVA, posiblemente debido a las pequeñas diferencias entre los MI de los VOOs estudiados. Tanto el tratamiento como la campaña sí han afectado significativamente a muchas de las variables estudiadas (Tabla 5.2), sin influir en el índice de peróxidos ni en la K_{270}; mientras que la K_{232} y ΔK solo han sido afectadas por la campaña.

El efecto de la campaña fue determinante en la calidad de los VOOs (Fig. 5.7, Tablas 5.2, 5.4 y 5.6), debido a las importantes diferencias en precipitaciones y de carga en los árboles, ambos mayores en la campaña 2013/14. Los VOOs fueron más diferentes entre tratamientos el año más seco, 2012/13, principalmente por la reducción de la acidez libre y mayor relación clorofilas/carotenos de todos los aceites de los tratamientos de cubiertas vegetales.

Comparando los resultados por campaña, el MI ha sido menor en 2013/14 que en 2012/13 a pesar de una cosecha más temprana en el primer año, lo que se debe a la mayor carga de los árboles (Dag *et al.* 2011). Los VOOs de

2012/13 han tenido una mayor acidez libre (0,26 %) que los VOOs de la siguiente campaña (0,15 %) debido a la mayor maduración (Gutiérrez *et al.* 1999, Jimenez *et al.* 2015). Los parámetros K_{232} y K_{270} han sido mayores en la campaña 2012/13 (el año más seco) que en 2013/14, estando asociado su aumento con el estrés hídrico (Gómez-Rico *et al.* 2007, Palese *et al.* 2010) lo que apoya los resultados encontrados. A pesar de estas variaciones, y como se ha comentado previamente, todos los VOOs pertenecen a la categoría comercial de Virgen Extra.

La máxima acumulación de polifenoles en el fruto se alcanza en el momento del envero (Monteleone *et al.* 1998, Uceda *et al.* 2008). Los VOOs de 2013/2014 tuvieron un MI algo inferior al momento de envero, sin embargo fueron los aceites más maduros de la campaña 2012/13 los que tuvieron un contenido polifenólico mayor, debido de nuevo al importante efecto del estrés hídrico al que estuvieron sometidos los olivos en 2012. Berenguer *et al.* (2006) y Moriana *et al.* (2007) han establecido una relación lineal entre el contenido total de polifenoles y el estrés hídrico, aunque Palese *et al.* (2008) han estimado que las diferencias en el contenido total de polifenoles, K_{232} y otros parámetros de calidad entre VOOs de olivos de secano y regadío se debían principalmente a la diferente carga del árbol y al patrón de maduración de los frutos en lugar de a la disponibilidad de agua.

Los VOOs de 2013/14 han sido menos luminosos y más verdosos debido al mayor contenido en clorofilas junto a una mayor cantidad de pigmentos carotenoides y pigmentos totales, y un ratio clorofila/caroteno más alto que los aceites más maduros de la campaña previa. Todo ello parece responder al mayor MI de los VOOs de 2012/13, de forma similar a lo encontrado por otros autores (Roca & Minguez-Mosquera 2001, Moyano *et al.* 2008).

La campaña ha influido significativamente en la mayoría de los ácidos grasos (Tabla 5.4) pero no el manejo del suelo, como ha sucedido con el ácido oleico que se ha mantenido estable entre tratamientos. Otros autores tampoco han encontrado un efecto del estrés hídrico sobre los ácidos grasos (Gómez-Rico *et al.* 2007, Uceda *et al.* 2008), observando un efecto positivo de la maduración en el contenido en ácido oleico lo que implica una reducción del ácido palmítico (Gómez-Rico *et al.* 2007) y un incremento de ácido linoleico (Gutiérrez *et al.* 1999), apoyando los resultados encontrados en la presente

Tesis Doctoral en los aceites más maduros de 2012/13 (Tabla 5.5). La media del porcentaje en ácido oleico (79,5%) es similar a la de otros aceites de Cornicabra (Salvador *et al.* 2001b, Uceda *et al.* 2008), aunque el contenido en ácido linoleico ha sido inferior (3,1%) al de estos, pero similar al descrito por Gómez-Rico *et al.* (2009). Debido a que el ácido esteárico no se acumula en el proceso de maduración (Gutiérrez *et al.* 1999), el contenido de este ácido en los VOOs de 2012/13, el año con aceites más maduros, ha sido significativamente menor que en 2013/14 lo que podría deberse a un mayor estrés hídrico de los olivos el año más seco.

La relación MUFA/PUFA aumenta con el estrés hídrico (Gómez-Rico *et al.* 2007) aunque se reduce con la maduración (Dag *et al.* 2011) como también lo hace la relación Oleico/Linoleico (Roca & Minguez-Mosquera 2001, Rotondi *et al.* 2004). En base a los resultados encontrados (Tabla 5.5), la influencia de la maduración sobre la relación MUFA/PUFA y Oleico/Linoleico ha sido superior al efecto de las cubiertas, y por tanto, al estrés hídrico sobre los olivos entre las dos campañas (Tabla 5.5).

Como en los parámetros anteriores, la campaña ha tenido una influencia mayor en las puntuaciones de amargo y picante que en el manejo del suelo (Tabla 5.6). Los aceites de la campaña 2013/14 han tenido alrededor de 3 puntos menos de amargo y picante, mientras que el frutado fue similar a pesar del menor MI de ese año. Estos aceites "más dulces" de 2013/14 se han producido por la mayor precipitación esa campaña, lo que condujo a una reducción en el contenido de polifenoles (Tabla 5.3) como ya han observado otros autores (Gómez-Rico *et al.* 2006, Palese *et al.* 2008).

En cuanto a la influencia de los tratamientos sobre los parámetros de los VOOs, los frutos del tratamiento con esparceta han tenido una maduración más adelantada (3,7), mientras que los de cebada han sido los más atrasados (3,3) (Tabla 5.3). Los VOOs de esparceta fueron más luminosos y menos verdes (mayor a*) que el resto de tratamientos (Tabla 5.3), lo que se debe al menor contenido en pigmentos carotenoides y clorofílicos (Escolar *et al.* 2007) por su maduración más avanzada. Esta reducción en pigmentos con el avance de la maduración es similar a los resultados encontrados por Roca & Minguez-Mosquera (2001) y Moyano *et al.* (2008).

Los VOOs de los tratamiento control y Brachypodium han tenido unos valores de acidez libre ligeramente superiores a los demás, 0,22 y 0,21 % respectivamente, frente a 0,20% de las cubiertas anuales (Tabla 5.3) con un MI intermedio (3,5) y una carga parecida, pero con diferencias en el contenido de pigmentos. Las diferencias en el contenido de polifenoles totales y de pigmentos en los VOOs del tratamiento de cebada en la campaña 2012/13 podrían responder a un mayor estrés hídrico del olivo ejercido por este tratamiento en ese año más seco, como también señaló Hernández *et al.* (2005).

Las diferencias encontradas en el contenido de ácidos grasos en los VOOs elaborados, correspondientes a suelos manejados con distintas cubiertas vegetales, no responden a variaciones en el estado de maduración de las aceitunas con las que se elaboraron los aceites. Los VOOs del tratamiento cebada han sido los menos maduros, seguidos de control y Brachypodium, estando los de esparceta en el extremo opuesto, pero siendo en todo caso estas diferencias muy pequeñas (menos de 0,5 puntos para aceites de la misma campaña). De este modo, los aceites de cebada deberían haber tenido el porcentaje de ácido esteárico más elevado, pero en realidad ha sido el menor (2,85 %), aunque con escasa diferencia respecto al resto de VOOs. Del mismo modo, los VOOs de esparceta deberían haber tenido las menores relaciones MUFA/PUFA y Oleico/Linoleico, pero ha sido el tratamiento con dichas relaciones más elevadas. Gómez-Rico *et al.* (2007) han medido como la ratio MUFA/PUFA aumenta en condiciones de secano. Los VOOs del tratamiento control no han tenido diferencias entre campañas en el frutado, amargo ni picante (Fig. 5.6), al contrario que los aceites de cubiertas vegetales que han reducido en 2 puntos el frutado en 2013/14 respecto a la campaña anterior, más seca. Tanto los VOOs del tratamiento de cebada como de Brachypodium han reducido las puntuaciones en amargo y picante la campaña más húmeda (2013/14), mientras que los VOOs del tratamiento esparceta los han incrementado. Este comportamiento diferente del tratamiento esparceta puede deberse a que esta cubierta haya reducido la cantidad de agua disponible para el olivo (Fig. 5.2) en el momento de síntesis de aceite (final del verano y comienzo del otoño). Otra explicación que no podemos corroborar es que la leguminosa esté ejerciendo un efecto positivo debido a la movilización de los nutrientes del suelo por la actividad

de la microbiota simbiótica. Efectos positivos de la cubierta de leguminosa en la nutrición de los cultivos han sido descritos en berenjena (Radicetti *et al.* 2016), olivo (Rodrigues *et al.* 2015) y viñedo (Perez-Alvarez *et al.* 2015).

La influencia del estrés hídrico, de la maduración, de la carga del olivo y de la disponibilidad de nutrientes, y sus interacciones, explican los cambios en los parámetros de los VOOs de los distintos manejos del suelo (Palese *et al.* 2008, Gómez-Rico *et al.* 2009, Palese *et al.* 2010, Dag *et al.* 2011) pero es difícil atribuir concretamente la medida de la variación de cada parámetro a cada factor concreto. Los VOOs con un elevado contenido en polifenoles totales, MUFA y ácido oleico tienen propiedades beneficiosas para la salud ya que tienen propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, previenen la lipoperoxidación, inducen cambios favorables en el perfil lipídico, mejoran la función endotelial y tienen propiedades antitrombóticas (López-Miranda *et al.* 2010). A pesar de las diferencias estadísticamente significativas encontradas en los VOOs de los distintos tratamientos cada campaña, éstas han sido demasiado pequeñas para suponer diferencias en dichos efectos beneficiosos para la salud.

Consideraciones prácticas

Como se ha demostrado en la presente Tesis Doctoral, la cubierta permanente ha incrementado el contenido de C del suelo en casi 1 Mg ha^{-1} $año^{-1}$. El secuestro de C es una preocupación a escala global (Lal 2010, Barbera *et al.* 2012, Vicente-Vicente *et al.* 2016), y desde el Estado Español se están poniendo en marcha mecanismos para que el olivar sea partícipe en la mitigación del Cambio Climático Global. El Gobierno ha firmado la Iniciativa 4 por mil "Soils for Food Security and Climate" en el marco de la Conferencia de Naciones Unidas COP21 para aumentar el contenido de OC de los suelos un 4‰ anual, con el objeto de frenar el incremento del CO_2 atmosférico (UN 2016).

Por otro lado, el Consejo Oleícola Internacional ha destacado que determinadas prácticas agronómicas en el olivar incrementan la capacidad de fijación a largo plazo de CO_2, el cual es tomado de la atmósfera tanto para formar parte de las estructuras vegetativas permanentes como para quedar

atrapado en el suelo. Debido a este importante papel de los olivares en el secuestro de carbono, este organismo ha desarrollado una herramienta para que el sector oleícola estime su huella de carbono "Carbon Balance in Olive Oil" (International Olive Council 2016).

A pesar de las importantes pérdidas de suelo descritas en esta Tesis Doctoral bajo el manejo tradicional de los suelos y de los efectos beneficiosos sobre el mismo de las cubiertas vegetales, tal como se ha resumido en el apartado correspondiente, los agricultores de la zona no perciben el problema de la degradación del suelo ocasionado por las prácticas agrarias convencionales, por lo que no tienen intención de cambiar el manejo tradicional por el establecimiento de cubiertas vegetales (Marques *et al.* 2015). En la actualidad, tan sólo un 6 % de los agricultores que participaron en la encuesta del Capítulo 3 (Tabla 3.9) utilizan cubiertas vegetales en sus cultivos, y parece poco probable que esta práctica se extienda al resto de agricultores de la región. Los agricultores sólo estarían dispuestos a introducirlas en sus olivares si hubiera beneficios económicos, además de los ambientales que se han detallado a lo largo de esta Tesis Doctoral.

La Unión Europea (UE) a través de la Política Agraria Común (CAP en sus siglas en inglés, Common Agricultural Policy) (2015-2020) ha establecido dos vías con las que fomentar el empleo de prácticas de conservación del suelo:

1) Ayudas directas a agricultores y productores (Reglamento UE 1307/2013) con el "Pago Básico" vinculado a la Condicionalidad y el "Pago para prácticas agrícolas beneficiosas para el clima y el medioambiente del sector agrario" conocido también como "Pago verde" o "greening" que se suma al Pago Básico.

2) Ayudas al desarrollo rural con los Programas de Desarrollo Rural (RDP, Rural Development Programmes en inglés) que desarrollan el Reglamento FEADER (Reglamento UE 1305/2013) y que incluye medidas agroambientales. El Estado Español desarrolló el Real Decreto 1075/2014, modificado por el Real Decreto 1172/2015 para la aplicación de dichas medidas.

Dentro de las ayudas directas, para poder percibir el Pago Básico los solicitantes tienen que cumplir la Condicionalidad (MAPAMA, 2015b). Dicha

Condicionalidad consiste en una serie de obligaciones que hay que respetar para que no se reduzcan los importes de determinadas ayudas comunitarias del sector agrario, y que tienen relación con el medio ambiente, las buenas condiciones agrícolas de la tierra, la salud pública, la sanidad vegetal y la sanidad y el bienestar animal. Entre los requisitos de Condicionalidad de la CAP para cultivos leñosos (López & Lovera, 2012) se establecen, entre otras medidas, las siguientes:

- No se labrará con volteo a favor de la pendiente en recintos con pendientes iguales o superiores al 15%, salvo que la pendiente real esté compensada mediante terrazas o bancales, se adopten formas especiales de cultivo como el cultivo en fajas, se practique laboreo mínimo o de conservación o se mantenga una cobertura de vegetación total del suelo. En caso de existencia de bancales, será obligatorio evitar cualquier tipo de labores que afecten la estructura de los taludes existentes.
- En pendiente igual o superior al 15%, salvo que la pendiente real del recinto esté compensada mediante terrazas o bancales, se ha de mantener una cubierta vegetal de anchura mínima de 1 metro en las calles transversales a la línea de máxima pendiente o en las calles paralelas a dicha línea, cuando el diseño de la parcela o el sistema de riego impidan su establecimiento en la otra dirección.

En cuanto al "Pago verde" que se añade al "Pago Básico" se concede por actuaciones sencillas, generalizadas, de carácter anual, tales como la diversificación de cultivos, el mantenimiento de pastos permanentes y por contar con superficies de interés ecológico en las explotaciones (MAPAMA, 2015a). En relación a los cultivos leñosos, es una ayuda que se cobra sin necesidad de aplicar ninguna medida especial.

Por último, en aplicación del Reglamento FEADER se desarrollan los RDP con medidas de ayuda para compromisos agroambientales y climáticos. En relación a las posibles ayudas al olivar se incluye dentro de las Áreas Focales de Prioridad 4 la "Prevención de la erosión y mejora en la gestión del suelo" y de Prioridad 5 "Fomentar la conservación y captura de carbono en los sectores agrícola y forestal".

Sin embargo, cada Comunidad Autónoma tiene cierta libertad para la aplicación de toda la normativa anteriormente mencionada. Por ejemplo, en la Comunidad de La Rioja los viticultores reciben ayudas agroambientales del RDP para la gestión sostenible del viñedo mediante cubiertas vegetales (Orden 25/2015, de 5 de junio). Andalucía establece medidas más restrictivas de Condicionalidad en el olivar adehesado para cobrar el Pago Directo de la CAP o las Líneas de ayudas de su RDP (Orden de 8 de abril de 2016, ver Anexo 3), si la pendiente es superior al 10% hay que establecer una cubierta vegetal viva o inerte, incluyendo restos de poda y/o piedras, con una anchura mínima de 1 metro. Si la pendiente supera el 35% (zonas con elevado riesgo de erosión), se hace obligatorio establecer la cubierta independientemente del uso o no de herbicidas en los ruedos.

En la Comunidad de Madrid no hay medidas que incentiven el empleo de cubiertas vegetales en cultivos leñosos, tan solo se solicitan compromisos en los cultivos herbáceos para el cobro del ”Pago verde” (Resolución de 9 de abril de 2015, ver Anexo 3).

Como se ha mostrado en este apartado, existen distintos mecanismos (Condicionalidad, Pago Verde o vía FEADER) con los que fomentar el empleo de prácticas de conservación del suelo en la Comunidad de Madrid, como son las cubiertas vegetales, pero que en la actualidad se están pagando sin cumplir con la misión para la que fueron diseñados. A la luz de los resultados de la presente Tesis Doctoral, y dada la escasa iniciativa particular detectada en los agricultores de la región para el establecimiento de cubiertas vegetales en olivar, y en base a toda la normativa Comunitaria y Estatal que ampara su empleo, se sugiere que la Comunidad de Madrid debería imponer medidas para extender el empleo de cubiertas vegetales o inertes con un doble objetivo: reducir la pérdida de suelo por erosión y aumentar el secuestro de carbono en el territorio de la Comunidad de Madrid, a la vez que se incrementan la biodiversidad y la sostenibilidad del agrosistema.

Capítulo 7

Conclusiones generales

Esta Tesis Doctoral evidencia que en el olivar las pérdidas de suelo y materia orgánica debidas al laboreo tradicional son insostenibles. Las cubiertas vegetales, sobre todo la permanente, ayudan a controlar dicha situación mejorando el suelo y fijando carbono, sin afectar a la cantidad y calidad del aceite de oliva virgen. Esto supone una información novedosa y de importancia para los olivicultores.

Las conclusiones generales derivadas de esta Tesis Doctoral son:

1. Las pérdidas de suelo en un olivar sobre suelo yesífero y clima semiárido manejado con laboreo tradicional, medidas tanto a corto como a medio plazo, son muy superiores a la tasa de formación del suelo y, por tanto, insostenibles (Capítulos 2 y 3).

2. La magnitud de la pérdida de suelo varía con la escala espacial y temporal de medición y con la metodología empleada. A medio plazo, con el método del cesio-137, se ha obtenido una pérdida de suelo cinco veces superior a la medida a corto plazo con las microparcelas. Esto es debido a que a mayor escala se producen más procesos erosivos (erosión en cárcavas y regueros), además de integrar eventos de alta intensidad y baja frecuencia (Capítulos 2 y 3).

3. Los sedimentos están principalmente compuestos por arcillas (con una tasa de enriquecimiento de 1,6), arrastrando cantidades importantes de materia orgánica (con una tasa de enriquecimiento de 2,4) y nutrientes (principalmente fósforo, magnesio y potasio), lo que conlleva un empobrecimiento en las zonas de erosión. La eliminación del horizonte Ap superficial hace que aflore el horizonte subyacente rico en yesos y pobre en nutrientes. Ambos factores conducen a una pérdida de fertilidad en el olivar (Capítulos 2 y 3).

4. Las cubiertas vegetales son una herramienta útil para reducir la pérdida de suelo, siendo la cubierta permanente de *Brachypodium distachyon* la más eficiente. Los escasos eventos erosivos de alta intensidad son los que producen la mayor parte de la pérdida de suelo, siendo mayor cuanto menor es la superficie de suelo cubierta.

Debido a que las lluvias en la zona centro de España son más erosivas en primavera y en otoño, los olivares de esta zona deberían mantener una cubierta protectora del suelo durante ambas estaciones. Por ello, una cubierta vegetal permanente constituye la mejor alternativa (Capítulo 3).

5. Los suelos yesíferos son frágiles y fácilmente degradables, por lo que las potenciales mejoras de las cubiertas vegetales anuales sobre este tipo de suelos se ven ralentizadas, siendo tres años de manejo insuficientes para observar mejoras significativas en la mayoría de los parámetros estudiados, como han sido la infiltración, la macro, meso y microporosidad del suelo, y el carbono y nitrógeno de la fracción lábil. El manejo con una cubierta vegetal permanente (*Brachypodium distachyon*) sí que se ha mostrado efectivo para la mejora de las propiedades del suelo, en concreto aumentado el carbono orgánico del suelo en 1 Mg ha^{-1} $año^{-1}$, incrementando el contenido de N del suelo y mejorando su estructura (Capítulo 4).

6. La estabilidad de los agregados es un indicador de la erodibilidad del suelo y aumenta con el manejo con cubiertas vegetales. En suelos yesíferos la estabilidad de los agregados está relacionada con el contenido en carbono de la fracción particulada del suelo (la más lábil) y por tanto con la cantidad de restos vegetales aportados por las cubiertas, más que con la densidad de raíces (Capítulo 4).

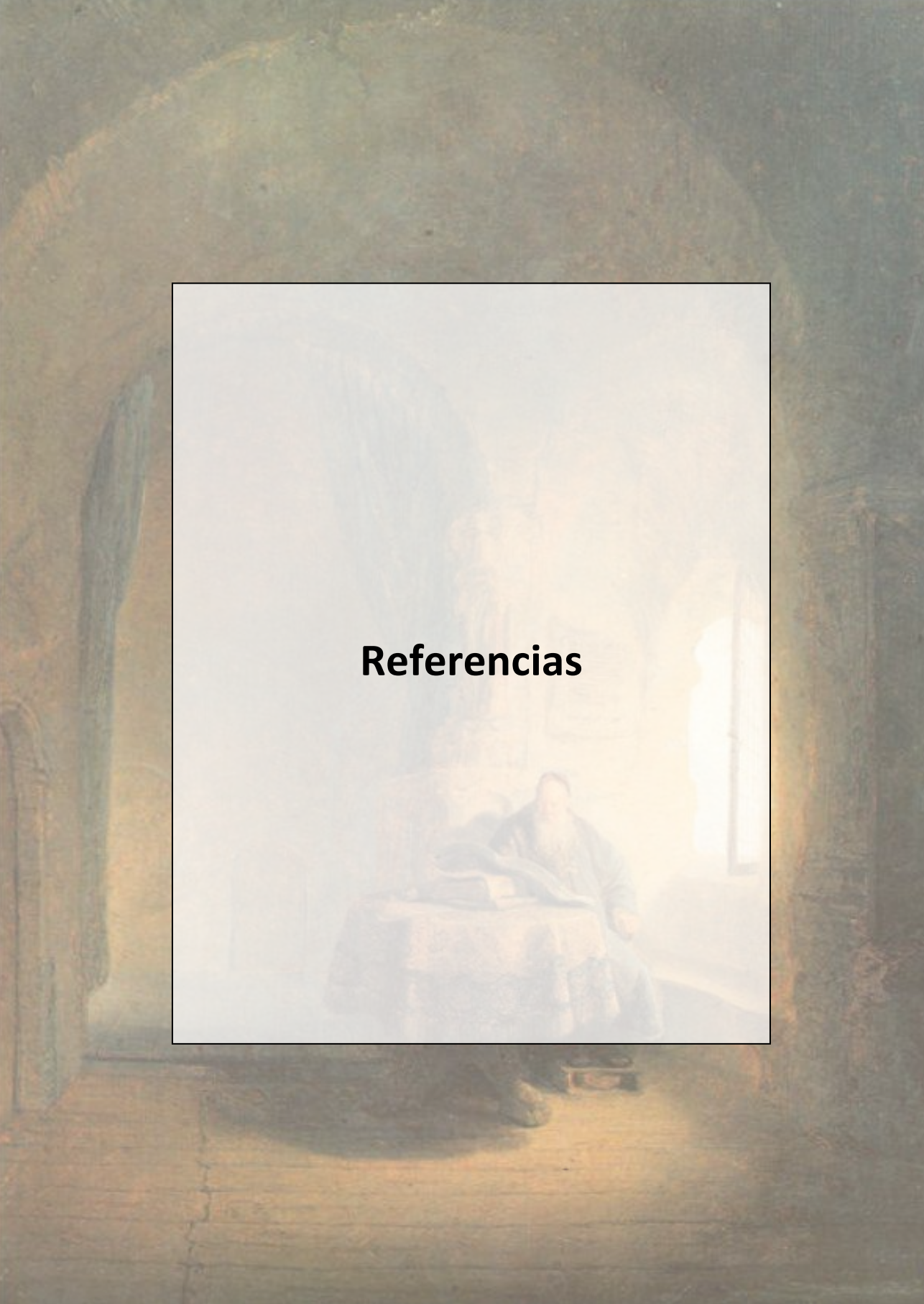
7. Tanto las cubiertas vegetales anuales como la cubierta permanente han incrementado el contenido de agua en el suelo a 30 cm de profundidad entre un 36 y un 55% frente al laboreo, lo que puede redundar en una mejora de la productividad en los olivares de secano (Capítulo 4).

8. La producción de aceituna y de aceite de la variedad de olivo Cornicabra no han estado influidas por el tipo de manejo del suelo, mientras que la campaña agrícola sí que ha tenido un efecto significativo sobre ambos parámetros (Capítulo 5).

9. El efecto de la campaña también ha sido determinante en la calidad del aceite, debido tanto a las diferencias entre años de precipitación como de maduración en las aceitunas. Se han encontrado pequeñas diferencias entre manejos del suelo en algunos parámetros físico-químicos de los aceites de oliva (todos ellos de la categoría Virgen Extra), siendo estas diferencias más importantes en la campaña más seca (Capítulo 5).

10. Para establecer de forma concluyente el efecto que las cubiertas vegetales ejercen sobre la cantidad y calidad del aceite se necesitan más años de estudio, teniendo que ser incluidos parámetros nutricionales y del estado hídrico de los árboles para lograr una visión más completa (Capítulo 5).

11. La reticencia de los agricultores madrileños a emplear cubiertas vegetales tiene que ser salvada por la Administración Regional. El Gobierno de la Comunidad de Madrid cuenta en la actualidad con los mecanismos necesarios para el incentivo de las cubiertas vegetales a través de ayudas directas (Condicionalidad del Pago Básico y Pago Verde) o mediante ayudas al desarrollo rural (Capítulo 3).



Referencias

Abdel-Aziz RAA, Salem SE & Al-Bitar L (2008) Effect of inter-cropping cover crops on citrus orchards growth and fruiting under Toshka conditions. Journal of Agricultural and Veterinary Sciences, 1(2): 101-110.

Acin-Carrera M, Marques MJ, Carral P, Alvarez AM, Lopez C, Martin-Lopez B & Gonzalez JA (2013) Impacts of land-use intensity on soil organic carbon content, soil structure and water-holding capacity. *Soil use and Management*, 29(4): 547-556. doi: 10.1111/sum.12064.

Alcántara C, Pujadas A & Saavedra M (2011) Management of cruciferous cover crops by mowing for soil and water conservation in southern Spain. *Agricultural Water Management*, 98(6): 1071-1080. doi: 10.1016/j.agwat.2011.01.016.

Allen RG, Pereira LS, Raes D & Smith M (1998) Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome.

Almagro M & Martinez-Mena M (2014) Litter decomposition rates of green manure as affected by soil erosion, transport and deposition processes, and the implications for the soil carbon balance of a rainfed olive grove under a dry Mediterranean climate. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 196(0): 167-177. doi: 10.1016/j.agee.2014.06.027.

Alvarez S, Soriano MA, Landa BB & Gómez JA (2007) Soil properties in organic olive groves compared with that in natural areas in a mountainous landscape in southern Spain. *Soil use and Management*, 23(4): 404-416. doi: 10.1111/j.1475-2743.2007.00104.x.

Arnold E (1992) *World Atlas of Desertification.* UNEP ed., London: pp. 69.

Arnoldus H (1977) Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletins (FAO)*.

Assefa E & Hans-Rudolf B (2015) Farmers' perception of land degradation and traditional knowledge in southern Ethiopia? Resilience and Stability. *Land Degradation & Development*, 27(6):1552-1561. doi: 10.1002/ldr.2364.

Bagarello V & Ferro V (2004) Plot-scale measurement of soil erosion at the experimental area of Sparacia (southern Italy). *Hydrological Processes*, 18(1): 141-157. doi: 10.1002/hyp.1318.

Bagarello V, Iovino M & Lai J (2016) Testing steady-state analysis of single-ring and square pressure infiltrometer data. *Geoderma*, 261: 101-109. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.07.002.

Barbera V, Poma I, Gristina L, Novara A & Egli M (2012) Long-term cropping systems and tillage management effects on soil organic carbon stock and steady state level of C sequestration rates in a semiarid environment. *Land Degradation & Development*, 23(1): 82-91. doi: 10.1002/ldr.1055.

Barranco D, Trujillo I & Rallo L (2005) Elaiografía hispánica. En: Rallo, L., Barranco, D., Caballero, J.M., del Río, C., Martín, A., Tous, J. y Trujillo, I.(eds.). *Variedades de Olivo en España.* Junta de Andalucía, MAPA y Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 45-231.

Barthes B, Azontonde A, Boli BZ, Prat C & Roose E (2000) Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *European Journal of Soil Science*, 51(3): 485-495. doi: 10.1046/j.1365-2389.2000.00322.x.

Beltrán G, Uceda M, Hermoso M & Frías L (2008) Maduración. En: Barranco, D., Fernández-Escobar, R. y Rallo, L.(eds.). *El cultivo del olivo.* 6ª Edición ed. Ediciones Mundi-Prensa y Junta de Andalucía, Madrid. 163-187.

Berenguer MJ, Vossen PM, Grattan SR, Connell JH & Polito VS (2006) Tree irrigation levels for optimum chemical and sensory properties of olive oil. *HortScience*, 41(2): 427-432.

Bienes R, Guerrero-Campo J, Aroca JA, Gómez B, Nicolau JM & Espigares T (2000) Runoff coefficient and soil erosion rates in croplands in a Mediterranean-continental region in Central Spain. En: Rubio, J.L., Morgan, R.P.C. y Andreu, V.(eds.). *Proceedings of the Third International Congress Man and Soil at the Third Millenium.* Geoforma, Logroño. 1359-1368.

Bienes R, Pérez R & Gómez B (2002) La erosión. *Agricultura*.

Bienes R & Marques MJ, (2008) Rill and interril erosion produced by a single-storm event in an olive grove in central SpainAnonymous *Proceedings of the Eurosoil Congress*. Viena.

Bienes R, Ruiz M & Marques MJ (2010) Pérdida de suelo, fósforo y materia orgánica por erosión hídrica en parcelas revegetadas con matorral autóctono bajo clima semiárido. *Revista De Ciências Agrárias*, 33(1): 58-69.

Bienes R, Marques MJ & Ruiz-Colmenero M (2012) Cultivos herbáceos, Viñedos y Olivares. El manejo tradicional del suelo y sus consecuencias en la erosión hídrica. *Cuadernos De Investigación Geográfica*, 38(1): 49-74.

Bienes R (2013) Estudio y elaboración de una Cartografía de los suelos de la Marca de Garantía "Aceite De Madrid". IMIDRA ed., Madrid.

Bienes R, Marques MJ, Sastre B, García-Díaz A & Ruiz-Colmenero M (2016) Eleven years after shrub revegetation in semiarid eroded soils. Influence in soil properties. *Geoderma*, 273: 106-114. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.03.023.

Blake GR & Hartge KH (1986). Bulk Density. En: Klute, A.(ed.). *Methods of soil analysis, Part I. Physical and mineralogical methods: Agronomy Monograph no. 9.* 2 nd. ed. SSSA, Madison, Wisconsin. 363-375.

Boardman JK-aJ (2009) Evidence from field-based studies of rates of soil erosion on degraded land in the central Karoo, South Africa. *Geomorphology*, 103: 455–465.

Boardman J (2006) Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*, 68(2–3): 73-86. doi: 10.1016/j.catena.2006.03.007.

Boix-Fayos C, Martinez-Mena M, Arnau-Rosalén E, Calvo-Cases A, Castillo V & Albaladejo J (2006) Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews*, 78(3–4): 267-285. doi: 10.1016/j.earscirev.2006.05.005.

Boix-Fayos C, Martinez-Mena M, Calvo-Cases A, Arnau-Rosalén E, Albaladejo J & Castillo V (2007) Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(1): 85-101. doi: 10.1002/esp.1382.

Breton C, Terral J, Pinatel C, Médail F, Bonhomme F & Bervillé A (2009) The origins of the domestication of the olive tree. *Comptes Rendus Biologies*, 332(12): 1059-1064. doi: 10.1016/j.crvi.2009.08.001.

Calatrava-Leyva J, Franco JA & Gonzalez-Roa MC (2007) Analysis of the adoption of soil conservation practices in olive groves: the case of mountainous areas in southern Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(3): 249-258.

Caruso G, Gucci R & Sifola MI (2011) Soil Management Affects Yield Components of Young Olive Trees under Deficit Irrigation. *Acta Horticulturae*, 924: 219-223. doi: 10.17660/ActaHortic.2011.924.27.

Caruso G, Gucci R, Urbani S, Esposto S, Taticchi A, Di Maio I, Selvaggini R & Servili M (2014) Effect of different irrigation volumes during fruit development on quality of virgin olive oil of cv. Frantoio. *Agricultural Water Management*, 134(0): 94-103. doi: 10.1016/j.agwat.2013.12.003.

Celette F, Gaudin R & Gary C (2008) Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *European Journal of Agronomy*, 29: 153-162.

Cerdà A (1998) Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. *Catena*, 32(2): 73-86. doi: 10.1016/S0341-8162(98)00041-1.

Cerdà A, Jurgensen MF & Bodi MB (2009) Effects of ants on water and soil losses from organically-managed citrus orchards in eastern Spain. *Biologia*, 64(3): 527-531. doi: 10.2478/s11756-009-0114-7.

Cerdà A, Gonzalez-Pelayo O, Gimenez-Morera A, Jordan A, Pereira P, Novara A, Brevik EC, Prosdocimi M, Mahmoodabadi M, Keesstra S, Garcia Orenes F & Ritsema CJ (2016) Use of barley straw residues to avoid high erosion and runoff rates on persimmon plantations in Eastern Spain under low frequency-high magnitude simulated rainfall events. *Soil Research*, 54(2): 154-165. doi: 10.1071/SR15092.

Colen L, Turkelboom F, Van Steenwinkel S, Al Ahmed K, Deckers J & Poesen J (2016) How the Soil Moves Upward in the Olive Orchards of NW Syria: Sustainability Analysis of a Local Innovation. *Land Degradation & Development*, 27(2): 416-426. doi: 10.1002/ldr.2259.

Commission Regulation (EC) 640/2008, Commission Regulation (EC) 640/2008 of 4 July 2008 amending Regulation (EEC) 2568/91 on the characteristics of olive oil and olive-residue oil and on the relevant methods of analysis.

Connor D & Fereres E (2005) The physiology of adaptation and yield expression in olive. *Hortic.Rev*, 31: 155-229.

Connor D (2005) Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11): 1181-1189. doi: 10.1071/AR05169.

Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid (2008) *Mapa agrológico de la Comunidad de Madrid. Escala 1:50.000.*

Corleto A & Cazzato E (2008) Effects of different soil management practices on production, quality and soil physico-chemical characteristics of an olive grove in Southern Italy. *Acta Horticulturae*(767): 319-328. doi: 10.17660/ActaHortic.2008.767.33.

Correia CM, Brito C, Sampaio A, Dias AA, Bacelar E, Gonçalves B, Ferreira H, Moutinho-Pereira J & Rodrigues MA (2015) Leguminous cover crops improve the profitability and the sustainability of rainfed olive (*Olea europaea* L.) orchards: from soil biology to physiology

of yield determination. *Procedia Environmental Sciences*, 29: 282-283. doi: 10.1016/j.proenv.2015.07.213.

Dag A, Kerem Z, Yogev N, Zipori I, Lavee S & Ben David E (2011) Influence of time of harvest and maturity index on olive oil yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 127(3): 358-366.

de Baets S, Poesen J, Gyssels G & Knapen A (2006) Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 76(1-2): 54-67. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.10.002.

de Snoo GR, Herzon I, Staats H, Burton RJF, Schindler S, van Dijk J, Lokhorst AM, Bullock JM, Lobley M, Wrbka T, Schwarz G & Musters CJM (2013) Toward effective nature conservation on farmland: making farmers matter. *Conservation Letters*, 6(1): 66-72. doi: 10.1111/j.1755-263X.2012.00296.x.

de Vente J, Poesen J, Verstraeten G, Van Rompaey A & Govers G (2008) Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change*, 60(3): 393-415. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.05.002.

del Rio C & Vallejo MA (2012) Comparative trial of oil olive cultivars under dry and irrigated conditions in southern Spain - Preliminary Results. *Vi International Symposium on Olive Growing*, 949: 399-402.

Dercon G, Mabit L, Hancock G, Nguyen ML, Dornhofer P, Bacchi OOS, Benmansour M, Bernard C, Froehlich W, Golosov VN, Haciyakupoglu S, Hai PS, Klik A, Li Y, Lobb DA, Onda Y, Popa N, Rafiq M, Ritchie JC, Schuller P, Shakhashiro A, Wallbrink P, Walling DE, Zapata F & Zhang X (2012) Fallout radionuclide-based techniques for assessing the impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality: an overview of the main lessons learnt under an FAO/IAEA Coordinated Research Project. *Journal of Environmental Radioactivity*, 107(0): 78-85. doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.01.008.

Dewis J & Freitas F (1970) Physical and chemical methods of soil and water analysis. *Soils Bulletin*, 10.

Du P & Walling DE (2011) Using ^{137}Cs measurements to investigate the influence of erosion and soil redistribution on soil properties. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(5): 717-726. doi: 10.1016/j.apradiso.2011.01.022.

Dunjo G, Pardini G & Gispert M (2004) The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a microplot scale, in a small Mediterranean catchment. *Journal of Arid Environments*, 57(2): 239-256. doi: 10.1016/S0140-1963(03)00097-1.

Duran-Zuazo VH & Rodriguez-Pleguezuelo CR (2008) Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1): 65-86. doi: 10.1051/agro:2007062.

EEA (2015) The European environment — state and outlook 2015: synthesis report. European Environment Agency ed., Copenhagen. pp. 212.

Elías-Castillo F & Gimenez Ortiz R (1965) *Evapotranspiraciones potenciales y balances de agua en españa.* Direccion General de Agricultura, Ministerio de Agricultura, Madrid: pp. 293.

Elías-Castillo F & Ruiz Beltrán L (1979) *Precipitaciones máximas de España.* ICONA-MAPA. ed., Madrid: pp. 545.

Escolar D, Haro MR & Ayuso J (2007) The color space of foods: Virgin olive oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(6): 2085-2093. doi: 10.1021/jf062899v.

Espejo-Perez AJ, Rodriguez-Lizana A, Ordonez R & Giráldez JV (2013) Soil loss and runoff reduction in olive-tree dry-farming with cover crops. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6): 2140-2148. doi: 10.2136/sssaj2013.06.0250.

European Soil Data Centre (ESDAC) (2015) *Soil loss by water erosion in the European Union.* Disponible en: esdac.jrc.ec.europa.eu.

Fang H, Li Q, Sun L & Cai Q (2012) Using ^{137}Cs to study spatial patterns of soil erosion and soil organic carbon (SOC) in an agricultural catchment of the typical black soil region, Northeast China. *Journal of Environmental Radioactivity*, 112(0): 125-132. doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.05.018.

FAO (1990) Management of Gypsiferous Soils. FAO Soils Bulletin 62. FAO, Rome.

FAO and ITPS (2015) *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report.* Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils ed., Rome, Italy.

FAOSTAT, 2015. *Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAOSTAT Database.* Disponible en: http://faostat3.fao.org.

Faugier J & Sargeant M (1997) Sampling hard to reach populations. *Journal of Advanced Nursing*, 26(4): 790-797.

Fernández J (2014) Understanding olive adaptation to abiotic stresses as a tool to increase crop performance. *Environmental and Experimental Botany*, 103(0): 158-179. doi: 10.1016/j.envexpbot.2013.12.003.

Fernandez-Romero ML, Parras-Alcantara L, Lozano-Garcia B, Clark JM & Collins CD (2016a) Soil quality assessment based on carbon stratification index in different olive grove management practices in Mediterranean areas. *Catena*, 137: 449-458. doi: 10.1016/j.catena.2015.10.019.

Fernandez-Romero ML, Lozano-Garcia B, Parras-Alcantara L, Collins CD & Clark JM (2016b) Effects of land management on different forms of soil carbon in olive groves in mediterranean areas. *Land Degradation & Development*, 27(4): 1186-1195. doi: 10.1002/ldr.2327.

Ferraj B, Teqja Z, Susaj L, Fasllia N, Gjeta Z, Vata N & Balliu A (2011) Effects of different soil management practices on production and quality of olive groves in Southern Albania. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 9(3-4): 430-433.

Fleskens L (2007) Conservation scenarios for olive farming on sloping land in the Mediterranean. Wageningen Universiteit, Wageningen: pp. 217.

Fleskens L & Stroosnijder L (2007) Is soil erosion in olive groves as bad as often claimed? *Geoderma*, 141(3-4): 260-271. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.06.009.

Francia Martinez JR, Duran-Zuazo VH & Martinez Raya A (2006) Environmental impact from mountainous olive orchards under different soil-management systems (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 358(1-3): 46-60. doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.05.036.

Franco JA & Calatrava-Leyva J (2006) Adoption of soil erosion control practices in southern Spain olive grovesAnonymous *26th Conference of International Association of Agricultural Economists, Queensland*.

García-Díaz A, Bienes R & Sastre B (2015) Study of climatic variations and its influence on erosive processes in recent decades in one location of central Spain. En: Lolllino *et al.*(ed.). *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 1.* Springer International Publishing, Switzerland. 105-108.

García-Díaz A, Allas RB, Gristina L, Cerdà A, Pereira P & Novara A (2016) Carbon input threshold for soil carbon budget optimization in eroding vineyards. *Geoderma*, 271: 144-149. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.02.020.

García-Díaz A, Bienes R, Sastre B, Novara A, Gristina L & Cerdà A (2017) Nitrogen losses in vineyards under different types of soil groundcover. A field runoff simulator approach in central Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236: 256-267. doi: 10.1016/j.agee.2016.12.013.

García-Estríngana P, Alegre Álvaro J, Alonso Blázquez N & Guerrero E (2005). Soil coverage measure methods in small plots assays [Determinación de la cobertura del suelo en ensayos de pequeña parcelauna comparación de métodos]. En: Jimenez Ballesta, R. y Alvarez Gonzalez, A.M.(eds.). *Control de la degradación de suelos.* Madrid. 275-279.

García-León M, Manjón G & Sánchez-Angulo C (1993) 99 Tc/^{137}Cs activity ratios in rainwater samples collected in the South of Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*, 20(1): 49-61.

García-Ruiz J & López Bermúdez F (2009) *La erosión del suelo en España.* 1ª ed. Sociedad Española de Geomorfología (SEG), Zaragoza: pp. 441.

García-Ruiz JM (2010) The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena*, 81(1): 1-11. doi: 10.1016/j.catena.2010.01.001.

García-Ruiz JM, Nadal-Romero E, Lana-Renault N & Beguería S (2013) Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, 198: 20-36. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.05.023.

García-Ruiz JM, Beguería S, Lana-Renault N, Nadal-Romero E & Cerdà A (2017) Ongoing and emerging questions in water erosion studies. *Land Degradation & Development*, 28(1): 5-21. doi: 10.1002/ldr.2641.

Gaussen H and de Philippis A (1955) *La limite Eu-méditerranéenne et Les régions de transition (dressée dáprès La répartition De l'olivier).* Mapa a color 1:5,000,000 ed. Rome: FAO Division des Resources Forestières.

Gerlach T (1967) Hillslope for measuring sediment movement. *Revue Geomorphology Dynamic*, 4: 173-175.

Gessesse B, Bewket W & Braeuning A (2015) Model-based characterization and monitoring of runoff and soil erosion in response to land use/land cover changes in the Modjo watershed, Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 26(7): 711-724. doi: 10.1002/ldr.2276.

Giller KE (2001) Nitrogen fixation in tropical cropping systems. CABI Publishing, Wallingford, UK.

Gómez JA, Giráldez JV, Pastor M & Fereres E (1999) Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil and Tillage Research*, 52(3–4): 167-175. doi: 10.1016/S0167-1987(99)00078-1.

Gómez JA, Nearing M, Giráldez JV & Alberts E (2001) Analysis of sources of variability of runoff volume in a 40 plot experiment using a numerical model. *Journal of Hydrology*, 248(1): 183-197.

Gómez JA, Romero P, Giráldez JV & Fereres E (2004) Experimental assessment of runoff and soil erosion in an olive grove on a Vertic soil in southern Spain as affected by soil management. *Soil use and Management*, 20(4): 426-431. doi: 10.1079/SUM2004275.

Gómez JA & Giráldez JV, (2007) Soil and water conservation. A European approach through ProTerra projectsAnonymous *Proceedings of the European Congress on Agriculture and the Environment*. Seville.

Gómez JA, Guzmán G, Giráldez JV & Fereres E (2009a) The influence of cover crops and tillage on water and sediment yield, and on nutrient, and organic matter losses in an olive orchard on a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 106(1): 137-144. doi: 10.1016/j.still.2009.04.008.

Gómez JA, Sobrinho TA, Giráldez JV & Fereres E (2009b) Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain. *Soil & Tillage Research*, 102(1): 5-13. doi: 10.1016/j.still.2008.05.005.

Gómez JA, Llewellyn C, Basch G, Sutton PB, Dyson JS & Jones CA (2011) The effects of cover crops and conventional tillage on soil and runoff loss in vineyards and olive groves in several Mediterranean countries. *Soil use and Management*, 27(4): 502-514. doi: 10.1111/j.1475-2743.2011.00367.x.

Gómez JA, Vanwalleghem T, De Hoces A & Taguas EV (2014) Hydrological and erosive response of a small catchment under olive cultivation in a vertic soil during a five-year period: Implications for sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 188(0): 229-244. doi: 10.1016/j.agee.2014.02.032.

Gómez JA, Campos M, Guzmán G, Castillo-Llanque F, Vanwalleghem T, Lora Á & Giráldez JV (2017) Soil erosion control, plant diversity, and arthropod communities under heterogeneous cover crops in an olive orchard. *Environmental Science and Pollution Research*: 1-13. doi: 10.1007/s11356-016-8339-9.

Gómez-Rico A, Salvador MD, La Greca M & Fregapane G (2006) Phenolic and volatile compounds of extra virgin olive oil (*Olea europaea* L. cv. Cornicabra) with regard to fruit ripening and irrigation management. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(19): 7130-7136. doi: 10.1021/jf060798r.

Gómez-Rico A, Salvador MD, Moriana A, Pérez D, Olmedilla N, Ribas F & Fregapane G (2007) Influence of different irrigation strategies in a traditional Cornicabra cv. olive orchard on virgin olive oil composition and quality. *Food Chemistry*, 100(2): 568-578. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.09.075.

Gómez-Rico A, Salvador MD & Fregapane G (2009) Virgin olive oil and olive fruit minor constituents as affected by irrigation management based on SWP and TDF as compared to ETc in medium-density young olive orchards (*Olea europaea* L. cv. Cornicabra and Morisca). *Food Research International*, 42(8): 1067-1076. doi: 10.1016/j.foodres.2009.05.003.

Gonzalez-Gonzalez I, Grau Corbi JM, Fernandez Cancio A, Jimenez Ballesta R & Gonzalez Cascon MR (2012) Soil carbon stocks and soil solution chemistry in *Quercus ilex* stands in Mainland Spain. *European Journal of Forest Research*, 131(6): 1653-1667. doi: 10.1007/s10342-012-0623-8.

Gonzalez-Sanchez EJ, Veroz-Gonzalez O, Blanco-Roldan GL, Marquez-Garcia F & Carbonell-Bojollo R (2015) A renewed view of conservation agriculture and its evolution over the last decade in Spain. *Soil and Tillage Research*, 146, Part B: 204-212. doi: 10.1016/j.still.2014.10.016.

Gucci R, Caruso G, Bertolla C, Urbani S, Taticchi A, Esposto S, Servili M, Sifola MI, Pellegrini S, Pagliai M & Vignozzi N (2012) Changes of soil properties and tree performance induced by soil management in a high-density olive orchard. European Journal of Agronomy, 41(0): 18-27. doi: 10.1016/j.eja.2012.03.002.

Gutiérrez F, Arnaud T & Albi MA (1999) Influence of ecological cultivation on virgin olive oil quality. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(5): 617-621.

Gutiérrez F, Jimenez B, Ruiz A & Albi MA (1999) Effect of olive ripeness on the oxidative stability of virgin olive oil extracted from the varieties Picual and Hojiblanca and on the different components involved. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(1): 121-127. doi: 10.1021/jf980684i.

Hackett C (1968) A study of the root system of barley. I. Effects of nutrition on two varieties . *New Phytologist*, 67(2): 287-299. doi: 10.1111/j.1469-8137.1968.tb06384.x.

He Q & Walling DE (1996) Interpreting particle size effects in the adsorption of ^{137}Cs and unsupported 210Pb by mineral soils and sediments. *Journal of Environmental Radioactivity*, 30(2): 117-137. doi: 10.1016/0265-931X(96)89275-7.

Hernández AJ, Lacasta C & Pastor J (2005) Effects of different management practices on soil conservation and soil water in a rainfed olive orchard. *Agricultural Water Management*, 77(1–3): 232-248. doi: 10.1016/j.agwat.2004.09.030.

Hrachowitz M, Maringer F, Steineder C & Gerzabek MH (2005) Soil redistribution model for undisturbed and cultivated sites based on Chernobyl-derived Cesium-137 fallout. *Journal of Environmental Quality*, 34: 1302-1310. doi: 10.2134/jeq2004.0442.

Huqi B, Dhima K, Vasilakoglou I, Keco R & Salaku F (2009) Weed flora and weed management in established olive groves in Albania. *Weed Biology and Management*, 9(4): 276-285. doi: 10.1111/j.1445-6664.2009.00351.x.

Hurtado S, Garcia-Leon M & Garcia-Tenorio R (2004) GEANT4 code for simulation of a germanium gamma-ray detector and its application to efficiency calibration. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 518(3): 764-774.

IBM Corp. (2010) IBM SPSS Statistics for Windows, Version 19.0. 2010th ed. Armonk, NY: , 2010.

IECM (2013) *Instituto de estadística de la Comunidad de Madrid-DESVAN, Banco De Datos Estructurales.* Disponible en: http://www.madrid.org/desvan/desvan/.

IGME (1975) *Mapa Geológico de España, E. 1/50.000 (Hoja 606: Chinchón).* 1ª ed. Ministerio de Industria. Servicio de publicaciones., pp. 29.

IGME (1997) *Mapa geológico 1:50.000 hoja nº 606 Chinchón.* Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino.

Imeson AC & Vis M (1984) Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion. *Geoderma*, 34: 185-200. doi: 10.1016/0016-7061(84)90038-7.

International Olive Council (IOC). *Carbon Balance in Olive Oil.* http://carbonbalance.internationaloliveoil.org/es.

IUSS Working Group WRB (2014) World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports nº 106.* FAO, Rome.

Jacinthe P, Lal R, Owens LB & Hothem DL (2004) Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics. *Soil and Tillage Research*, 77(2): 111-123. doi: 10.1016/j.still.2003.11.004.

Jimenez B, Sánchez-Ortiz A, Lorenzo M & Rivas A (2015) Effect of agronomical practices on the nutritional quality of virgin olive oil at different ripening stages. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 92(10): 1491-1501. doi: 10.1007/s11746-015-2710-8.

Jolivet C, Arrouays D & Bernoux M (1998) Comparison between analytical methods for organic 550 carbon and organic matter determination in sandy spodosols of France. Communications in Soil Science and Plant Analysis 29, 2227–2233.

Jones RJA & Montanarella L (2003) *Land Degradation in Central and Eastern Europe. European Soil Bureau Research Report No.10, EUR 20688 EN.* Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg: pp. 324.

Jordan LM, Bjoerkman T & Vanden Heuvel JE (2016) Annual under-vine cover crops did not impact vine growth or fruit composition of mature cool-climate 'Riesling' Grapevines. *Horttechnology*, 26(1): 36-45.

Kairis O, Karavitis C, Kounalaki A, Salvati L & Kosmas C (2013) The effect of land management practices on soil erosion and land desertification in an olive grove. *Soil use and Management*, 29(4): 597-606. doi: 10.1111/sum.12074.

Karamesouti M, Detsis V, Kounalaki A, Vasiliou P, Salvati L & Kosmas C (2015) Land-use and land degradation processes affecting soil resources: Evidence from a traditional Mediterranean cropland (Greece). *Catena*, 132: 45-55. doi: 10.1016/j.catena.2015.04.010.

Karl A, Merwin IA, Brown MG, Hervieux RA & Vanden Heuvel JE (2016) Impact of undervine management on vine growth, yield, fruit composition, and wine sensory analyses in Cabernet franc. *American Journal of Enology and Viticulture*, 67(3): 269-280. doi: 10.5344/ajev.2016.15061.

Kassam AH, Fischer G & Antoine J (1991) Agro-ecological land resources assessment for agricultural development planning: a case study of Kenya: Resources data base and land productivity. Food & Agriculture Org.

Keesstra S, Pereira P, Novara A, Brevik EC, Azorin-Molina C, Parras-Alcantara L, Jordan A & Cerdà A (2016) Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. *Science of the Total Environment*, 551: 357-366. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.182.

Kinnell PIA (2010) Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, 385(1–4): 384-397. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.01.024.

Kjeldahl J (1883) Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen körpern [New method for the determination of nitrogen in organic substances]. *Zeitschrift Für Analytische Chemie*, 22(1): 366-382.

Koivisto JM (2001) *Sainfoin. Worth Another Look.* Royal Agricultural College, pp. 13.

Kuhn BF & Pedersen HL (2009) Cover crop and mulching effects on yield and fruit quaity in unsprayed organic apple production. *European Journal of Horticultural Science*, 74(6): 247-253.

Kumar K & Goh KM (2000) Biological nitrogen fixation, accumulation of soil nitrogen and nitrogen balance for white clover (*Trifolium repens* L.) and field pea (*Pisum sativum* L.) grown for seed. Field Crops Research, 68(1): 49-59. doi: 10.1016/S0378-4290(00)00109-X.

Lal R (2010) Beyond Copenhagen: mitigating climate change and achieving food security through soil carbon sequestration. *Food Security*, 2(2): 169-177. doi: 10.1007/s12571-010-0060-9.

Lal R (2014). Desertification and Soil Erosion. En: Freedman, B. (ed.). *Global Environmental Change.* Springer Netherlands, Dordrecht. 369-378.

Ledermann T, Herweg K, Liniger H, Schneider F, Hurni H & Prasuhn V (2010) Applying erosion damage mapping to assess and quantify off-site effects of soil erosion in Switzerland. *Land Degradation & Development*, 21(4): 353-366. doi: 10.1002/ldr.1008.

Ligonja PJ & Shrestha RP (2015) Soil erosion assessment in kondoa eroded area in Tanzania using Universal Soil Loss Equation, geographic information systems and socioeconomic approach. *Land Degradation & Development*, 26(4): 367-379. doi: 10.1002/ldr.2215.

Liniger H, Douglas M & Schwilch G, (2004) Towards sustainable land management–'Common sense'and some of the other key missing elements (the WOCAT experience)Anonymous *Proceedings of International Soil Conservation Organization (ISCO) Conference*.

Lopes CM, Monteiro A, Machado JP, Fernandes N & Araujo A (2008) Cover cropping in a sloping non-irrigated vineyard: II - Effects on vegetative growth, yield, berry and wine quality of 'Cabernet Sauvignon' grapevines. *Ciencia E Tecnica Vitivinicola*, 23(1): 37-43.

López I & Lovera C (2012) Manual Para el cumplimiento de la Condicionalidad Olivar. FEGA ed .

López-Miranda J, Pérez-Jiménez F, Ros E, De Caterina R, Badimón L, Covas MI, Escrich E, Ordovás JM, Soriguer F & Abia R (2010) Olive oil and health: summary of the II international conference on olive oil and health consensus report, Jaén and Córdoba (Spain) 2008. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 20(4): 284-294.

López-Vicente M, Navas A, Gaspar L & Machín J (2013) Advanced modelling of runoff and soil redistribution for agricultural systems: The SERT model. *Agricultural Water Management*, 125: 1-12. doi: 10.1016/j.agwat.2013.04.002.

Lupia-Palmieri E (2004). Erosion. En: Goudie, A.(ed.). *Encyclopedia of Geomorphology.* Routledge, London. 331-336.

Mabit L, Benmansour M & Walling DE (2008) Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides ^{137}Cs, ^{210}Pbex and ^{7}Be for assessing soil erosion and sedimentation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(12): 1799-1807. doi: 10.1016/j.jenvrad.2008.08.009.

Mabit L, Chhem-Kieth S, Toloza A, Vanwalleghem T, Bernard C, Amate JI, González de Molina M & Gómez JA (2012) Radioisotopic and physicochemical background indicators to assess soil degradation affecting olive orchards in southern Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 159(0): 70-80. doi: 10.1016/j.agee.2012.06.014.

MAGRAMA (2013) *Encuesta de Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE). Análisis de las plantaciones de olivar en España.* Secretaría General Técnica, Subdirección General de Estadística del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid: pp. 30.

MAGRAMA (2015) *Encuesta de Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE).* Secretaría General Técnica, Subdirección General de Estadística del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.

MAPA (1994) *Métodos Oficiales de Análisis, Tomo III.* Dirección General de Política Alimentaria del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación ed., Madrid.

MAPAMA (2015a) Nota Técnica nº3 De La PAC. Pago para prácticas beneficiosas para el clima y el medio ambiente. Madrid.

MAPAMA (2015b) Nota Técnica nº7 De La PAC. Condicionalidad. Madrid.

MAPAMA (2017). *Inventario de Tecnologías Disponibles en España para la Lucha Contra la Desertificación.* Disponible en: www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desertificacion-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch_inventario_tec.aspx.

Marques MJ, Bienes R, Perez-Rodriguez R & Jimenez L (2008) Soil degradation in Central Spain due to sheet water erosion by low-intensity rainfall events. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(3): 414-423. doi: 10.1002/esp.1564 ER.

Marques MJ, Bienes R, Cuadrado J, Ruiz-Colmenero M, Barbero-Sierra C & Velasco A (2015) Analysing perceptions attitudes and responses of winegrowers about sustainable land management in central Spain. *Land Degradation & Development*, 26(5): 458-467. doi: 10.1002/ldr.2355.

Marques MJ, Schwilch G, Lauterburg N, Crittenden S, Tesfai M, Stolte J, Zdruli P, Zucca C, Petursdottir T, Evelpidou N, Karkani A, AsliYilmazgil Y, Panagopoulos T, Yirdaw E, Kanninen M, Luis Rubio J, Schmiedel U & Doko A (2016) Multifaceted Impacts of Sustainable Land Management in Drylands: A Review. *Sustainability*, 8(2): 177. doi: 10.3390/su8020177.

Marquez-Garcia F, Gonzalez-Sanchez EJ, Castro-Garcia S & Ordonez-Fernandez R (2013) Improvement of soil carbon sink by cover crops in olive orchards under semiarid

conditions. Influence of the type of soil and weed. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(2): 335-346. doi: 10.5424/sjar/2013112-3558.

Martínez Suárez JM, Muñoz Aranda E, Alba Mendoza J & Lanzón Rey A (1975) Informe sobre utilización del analizador de rendimientos "Abencor". *Grasas y Aceites*, 26(6): 379-385.

Martínez-Casasnovas JA & Ramos MC (2006) The cost of soil erosion in vineyard fields in the Penedès–Anoia Region (NE Spain). *Catena*, 68(2–3): 194-199. doi: 10.1016/j.catena.2006.04.007.

Martinez-Mena M, Castillo V & Albaladejo J (2001) Hydrological and erosional response to natural rainfall in a semi-arid area of south-east Spain. *Hydrological Processes*, 15(4): 557-571. doi: 10.1002/hyp.146.

Martinez-Mena M, Castillo V & Albaladejo J (2002) Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. *Geomorphology*, 45(3-4): 261-275. doi: 10.1016/S0169-555X(01)00158-1.

Martinez-Mena M, Lopez J, Almagro M, Boix-Fayos C & Albaladejo J (2008) Effect of water erosion and cultivation on the soil carbon stock in a semiarid area of South-East Spain. *Soil and Tillage Research*, 99(1): 119-129. doi: 10.1016/j.still.2008.01.009.

Martinez-Mena M, López J, Almagro M, Albaladejo J, Castillo V, Ortiz R & Boix-Fayos C (2012) Organic carbon enrichment in sediments: Effects of rainfall characteristics under different land uses in a Mediterranean area. *Catena*, 94(0): 36-42. doi: 10.1016/j.catena.2011.02.005.

Martin-Lammerding D, Hontoria C, Luis Tenorio J & Walter I (2011) Mediterranean dry land farming: effect of tillage practices on selected soil properties. *Agronomy Journal*, 103(2): 382-389. doi: 10.2134/agronj2010.0210.

Merckx T & Pereira HM (2015) Reshaping agri-environmental subsidies: From marginal farming to large-scale rewilding. *Basic and Applied Ecology*, 16(2): 95-103. doi: 10.1016/j.baae.2014.12.003.

Meyer L (1994). Rainfall simulators for soil erosion research. En: Lal, R.(ed.). *Soil erosion research methods.* 2nd ed. Soil and Water Conservation Society-St. Lucie Press, Ankeny (IA)-Delray Beach (FL). 83-103.

Minguez-Mosquera MI, Rejano-Navarro L, Gandul-Rojas B, Sanchez-Gomez AH & Garrido-Fernandez J (1991) Color-Pigment Correlation in Virgin Olive Oil. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 68(5): 332-336.

Molina-Navarro E, Martínez-Pérez S, Sastre-Merlín A & Bienes-Allas R (2014) Catchment erosion and sediment delivery in a limno-reservoir basin using a simple methodology. *Water Resources Management*, 28(8): 2129-2143. doi: 10.1007/s11269-014-0601-7.

Monteleone E, Caporale G, Carlucci A & Pagliarini E (1998) Optimisation of extra virgin olive oil quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 77(1): 31-37. doi: 10.1002/(SICI)1097-0010(199805)77:1<31::AID-JSFA998>3.0.CO;2-F.

Moreno-de las Heras M, Nicolau JM, Merino-Martín L & Wilcox BP (2010) Plot-scale effects on runoff and erosion along a slope degradation gradient. *Water Resources Research*, 46(4): W04503. doi: 10.1029/2009WR007875.

Morgan RPC, Quinton JN, Smith RE, Govers G, Poesen JWA, Auerswald K, Chisci G, Torri D & Styczen ME (1998) The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(6): 527-544. doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5.

Moriana A, Orgaz F, Pastor M & Fereres E (2003) Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3): 425-431.

Moriana A, Pérez-López D, Gómez-Rico A, Salvador MdlD, Olmedilla N, Ribas F & Fregapane G (2007) Irrigation scheduling for traditional, low-density olive orchards: Water relations and influence on oil characteristics. *Agricultural Water Management*, 87(2): 171-179. doi: 10.1016/j.agwat.2006.06.017.

Moyano MJ, Meléndez-Martínez AJ, Alba J & Heredia FJ (2008) A comprehensive study on the colour of virgin olive oils and its relationship with their chlorophylls and carotenoids indexes (I): CIEXYZ non-uniform colour space. *Food Research International*, 41(5): 505-512. doi: 10.1016/j.foodres.2008.03.007.

Mullan D (2013) Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems. *Catena*, 109: 234-246.

Muller G & Gatsner M (1971) Chemical analysis. *Neues Jahrbuch Für Mineralogie Monatshefte*, 10: 466-469.

Mursec M (2011) Agricultural practices impact on soil quality and health. Case studies of Slovenian irrigated or organic orchards (Thesis). Université de Bourgogne; University of Maribor-SLOVENIA.

Nachtergaele FO, Petri M, Biancalani R, van Lynden G, van Velthuizen H (2011) *LADA Technical Report n. 17. Global Land Degradation Information System (GLADIS).* LADA ed.

Nadal-Romero E, González-Hidalgo JC, Cortesi N, Desir G, Gómez JA, Lasanta T, Lucía A, Marín C, Martínez-Murillo JF, Pacheco E, Rodríguez-Blanco ML, Romero Díaz A, Ruiz-Sinoga JD, Taguas EV, Taboada-Castro MM, Taboada-Castro MT, Úbeda X & Zabaleta A (2015) Relationship of runoff, erosion and sediment yield to weather types in the Iberian Peninsula. *Geomorphology*, 228(0): 372-381. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.09.011.

Napoli M & Orlandini S (2015) Evaluating the Arc-SWAT2009 in predicting runoff, sediment, and nutrient yields from a vineyard and an olive orchard in Central Italy. *Agricultural Water Management*, 153: 51-62. doi: 10.1016/j.agwat.2015.02.006.

Navas A & Walling DE (1992) Using caesium-137 to asses sediment movement in a semiarid upland environment in Spain. En: Walling, D.E., Davies, T.R. y Hasholt, B.(eds.). *Erosion, debris flows and environment in mountain regions.* IAHS Publ., 129-138.

Navas A, Walling DE, Quine T, Machín J, Soto J, Domenech S & López-Vicente M (2007) Variability in ^{137}Cs inventories and potential climatic and lithological controls in the central Ebro valley, Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 274(2): 331-339. doi: 10.1007/s10967-007-1119-8.

Navas A, Gaspar L, López-Vicente M & Machín J (2011) Spatial distribution of natural and artificial radionuclides at the catchment scale (South Central Pyrenees). *Radiation Measurements*, 46(2): 261-269.

Nearing MA, Jetten V, Baffaut C, Cerdan O, Couturier A, Hernandez M, Le Bissonnais Y, Nichols MH, Nunes JP, Renschler CS, Souchere V & van Oost K (2005) Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 61(2-3): 131-154. doi: 10.1016/j.catena.2005.03.007.

Nearing MA (2006). Can soil erosion be predicted? En: editor., P.O.(ed.) . *In: Soil erosion and sediment redistribution in river catchments.* CABI Publishing, p. 145-152.

Novara A, Keesstra S, Cerdà A, Pereira P & Gristina L (2016) Understanding the role of soil erosion on CO(2)-C loss using C-13 isotopic signatures in abandoned Mediterranean agricultural land. *Science of the Total Environment*, 550: 330-336. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.095.

Ochoa PA, Fries A, Mejia D, Burneo JI, Ruiz-Sinoga JD & Cerdà A (2016) Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena*, 140: 31-42. doi: 10.1016/j.catena.2016.01.011.

Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS & Dean JF (1954) Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *U.S. Department of Agriculture Circular*.

Orden 25/2015, de 5 de junio (BOR, de 8 de junio de 2015), de la Consejería de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente, por la que se regulan las medidas de Agroambiente y Clima, y de Agricultura Ecológica, contenidas en el Programa de Desarrollo Rural de La Rioja, 2014-2020.

Orden de 8 de abril de 2016 (BOJA, de 12 de abril de 2016), por la que se modifica la Orden de 26 de mayo de 2015, por la que se aprueban en la Comunidad Autónoma de Andalucía las bases reguladoras para la concesión de subvenciones a la Medida 10: Agroambiente y Clima, incluida en el Programa de Desarrollo Rural de Andalucía 2014-2020, y se efectúa la convocatoria para el año 2015, y la Orden de 26 de mayo de 2015, por la que se aprueban en la Comunidad Autónoma de Andalucía las bases reguladoras para la concesión de subvenciones a la Medida 11: Agricultura Ecológica, incluida en el Programa de Desarrollo Rural de Andalucía 2014-2020, y se efectúa la convocatoria para el año 2015.

Ordóñez-Fernández R, Rodriguez-Lizana A, Espejo-Pérez AJ, González-Fernández P & Saavedra MM (2007) Soil and available phosphorus losses in ecological olive groves. *European Journal of Agronomy*, 27(1): 144-153. doi: 10.1016/j.eja.2007.02.006.

Pagliai M & Vignozzi N (2002) The soil pore system as an indicator of soil quality. *Advances in Geoecology,* 35(69): 80.

Palese AM, Nuzzo V, Celano G, Favati F, Pietrafesa A & Galgano F (2008) Effect of soil water availability on yield and some quality parameters of extra virgin oil (Cv. Coratina). *Proceedings of the Fifth International Symposium on Olive Growing, Vols 1 and 2*(791): 357-362.

Palese AM, Vignozzi N, Celano G, Agnelli AE, Pagliai M & Xiloyannis C (2014) Influence of soil management on soil physical characteristics and water storage in a mature rainfed olive orchard. *Soil and Tillage Research*, 144(0): 96-109. doi: 10.1016/j.still.2014.07.010.

Palese AM, Ringersma J, Baartman JEM, Peters P & Xiloyannis C (2015) Runoff and sediment yield of tilled and spontaneous grass-covered olive groves grown on sloping land. *Soil Research*, 53(5): 542-552. doi: 10.1071/SR14350.

Palese AM, Nuzzo V, Favati F, Pietrafesa A, Celano G & Xiloyannis C (2010) Effects of water deficit on the vegetative response, yield and oil quality of olive trees (Olea europaea L., cv Coratina) grown under intensive cultivation. *Scientia Horticulturae*, 125(3): 222-229. doi: 10.1016/j.scienta.2010.03.025.

Panagos P, Meusburger K, Ballabio C, Borrelli P & Alewell C (2014) Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of the Total Environment*, 479–480: 189-200. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.010.

Panagos P, Ballabio C, Borrelli P, Meusburger K, Klik A, Rousseva S, Tadić MP, Michaelides S, Hrabalíková M, Olsen P, Aalto J, Lakatos M, Rymszewicz A, Dumitrescu A, Beguería S & Alewell C (2015a) Rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment*, 511: 801-814. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.008.

Panagos P, Borrelli P, Poesen J, Ballabio C, Lugato E, Meusburger K, Montanarella L & Alewell C (2015b) The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54: 438-447. doi: 10.1016/j.envsci.2015.08.012.

Park E & Smucker AJM (2005) Saturated hydraulic conductivity and porosity within macroaggregates modified by tillage, 69(1): 38-45. doi: 10.2136/sssaj2005.0038.

Parras-Alcantara L, Diaz-Jaimes L & Lozano-Garcia B (2015) Organic farming affects C and N in soils under olive groves in mediterranean areas. *Land Degradation & Development*, 26(8): 800-806. doi: 10.1002/ldr.2231.

Pastor Muñoz-Cobo M (2008). Sistemas de manejo del suelo. En: Barranco, D., Fernández-Escobar, R. y Rallo, L.(eds.). *El cultivo del olivo.* 6ª ed. Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca & Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 239-295.

Patumi M, d'Andria R, Marsilio V, Fontanazza G, Morelli G & Lanza B (2002) Olive and olive oil quality after intensive monocone olive growing (*Olea europaea* L., cv. Kalamata) in different irrigation regimes. *Food Chemistry*, 77(1): 27-34. doi: 10.1016/S0308-8146(01)00317-X.

Perez-Alvarez EP, Garcia-Escudero E & Peregrina F (2015) Soil nutrient availability under cover crops: effects on vines, must, and wine in a Tempranillo vineyard. *American Journal of Enology and Viticulture*, 66(3): 311-320. doi: 10.5344/ajev.2015.14092.

Petrovic J, Dragovic S, Dragovic R, Dordevic M, Dokic M, Zlatkovic B & Walling DE (2016) Using Cs-137 measurements to estimate soil erosion rates in the Pcinja and South Morava River Basins, southeastern Serbia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 158: 71-80. doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.001.

Pieri L, Bittelli M, Hanuskova M, Ventura F, Vicari A & Pisa PR (2009) Characteristics of eroded sediments from soil under wheat and maize in the North Italian Apennines. *Geoderma*, 154(1–2): 20-29. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.09.006.

Pimentel D (2006) Soil Erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8: 119-137. doi: 10.1007/s10668-005-1262-8.

Pimentel D & Burgess M (2013) Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, 3(3): 443-463. doi: 10.3390/agriculture3030443.

Plaza-Bonilla D, Arrúe JL, Cantero-Martínez C, Fanlo R, Iglesias A & Álvaro-Fuentes J (2015) Carbon management in dryland agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4): 1319–1334. doi: 10.1007/s13593-015-0326-x.

Poesen J, Torri D & Bunte K (1994) Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. *Catena*, 23(1): 141-166.

Porta J, López-Acevedo M & Roquero C (1999) *Edafología para la agricultura y el medio ambiente.* 2ª ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid: pp. 807.

Porto P, Walling DE, La Spada C & Callegari G (2016) Validating the use of Cs-137 measurements to derive the slope component of the sediment budget of a small rangeland catchment in southern Italy. *Land Degradation & Development*, 27(3): 798-810. doi: 10.1002/ldr.2388.

Prosdocimi M, Cerdà A & Tarolli P (2016a) Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review. *Catena*, 141: 1-21. doi: 10.1016/j.catena.2016.02.010.

Prosdocimi M, Jordan A, Tarolli P, Keesstra S, Novara A & Cerdà A (2016b) The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. *Science of the Total Environment*, 547: 323-330. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.076.

Quijano L, Gaspar L & Navas A (2016) Lateral and depth patterns of soil organic carbon fractions in a mountain Mediterranean agrosystem. *Journal of Agricultural Science*, 154(2): 287-304. doi: 10.1017/S002185961400135X.

Quine T, Walling, DE, Zhang,X. & Wang Y (1992) Investigation of soil erosion on terraced fields near Yanting, Sichuan Province, China, using caesium-137. En: Walling, D., Davies, T. y Hasholt, B.(eds.). *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992.* IAHS Publication 209, 155-168.

Rabesiranana N, Rasolonirina M, Solonjara AF, Ravoson HN, Raoelina Andriambololona & Mabit L (2016) Assessment of soil redistribution rates by ^{137}Cs and ^{210}Pbex in a typical Malagasy agricultural field. *Journal of Environmental Radioactivity*, 152: 112-118. doi: 10.1016/j.jenvrad.2015.11.007.

Radicetti E, Massantini R, Campiglia E, Mancinelli R, Ferri S & Moscetti R (2016) Yield and quality of eggplant (*Solanum melongena* L.) as affected by cover crop species and residue management. *Scientia Horticulturae*, 204: 161-171. doi: 10.1016/j.scienta.2016.04.005.

Rallo L*, et al.* (2005) *Variedades de olivo en España.* Junta de Andalucía, MAPA y Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

Rasse DP, Rumpel C & Dignac M (2005) Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269(1-2): 341-356. doi: 10.1007/s11104-004-0907-y.

Real Decreto 1075/2014, de 19 de diciembre (BOE, de 20 de diciembre de 2014), sobre la aplicación a partir de 2015 de los pagos directos a la agricultura y a la ganadería y otros regímenes de ayuda, así como sobre la gestión y control de los pagos directos y de los pagos al desarrollo rural.

Real Decreto 1172/2015, de 29 de diciembre (BOE, de 30 de diciembre de 2015), por el que se modifica el Real Decreto 1075/2014, de 19 de diciembre, sobre la aplicación a partir de 2015 de los pagos directos a la agricultura y a la ganadería y otros regímenes de ayuda, así como sobre la gestión y control de los pagos directos y de los pagos al desarrollo rural, el Real Decreto 1076/2014, de 19 de diciembre, sobre asignación de derechos de régimen de pago básico de la Política Agrícola Común, y el Real Decreto 1077/2014, de 19 de diciembre, por el que se regula el sistema de información geográfica de parcelas agrícolas.

Reglamento (UE) 1305/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo (DOUE, de 20 de diciembre de 2013) de 17 de diciembre de 2013 relativo a la ayuda al desarrollo rural a través del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (Feader) y por el que se deroga el Reglamento (CE) 1698/2005 del Consejo.

Reglamento (UE) 1307/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo (DOUE, de 20 de diciembre de 2013) de 17 de diciembre de 2013 por el que se establecen normas aplicables a los pagos directos a los agricultores en virtud de los regímenes de ayuda incluidos en el marco de la Política Agrícola Común y por el que se derogan los Reglamentos (CE) 637/2008 y (CE) 73/2009 del Consejo.

Regulation (EEC) 2568/91 (DOUE, de 17 de diciembre de 1991) Regulation (EEC) 2568/91 on the characteristics of olive and olive pomace oils and their analytical methods.

Regulation (EU) 1348/2013 (DOUE, de 16 de diciembre de 2013), Commission implementing Regulation (EU) 1348/2013 of 16 December 2013 amending Regulation (EEC) 2568/91 on the characteristics of olive oil and olive-residue oil and on the relevant methods of analysis.

Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK & Yoder DC (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook nº 703. USDA ed., pp. 407.

Resolución de 9 de abril de 2015 de la Dirección General del Medio Ambiente (BOCM, de 27 de abril de 2015), sobre la consideración de un único período de cultivo para el cumplimiento del pago para prácticas agrícolas beneficiosas para el clima y el medio ambiente.

Richards LA (1941) A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Science*, 51(5): 377-386.

Ritchie JC & McHenry JR (1990) Application of radioactive fallout Cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review. *J.Environ.Qual.*, 19(2): 215-233.

Robinson GW (1922) A new method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. *The Journal of Agricultural Science*, 12(03): 306-321.

Roca M & Minguez-Mosquera MI (2001) Change in the natural ratio between chlorophylls and carotenoids in olive fruit during processing for virgin olive oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 78(2): 133-138. doi: 10.1007/s11746-001-0233-z.

Rodrigo Comino J, Iserloh T, Morvan X, Malam Issa O, Naisse C, Keesstra SD, Cerdà A, Prosdocimi M, Arnáez J, Lasanta T, Ramos MC, Marques MJ, Ruiz Colmenero M, Bienes R, Ruiz Sinoga JD, Seeger M & Ries JB (2016) Soil erosion processes in european vineyards: a

qualitative comparison of rainfall simulation measurements in Germany, Spain and France. *Hidrology*, 3(6) doi: 10.3390/hydrology3010006.

Rodrigues MA, Dimande P, Pereira EL, Ferreira IQ, Freitas S, Correia CM, Moutinho-Pereira J & Arrobas M (2015) Early-maturing annual legumes: an option for cover cropping in rainfed olive orchards. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 103(2): 153-166. doi: 10.1007/s10705-015-9730-5.

Rodríguez-Lizana A (2003) Cubiertas vegetales en el olivar. *Agricultura*.

Rotondi A, Bendini A, Cerretani L, Mari M, Lercker G & Toschi TG (2004) Effect of olive ripening degree on the oxidative stability and organoleptic properties of cv. Nostrana di Brisighella extra virgin olive oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(11): 3649-3654. doi: 10.1021/jf049845a.

Ruiz-Colmenero M, Bienes R & Marques MJ (2011) Soil and water conservation dilemmas associated with the use of green cover in steep vineyards. *Soil and Tillage Research*, 117(0): 211-223. doi: 10.1016/j.still.2011.10.004.

Ruiz-Colmenero M, Bienes R, Eldridge DJ & Marques MJ (2013) Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain. *Catena*, 104(0): 153-160. doi: 10.1016/j.catena.2012.11.007.

Salvador MD, Aranda F & Fregapane G (2001a) Influence of fruit ripening on 'Cornicabra' virgin olive oil quality - A study of four successive crop seasons. *Food Chemistry*, 73(1): 45-53. doi: 10.1016/S0308-8146(00)00276-4.

Salvador M, Aranda F, Gomez-Alonso S & Fregapane G (2001b) Cornicabra virgin olive oil: a study of five crop seasons. Composition, quality and oxidative stability. *Food Chemistry*, 74(3): 267-274. doi: 10.1016/S0308-8146(01)00148-0.

Santín-Montanyá MI, Martín-Lammerding D, Walter I, Zambrana E & Tenorio JL (2013) Effects of tillage, crop systems and fertilization on weed abundance and diversity in 4-year dry land winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 48(0): 43-49. doi: 10.1016/j.eja.2013.02.006.

Sastre B, Barbero-Sierra C, Bienes R, Marques MJ & García-Díaz A (2017a) Soil loss in an olive grove in Central Spain under cover crops and tillage treatments, and farmer perceptions. *Journal of Soils and Sediments*: 17(3):873-888. doi: 10.1007/s11368-016-1589-9.

Sastre B, Bienes R & García-Díaz A (2017b) Estimating soil redistribution rates in an agricultural microcatchment by 137Cs: a case study in Central Spain on gypsiferous soil. En revisión en *Journal of Environmental Radioactivity*.

Sastre B, Bienes R & García-Díaz A (2017c) Effects of cover crops on soil properties in an olive grove in gypsiferous soil under semiarid conditions. En revisión tras incluir los comentarios de los revisores en *Agriculture, Ecosystems and Environment*.

Sastre B, Pérez-Jiménez MÁ, Bienes R, García-Díaz A & de Lorenzo C (2016) The effect of soil management on olive yield and VOO quality in a rainfed olive grove of central Spain. *Journal of Chemistry*, 2016 (Article ID 4974609): 15. doi: 10.1155/2016/4974609

S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens IA, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J & Manning DA (2011) Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367): 49-56. doi: 10.1038/nature10386.

Schoorl J, Boix Fayos C, de Meijer R, van der Graaf E & Veldkamp A (2004) The Cs-137 technique applied to steep Mediterranean slopes (Part I): the effects of lithology, slope morphology and land use. *Catena*, 57(1): 15-34. doi: 10.1016/j.catena.2003.08.003.

Servili M, Esposto S, Lodolini E, Selvaggini R, Taticchi A, Urbani S, Montedoro G, Serravalle M & Gucci R (2007) Irrigation effects on quality, phenolic composition, and selected volatiles of virgin olive oils cv. Leccino. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(16): 6609-6618. doi: 10.1021/jf070599n.

Sharpley AN (2001) Rainfall Simulators Target Runoff. *Agricultural Research*: 18-20.

Silva P, Goy JL & Zazo C (1988) Evolución geomorfológica de la confluencia de los ríos Jarama y Tajuña durante el cuaternario (Cuenca de Madrid, España). *Cuaternario y Geomorfologia*, 2(1-4): 125-133.

Simoes MP, Belo AF, Pinto-Cruz C & Pinheiro AC (2014) Natural vegetation management to conserve biodiversity and soil water in olive orchards. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(3): 633-643. doi: 10.5424/sjar/2014123-5255.

Soil Survey Staff (2014) *Keys to Soil Taxonomy.* USDA-Natural Resources Conservation Service ed., 12ª ed. Washington DC: pp. 372.

Soriano M, Alvarez S, Landa BB & Gómez JA (2014) Soil properties in organic olive orchards following different weed management in a rolling landscape of Andalusia, Spain. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 29(1):83-91. doi: 10.1017/S1742170512000361.

Soto B & Díaz-Fierros F (1998) Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model. *CATENA*, 31(4): 257-270. doi: 10.1016/S0341-8162(97)00047-7.

Standard UNE 72031:1983, *Colorimetric Quantities.*

Stengel P, Douglas JT, Guérif J, Goss MJ, Monnier G & Cannell RQ (1984) Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. *Soil and Tillage Research*, 4(1): 35-53. doi: 10.1016/0167-1987(84)90015-1.

Sutherland R (1996) Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference locations: A literature survey. *Hydrological Processes*, 10(1): 43-53. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199601)10:1.

Switoniak M (2014) Use of soil profile truncation to estimate influence of accelerated erosion on soil cover transformation in young morainic landscapes, North-Eastern Poland. *Catena*, 116: 173-184. doi: 10.1016/j.catena.2013.12.015.

Taboada M, Barbosa O, Rodríguez M & Cosentino D (2004) Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma*, 123(3): 233-244. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.02.009.

Taguas EV, Guzman E, Guzman G, Vanwalleghem T & Gómez JA (2015a) Characteristics and importance of rill and gully erosion: A case study in a small catchment of a marginal olive grove. *Cuadernos De Investigación Geográfica*, 41(1): 107-126. doi: 10.18172/cig.2644.

Taguas E, Arroyo C, Lora A, Guzmán G, Vanderlinden K & Gómez JA (2015b) Exploring the linkage between spontaneous grass cover biodiversity and soil degradation in two olive orchard microcatchments with contrasting environmental and management conditions. *SOIL*, 1(2): 651-664. doi: 10.5194/soil-1-651-2015.

Taguas EV, Ayuso JL, Pérez R, Giráldez JV & Gómez JA (2013) Intra and inter-annual variability of runoff and sediment yield of an olive micro-catchment with soil protection by natural ground cover in Southern Spain. *Geoderma*, 206(0): 49-62. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.04.011.

Taguas EV & Gómez JA (2015) Vulnerability of olive orchards under the current CAP (Common Agricultural Policy) regulations on soil erosion: a study case in Southern Spain. *Land use Policy*, 42(0): 683-694. doi: 10.1016/j.landusepol.2014.09.001.

Tataranni G, Santarcangelo M, Sofo A, Xiloyannis C, Tyerman S & Dichio B (2015) Correlations between morpho-anatomical changes and radial hydraulic conductivity in roots of olive trees under water deficit and rewatering. *Tree Physiology*, 35(12): 1356-1365. doi: 10.1093/treephys/tpv074.

Telles TS, Guimarães MdF & Dechen SCF (2011) The costs of soil erosion. *Revista Brasileira De Ciência do Solo*, 35(2): 287-298.

Teshome A, de Graaff J, Ritsema C & Kassie M (2016) Farmers' perceptions about the influence of land quality, land fragmentation and tenure systems on sustainable land management in the North Western Ethiopian Highlands. *Land Degradation & Development*, 27(4): 884-898. doi: 10.1002/ldr.2298.

Tiwari AK, Risse LM & Nearing MA (2000) Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *Transactions of the ASAE.*, 43(5): 1129-1135.

Trentacoste ER, Puertas CM & Sadras VO (2010) Effect of fruit load on oil yield components and dynamics of fruit growth and oil accumulation in olive (Olea europaea L.). *European Journal of Agronomy*, 32(4): 249-254. doi: 10.1016/j.eja.2010.01.002.

Uceda M, Hermoso M & Aguilera MP (2008). La calidad del aceite de oliva. En: Barranco, D., Fernández-Escobar, R. y Rallo, L.(eds.). *El cultivo del olivo.* 6ª Edición ed. Ediciones Mundi-Prensa y Junta de Andalucía, Madrid. 699-727.

UN, 2016. *"4 Per 1000 Initiative" in Lima-Paris Action Agenda.* Disponible en: http://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2015/12/lima-paris-action-agenda-matures-into-major-force-driving-climate-action/; http://4p1000.org/understand.

UNSCEAR, 2012. *The Chernobyl Accident.* United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation ed., 16/07/2012, Disponible en: http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html.

Urbano P (1992) *Tratado de fitotecnia general.* Mundi-Prensa, Madrid: pp. 865.

USDA (2001) *Soil quality test kit guide.* Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. ed., Lincoln, NE and Washington, DC: pp. 82.

Usenik V, Zadravec P & Stampar F (2009) Influence of rain protective tree covering on sweet cherry fruit quality. *European Journal of Horticultural Science*, 74(2): 49-53.

Valentin C, Poesen J & Li Y (2005) Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63(2–3): 132-153. doi: 10.1016/j.catena.2005.06.001.

van Alphen J & Rios Romero F, (1971) *Gypsiferous Soils, Notes on their Characteristics and Management.* International Institute of Land Reclamation and Improvement ed., Instituto Internacional de Rescate y Mejoramiento Técnico de TierrasWageningen, The Netherlands.

van Genuchten MT & Nielsen DR (1985) On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae*, 3: 615-628.

van Genuchten MT, Leij FJ & Yates SR, (1991) The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA/600/2-91/065. U.S. Environmental Protection Agency, Washington.

Vanderlinden K, Gabriels D & Giráldez JV (1998) Evaluation of infiltration measurements under olive trees in Cordoba. *Soil & Tillage Research*, 48(4): 303-315. doi: 10.1016/S0167-1987(98)00137-8.

Vázquez Roncero A, Janer del Valle C & Janer del Valle ML (1973) Determinación de polifenoles totales del Aceite de Oliva. *Grasas y Aceites*, 24: 350-357.

Verchot LV, Dutaur L, Shepherd KD & Albrecht A (2011) Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils. *Geoderma*, 161(3–4): 182-193. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.12.017.

Verheijen FGA, Jones RJA, Rickson RJ & Smith CJ (2009) Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94(1–4): 23-38. doi: 10.1016/j.earscirev.2009.02.003.

Verheye WH & Boyadgiev TG (1997) Evaluating the land use potential of gypsiferous soils from field pedogenic characteristics. *Soil use and Management*, 13(2): 97-103. doi: 10.1111/j.1475-2743.1997.tb00565.x.

Vicente-Vicente JL, García-Ruiz R, Francaviglia R, Aguilera E & Smith P (2016) Soil carbon sequestration rates under Mediterranean woody crops using recommended management practices: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 235: 204-214. doi: 10.1016/j.agee.2016.10.024.

Vila Subirós J, Rodríguez-Carreras R, Varga D, Ribas A, Úbeda X, Asperó F, Llausàs A & Outeiro L (2015) Stakeholder perceptions of landscape changes in the mediterranean mountains of the north-eastern Iberian Peninsula. *Land Degradation & Development*: 27(5): 13541365. doi: 10.1002/ldr.2337.

Virto I, Imaz MJ, Fernández-Ugalde O, Gartzia-Bengoetxea N, Enrique A & Bescansa P (2015) Soil degradation and soil quality in Western Europe: current situation and future perspectives. *Sustainability*, 7(1): 313-365. doi: 10.3390/su7010313.

Walkley A & Black IA (1934) An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29-38.

Walling DE & Quine TA (1990) Calibration of Caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degradation and Rehabilitation*, 2: 161-175.

Walling DE & Quine TA (1992). The use of caesium-137 measurements in soil erosion surveys. *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins: Oslo Symposium.* IAHS, Oslo. 143-152.

Walling DE, Zhang Y & He Q (2006) Models for converting radionuclide (137 Cs, Excess 210 Pb, and 7 Be) measurements to estimates of soil erosion and deposition rates (Including Software for Model Implementation). *Dep.of Geogr., Univ.of Exeter, Exeter, UK*.

Walling DE, Zhang Y & He Q (2011). Models for deriving estimates of erosion and deposition rates from fallout radionuclide (caesium-137, excess lead-210, and beryllium-7) measurements and the development of user-friendly software for model implementation. En: IAEA-TECDOC-1665(ed.) . *Impact of Soil Conservation Measures on Erosion Control and Soil Quality.* 11-33.

Wander M (2004). Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. En: Magdoff, F. y Weil, R.R.(eds.). *Soil organic matter in sustainable agriculture.* CRC Press, Boca Raton, FL. 67-102.

Wang L, Shi ZH, Wang J, Fang NF, Wu GL & Zhang HY (2014) Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 512: 168-176. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.02.066.

Wischmeier WH & Smith DD (1978) Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Agriculture handbook nº 537. US Department of Agriculture ed., USDA, Washington D.C.: pp. 537.

Xiloyannis C, Martinez Raya A, Kosmas C & Favia M (2008) Semi-intensive olive orchards on sloping land: Requiring good land husbandry for future development. *Journal of Environmental Management*, 89(2): 110-119. doi: 10.1016/j.jenvman.2007.04.023.

Zapata F (2003) Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: pp. 217.

Zdruli P, Jones RJA & Montanarella L (2004) *Organic Matter in the Soils of Southern Europe.* Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Zdruli P, Kapur S & Çelik I (2010). Soils of the Mediterranean region, their characteristics, management and sustainable use. En: Kapur, S., Eswaran, H. y Blum, W.E.H.(eds.). *Sustainable Land Management. Learning from the Past for the Future.* Springer, Verlag Berlin Heidelberg. 125-142.

Zdruli P (2014) Land resources of the Mediterranean: status, pressures, trends and impacts on future regional development. *Land Degradation & Development*, 25(4): 373-384. doi: 10.1002/ldr.2150.

Zema DA, Denisi P, Taguas Ruiz EV, Alfonso Gomez J, Bombino G & Fortugno D (2016) Evaluation of surface runoff prediction by AnnAGNPS Model in a large mediterranean watershed covered by olive groves. *Land Degradation & Development*, 27(3): 811-822. doi: 10.1002/ldr.2390.

Zhang X, Higgitt D & Walling DE (1990) A preliminary assessment of the potential for using Cesium-137 to estimate rates of soil-erosion in the Loess Plateau of China. *Hydrological Sciences Journal*, 35(3): 243-252. doi: 10.1080/02626669009492427.

Zucca C, Vignozzi N, Madrau S, Dingil M, Previtali F & Kapur S (2013) Shape and intraporosity of topsoil aggregates under maquis and pasture in the Mediteranean region. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(4): 529-539. doi: 10.1002/jpln.201200144.

Anexos

Anexo 1. Portadas de los artículos publicados y justificación de los enviados

J Soils Sediments (2017) 17:873–888
DOI 10.1007/s11368-016-1589-9

SEDIMENTS, SEC 3 • HILLSLOPE AND RIVER BASIN SEDIMENT DYNAMICS • RESEARCH ARTICLE

Soil loss in an olive grove in Central Spain under cover crops and tillage treatments, and farmer perceptions

Blanca Sastre[1] · **Celia Barbero-Sierra**[2] · **Ramón Bienes**[1] · **Maria Jose Marques**[3] · **Andrés García-Díaz**[1]

Received: 23 December 2015 / Accepted: 29 October 2016 / Published online: 10 November 2016
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Abstract
Purpose Soil erosion is a threat for the sustainability of the grove production all over the world, and olive groves are where the highest erosion is achieved. This study aimed to (1) evaluate soil loss from water erosion in microplots (1 m^2) under natural rainfall events in an olive grove managed with tillage and three different cover crops; (2) determine the main climatic factors on soil loss and selective transportation; and (3) survey the willingness of local farmers to adopt cover crops.
Materials and methods Over four hydrological years (2010 to 2014), tillage and three cover crop treatments have been assessed in a sloping olive grove in the Mediterranean area, in a semiarid climate and gypsiferous soil. The treatments were tillage (once a year), two annual covers (barley and legumes) and a permanent cover (*Brachypodium distachyon*). Soil loss was collected after each rainfall event, dried and weighted. Rainfall data was recorded and soil cover (%) was determined. Organic carbon (% OC) and texture were measured for sediments of tillage treatment to study their selective transportation. Local farmers were polled regarding their knowledge of the biophysical factors that affect soil conservation, their management practices and their willingness to adopt sustainable land management practices as cover crops.
Results and discussion The tillage treatment exhibited the highest soil loss (6.8 t ha^{-1} $year^{-1}$). Cover crops significantly reduced soil loss: 40 % for legumes, 60 % for barley and permanent cover led to an 80 % decrease (1.4 t ha^{-1} $year^{-1}$). The soil loss depends mainly on the soil cover and kinetic energy of rainfall events. Vegetation cover higher than 40 % in autumn and spring was essential to limiting soil loss, even under heavy events. Mobilised sediments were enriched 2.4 times in OC and 1.6 in the clay fraction. In spite of the well-known benefits of cover crops in soil conservation, local farmers do not use them. A lack of environmental education and awareness has been detected.
Conclusions Tillage in olive groves produced unsustainable rates of soil loss, while permanent cover demonstrated high efficiency. Gypsiferous soils are vulnerable to water erosion processes if they are not protected by vegetation. Farmers should adopt tailored soil cover practices during spring and autumn, when the soil loss is higher. A few farmers use sustainable soil management techniques, and therefore cover crops in olive groves are rare in Central Spain because farmers are reluctant to change.

Keywords Cover crops · Erosion · *Olea europaea* · SLM practices · Social approach

Responsible editor: Nikolaus Kuhn

Electronic supplementary material The online version of this article (doi:10.1007/s11368-016-1589-9) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ Blanca Sastre
blanca.esther.sastre@madrid.org

[1] Applied Research and Agricultural Extension, Madrid Institute for Rural, Agricultural and Food Research and Development—IMIDRA, Carretera A-2 km 38.2, Alcalá de Henares, 28800 Madrid, Spain

[2] Ecology Department, Autonomous University of Madrid, C/ Francisco Tomás y Valiente, 7, 28049 Madrid, Spain

[3] Geology and Geochemistry Department, Autonomous University of Madrid, C/ Francisco Tomás y Valiente, 7, 28049 Madrid, Spain

1 Introduction

Soil erosion is a worldwide concern (Gessesse et al. 2015; Karamesouti et al. 2015; Ligonja and Shrestha 2015; Ochoa

Hindawi Publishing Corporation
Journal of Chemistry
Volume 2016, Article ID 4974609, 15 pages
http://dx.doi.org/10.1155/2016/4974609

Hindawi

Research Article

The Effect of Soil Management on Olive Yield and VOO Quality in a Rainfed Olive Grove of Central Spain

Blanca Sastre, M. Ángeles Pérez-Jiménez, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz, and Cristina de Lorenzo

Madrid Institute for Rural, Agricultural and Food Research and Development (IMIDRA), Carretera A-2 km 38.2, Alcalá de Henares, 28800 Madrid, Spain

Correspondence should be addressed to Blanca Sastre; blanca.esther.sastre@madrid.org

Received 5 August 2016; Accepted 24 October 2016

Academic Editor: Nicola Caporaso

Copyright © 2016 Blanca Sastre et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Rainfed olive groves have been traditionally tilled in order to reduce the competition for water and nutrients. In sloping Mediterranean olive groves, this practice leads to high erosion rates, resulting in a reduction in soil fertility. Cover crops have been employed as a sustainable olive grove management strategy, but previous studies found differences in their effect on fruit load and there is scarce information on their influence on the virgin olive oil (VOO) quality. The aim of this study is to evaluate the effect of different soil management strategies on olive and oil yield and VOO physicochemical and sensory characteristics in a rainfed olive grove (238 trees·ha^{-1}) of Cornicabra cultivar, the main in Central Spain. No effect of soil management was found in olive or oil yield along three cropping seasons. VOO quality was mainly influenced by the year, but slight differences were found in the driest year between the studied treatments. Small differences in fruit ripening, pigments, and several fatty acids as well as in sensory parameters were found.

1. Introduction

Olive tree (*Olea europaea* L.) is one of the most drought-tolerant tree crops in the world [1]. They are able to tolerate low availability of soil water by means of morphological and physiological adaptation [2, 3]. Three periods of high sensitivity to water stress can be considered [4]: flowering; fruit growth, 6 to 10 weeks after blooming; and oil accumulation, 18 to 22 weeks after blooming. Water stress in the first period reduces the number of fruits, while water stress in the other two periods reduces fruit fresh weight. A positive relationship between water stress of olive trees and phenolic compounds [5, 6], volatile profile [7, 8], monounsaturated fatty acid levels, and sensory properties [9] of olive oil has been described.

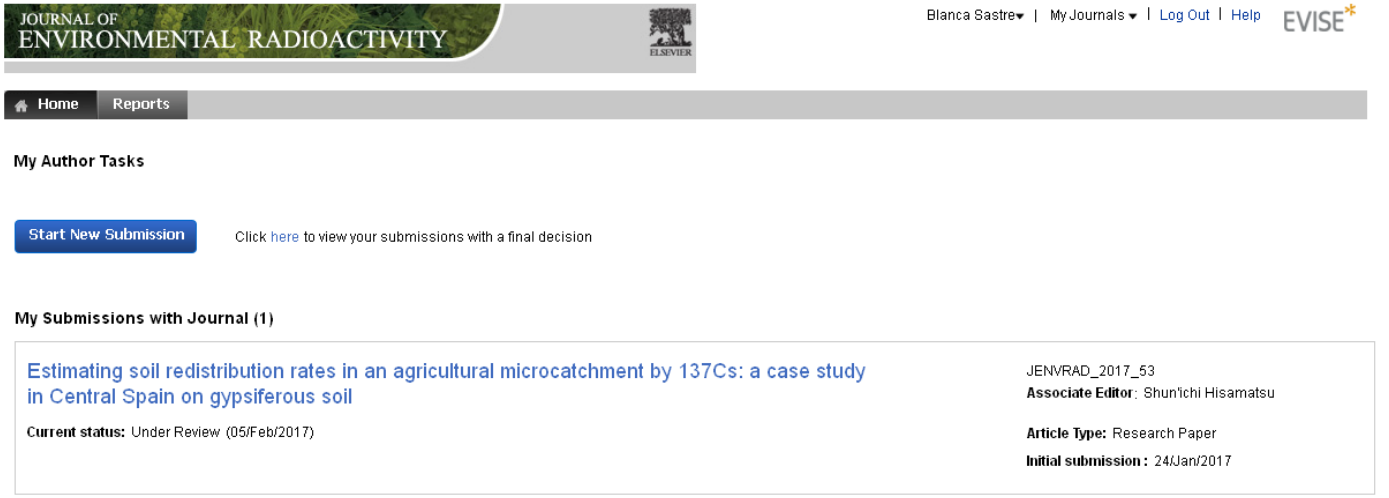
In the Mediterranean basin, rainfall and underground water resources are the only supplies for most of the olive trees [10]. In this area, traditional olive groves were designed with low plant density according to total rainfall and paying attention to canopy size [3]. Actually around 50% out of 2,500,000 ha of olive groves in Spain is tilled [11] to avoid weed competition for water and nutrients, in order to increase olive tree yield. This conventional practice gives rise to a large area of bare soil that is prone to erosion processes, one of the most important land degradation driving processes in Mediterranean areas [12, 13].

Cover crops in olive groves have proved to be an effective tool in reducing soil erosion [14–16] and improving water storage and physical properties [17], but its effect on olive tree yield is controversial. A negative effect on fruit yield due to cover crops was reported by Gucci et al. [18] in a high-density olive grove and by Caruso et al. [19] in a young and intensive olive grove. Nevertheless, other authors [17, 20–22] did not find a significant reduction in olive yield in mature olive groves.

The influence of cover crops on food quality has been studied in vineyards [23–27], apple orchard [28], eggplants

Manuscrito en revisión tras incluir los comentarios de los revisores en *Journal of Agriculture, Ecosystems & Environment*. **Blanca Sastre**, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz (2017) Effects of cover crops on soil properties in an olive grove in gypsiferous soil under semiarid conditions.

Manuscrito en revisión en *Journal of Environmental Radioactivity*. **Blanca Sastre**, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz (2017) Estimating soil redistribution rates in an agricultural hillside by ^{137}Cs: case study in Central Spain on gypsiferous soil.



Anexo 2. Supplementary material of "Soil loss in an olive grove in Central Spain under cover crops and tillage treatments, and farmer perceptions" (Capítulo 3. Pérdida de suelo en un olivar del centro de España con tratamiento de cubiertas vegetales y laboreo)

Annex I. STRUCTURED QUESTIONNAIRE ABOUT FARMER'S SOIL KNOWLEDGE, MANAGEMENT AND DEGRADATION PERCEPTION

Date:

Interview location: NºQ:

1. Age:
2. Gender: ☐ Male ☐ Female
3. Level of studies:

☐ Primary School ☐ Training college. Which specialization?

☐ Secondary School ☐ Bachelor's degree. What degree?

4. Did you learn about soil notions along the Primary Education? ☐ No ☐ Yes ☐ I do not remember.

5. Why are you involved in agriculture?

6. Do you hold a family relationship with agriculture? □No □ Yes. Through whom?

7. Would you like your children will involve on agriculture? □No □ Yes. Why?

8. Is the agriculture your main source of income? □No □ Yes. What other economic activities do you perform?

9. Would you change your main activity if you could? □No □ Yes. Why?

10.What crops do you grow?

☐ Orchards ☐ Olive groves

☐ Cereals ☐ Others?

☐ Vineyards

11.Where do you hold agrarian plots?

12 How many hectares have your farm?

13.How long have you being farming these lands?

14.What management do you implement?

	Orchards	Cereals	Vineyards	Olive groves	Others
No tillage					
Shallow tillage					
Deep tillage					
Cover crops					
Use of organic matters coming from crops					
Chemical fertilizers					
Manure and organic fertilizers					
Crop rotation					
Fallow					
Surface irrigation					
Sprinkle irrigation					
Drip irrigation					
Pesticides and herbicides					
Biological pest control					

15.Why do you use these practices and no others? They are…

the practices we have used all our life	
the most common practices in the area	
the most profitable practices	
the practices that receives more public financial aid	
the practices that I know	
the practices more environmental-friendly	
the practices that I must implement by law	
the practices recommended by the commercial brands	
the easiest practices	
the practices that provide the highest quality to the products	

16. What degradation problems affect your soils?

	Non-existing	Marginally relevant	Relevant	Very relevant	No answer
Erosion					
Compacting					
Pollution					
Acidity					
Alkalinity					
Salinization					
Low organic matter					
Low water retention					
Waterlogging					
Low fertility					
High slopes					

17. Do you think you can reduce or solve these problems? ☐No ☐ Yes How? (*Related to direct measures for soil improvement*)

18. What kind of support would the farmers need to conserve or improve their soils? (Related to enabling factors for soil improvement)

- ☐Training
- ☐Financial support
- ☐Technology
- ☐Others (specify):

19. Would you like to be trained about any specific agrarian practice? ☐No ☐ Yes Which one?

20. When you need agrarian information where do you look for it?

☐ Agrarian Extension Services

☐Family

☐ Neighbours or familiar farmers

☐Agrarian associations

☐Commercial brands bulletins

☐Agrarian products centers

☐Radio

☐Press

☐Internet

☐Others (specify):

Anexo 3. Extractos de normativa autonómica

ANDALUCÍA. Orden de 8 de abril de 2016. Compromiso para para la concesión de subvenciones a la Medida 10: Agroambiente y Clima, incluida en el Programa de Desarrollo Rural de Andalucía (2014-2020) (BOJA, 12 de abril de 2016)

Operación 10.1.6. Sistemas sostenibles de cultivos leñosos (permanentes)

B) Compromisos:

4: La implantación y el mantenimiento de una cubierta vegetal, espontánea o sembrada. En el caso cubierta espontánea sólo será subvencionable cuando la pendiente sea mayor del 20%.

C) Compromisos generales relativos a la implantación y mantenimiento de la cubierta vegetal, espontánea o sembrada:

1. Se mantendrá la cubierta entre el 15 de octubre y el 15 de marzo del año siguiente.

2. Su anchura mínima media será de 1,80 metros. En la vid, la cubierta se implantará en calles alternas y con una anchura mínima media de 1,80 metros.

3. El manejo de las cubiertas vegetales para limitar la competencia por agua y nutrientes se realizará a finales de invierno o en primavera por medios mecánicos a través de al menos un pase anual de segadora mecánica, o por aprovechamiento a diente. En caso necesario, sólo se podrán utilizar dos aplicaciones de herbicida y sola una por año a lo largo de los cinco años de duración de la operación a fin de evitar especies indeseables; dichas aplicaciones, cuando procedan, se realizarán tras la siega mecánica de la cubierta. Se procurará establecer las buenas prácticas de manejo en las cubiertas que permitan el autoabastecimiento de un banco propio de semillas, especialmente para mejorar la implantación de la cubierta en los años que no se realiza la siembra.

4. Se prohíbe labrar las cubiertas, excepto aquellas labores superficiales para adecuar el terreno para la siembra de las mismas.

D) Compromisos específicos en el caso de cubiertas sembradas:

1. La implantación se llevará a cabo al menos tres veces durante el periodo de compromisos (cinco años), siendo obligatorio que una de ellas se realice el primer año del periodo de compromiso.

2. Se aplicará fertilización para ayudar a la óptima implantación de la cubierta (sólo en los años en los que se implante).

MADRID. Resolución de 9 de abril de 2015 sobre la consideración de un único período de cultivo para el cumplimiento del pago para prácticas agrícolas beneficiosas para el clima y el medio ambiente. (BOCM, de 27 de abril de 2015)

RESOLUCIÓN de 9 de abril de 2015, de la Dirección General del Medio Ambiente, sobre la consideración de un único período de cultivo para el cumplimiento del pago para prácticas agrícolas beneficiosas para el clima y el medio ambiente.

El Real Decreto 1075/2014, de 19 de diciembre, sobre la aplicación a partir de 2015 de los pagos directos a la agricultura y a la ganadería y otros regímenes de ayudas, así como sobre la gestión y control de los pagos directos y de los pagos al desarrollo rural, tiene por objeto establecer la normativa básica aplicable para el período 2015-2020 a una serie de regímenes de ayuda comunitarios previstos en el Reglamento (UE) número 1307/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de diciembre de 2013.

El artículo 20 del citado Real Decreto hace referencia a diversos aspectos de la diversificación de cultivos regulada en la propia norma, especificando en su apartado 5 que "Para el cálculo de los porcentajes de los diferentes cultivos establecidos en el apartado 1 se tendrán en cuenta todos aquellos cultivos declarados en cada recinto que se encuentren en el mismo a lo largo del período principal del cultivo. A estos efectos, se considerará como período principal de cultivo el comprendido entre diciembre y marzo, para los cultivos de invierno, y entre mayo y septiembre para los cultivos de primavera. En el caso de los cultivos de primavera únicamente se exigirá que el cultivo se encuentre en el recinto durante dos meses consecutivos de los indicados. No obstante, las comunidades autónomas podrán ajustar dichos períodos en el caso de cultivos cuyo ciclo vegetativo no permita dar cumplimiento a este requisito, debido a sus características agronómicas o a las condiciones agroclimáticas de la región. En cualquier caso, la misma superficie de cada recinto se contabilizará una sola vez por año de solicitud a los efectos del cálculo de los porcentajes de los distintos cultivos.

El Director General del Medio Ambiente tiene competencias en esta materia al amparo del artículo 5.1 del Decreto 11/2013, de 14 de febrero, por el que

se establece la estructura orgánica de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

Por tanto, teniendo en cuenta las características agronómicas, climatológicas y los cultivos que se declaran en la Comunidad de Madrid, además de facilitar su comprobación sobre el terreno para garantizar el cumplimiento de los requisitos establecidos para la diversificación de cultivos del pago para prácticas agrícolas beneficiosas para el clima y el medio ambiente y en el marco del citado artículo 20.5 del Real Decreto 1075/2014, de 19 de diciembre y el artículo 5.1 del Decreto 11/2013, de 14 de febrero, por el que se establece la estructura orgánica de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio,

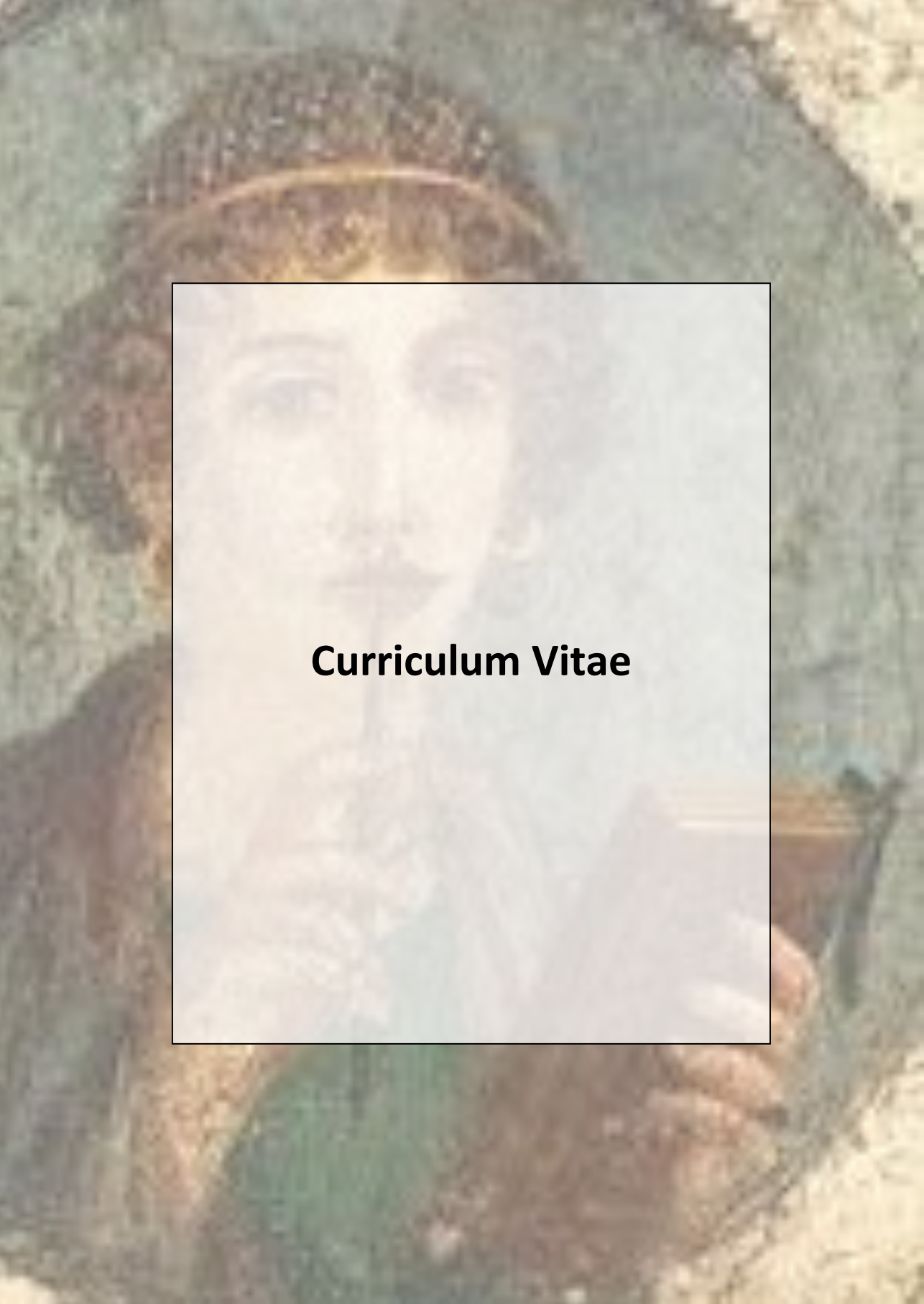
RESUELVO

Primero

Fijar para el territorio de la Comunidad de Madrid un único período para el cumplimiento de la diversificación de cultivos, el cual estará comprendido entre los meses de abril y septiembre, exigiendo únicamente que el cultivo se encuentre en el recinto durante dos meses dentro del período indicado.

DISPOSICIÓN FINAL

Esta Resolución producirá efectos a partir del día de su publicación en el Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid.



Curriculum Vitae

Listado de publicaciones con factor de impacto

1. **Blanca Sastre**, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz (2017) Estimating soil redistribution rates in an agricultural hillside by ^{137}Cs: case study in Central Spain on gypsiferous soil. (En revisión en *Journal of Environmental Radioactivity*). (SJR: 1,053, Q1).
2. **Blanca Sastre**, Alejandro Benito, M. Ángeles Perez, Alfredo Cuevas and Cristina de Lorenzo (2017) Effects of different irrigation regimes on plant water status, yield and oil quality of two olive cultivars. Aceptado en *Acta Horticulturae.* (SJR: 0,171, Q3).
3. **Blanca Sastre,** Ramón Bienes and Andrés García-Díaz (2017) How much soil volumetric water content is influenced by cover crops in an olive grove of Central Spain? Aceptado en *Acta Horticulturae.* (SJR: 0,171, Q3).
4. **Blanca Sastre**, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz (2017) Effects of cover crops on soil properties in an olive grove in gypsiferous soil under semiarid conditions. En revisión tras incluir los comentarios de los revisores en *Journal of Agriculture, Ecosystems & Environment* (SJR: 1,879, Q1).
5. Andrés García-Díaz, Ramón Bienes, **Blanca Sastre**, Agata Novara, Luciano Gristina, Artemi Cerdà (2017) Nitrogen losses in vineyards under different types of soil groundcover. A field runoff simulator approach in central Spain. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 236, 256-267. doi: 10.1016/j.agee.2016.12.013 (SJR: 1,879, Q1).
6. **Blanca Sastre**, Celia Barbero-Sierra, Ramón Bienes, Maria Jose Marques, Andrés García-Díaz (2017) Soil loss in an olive grove in Central Spain under cover crops and tillage treatments, and farmer perceptions. *Journal of Soils and Sediments*, 17(3): 876-888. doi: 10.1007/s11368-016-1589-9. (SJR: 0,896, Q2).
7. **Blanca Sastre**, M. Ángeles Pérez-Jiménez, Ramón Bienes, Andrés García-Díaz, Cristina de Lorenzo (2016) The effect of soil management on olive yield and VOO quality in a rainfed olive grove of Central Spain. *Journal of*

Chemistry, 2016, Article ID 4974609, 15 pp. doi: 10.1155/2016/4974609. (SJR: 0,225, Q3).

8. Ramón Bienes, Maria José Marques, **Blanca Sastre,** Andrés García-Díaz, Marta Ruiz-Colmenero (2016) Eleven years after shrub revegetation in semiarid eroded soils. Influence in soil properties. *Geoderma*, 273, 106-114. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.03.023. (SJR: 1,524, Q1).
9. Raúl Olivero-David, Carmen Mena, M. Ángeles Perez-Jimenez, **Blanca Sastre,** Sara Bastida, Gloria Marquez-Ruiz, Francisco J. Sanchez-Muniz, (2014) Influence of picual olive ripening on Virgin Olive Oil alteration and stability during potato frying. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62, 11637-11646, doi: 10.1021/jf503860j. (SJR: 1,246, Q1).

Listado de publicaciones sin factor de impacto

1. **Sastre, B.**; Bienes, R.; García-Díaz, A. (2015) Efecto de las cubiertas vegetales en un olivar sobre la humedad del suelo. Estudios en la Zona No Saturada XII, 93-96.
2. Bienes, R; Sastre-Merlín, A.; **Sastre-Rodríguez, B.**; García-Díaz, A.; Ríos-Ramos, S.; Martínez-Pérez, S.; Molina- Navarro, E.; Ruiz-Colmenero, M.; Marques, M.J. (2015) The effects of shrubs revegetation in degraded lands on soil loss and runoff. Estudios en la Zona No Saturada XII, 123-127.
3. García-Díaz, A.; Bienes, R.; **Sastre, B.** (2014) Study of climatic variations and its influence on erosive processes in recent decades in one location of central Spain. Engineering Geology For Society and Territory, Vol 1: Climate Change and Engineering Geology, 1, 105-108. ISBN: 978-3-319-09299-7 (Print) 978-3-319-09300-0 (Online).
4. R. Bienes, **B. Sastre**, A. García-Díaz (2014) Pérdida de suelo y transporte selectivo bajo eventos de lluvia natural de moderada y baja capacidad erosiva en suelos del centro de la Península Ibérica. Retos y oportunidades en la Ciencia del Suelo, 433-436. Andavira Editora, S.L., Santiago de Compostela.

5. **B. Sastre**, R. Bienes, A. García-Díaz (2014) Efecto del manejo del suelo de un olivar sobre la estabilidad de los agregados. Retos y oportunidades en la Ciencia del Suelo, 461-464. Andavira Editora, S.L., Santiago de Compostela.

6. A. García-Díaz, **B. Sastre**, R. Bienes (2014) Influencia de las cubiertas vegetales sobre la materia orgánica del suelo en un olivar en clima mediterráneo semiárido. Retos y oportunidades en la Ciencia del Suelo, 299-302. Andavira Editora, S.L., Santiago de Compostela.

7. A. García-Díaz, R. Bienes, **B. Sastre**, M.J. Marqués. (2013) Evaluación de la erosión mediante la técnica del ^{137}Cs: corrección mediante la pedregosidad y la textura. Control de la Degradación y Restauración de Suelos, 55-58. Juan Antonio Sánchez Garrido, Verónica González Andrés y Fernando del Moral Torres Eds.

8. R. Bienes, **B. Sastre**, A. García-Díaz. (2013) Determinación de medidas de la actividad de radionucleidos de origen antrópico y natural en sedimentos y parcelas experimentales USLE. Control de la Degradación y Restauración de Suelos, 51-54. Juan Antonio Sánchez Garrido, Verónica González Andrés y Fernando del Moral Torres Eds.

9. R. Bienes, **B. Sastre**, A. García-Díaz. (2013) Determinación de la pérdida de suelo mediante la aplicación del radionucleido antrópico ^{137}Cs. Control de la Degradación y Restauración de Suelos, 47-50. Juan Antonio Sánchez Garrido, Verónica González Andrés y Fernando del Moral Torres Eds.

10. Olivero-David, R.; Mena, C.; Pérez-Jiménez, MA.; Vergara, G.; **Sastre, B.**; De Lorenzo, C.; Bastida, S.; Sánchez-Muniz, FJ. (2013) Thermal oxidation in three different Picual extra virgin olive oils during potato frying. Annals of Nutrition and Metabolism, 63.

11. Olivero-David, R.; Mena, C.; Pérez-Jiménez, MA; Vergara, G.; **Sastre, B.**; De Lorenzo, C.; Sánchez-Muniz, FJ. (2013) Oxidation and hydrolytic profiles of Cornicabra virgin olive oils obtained from olive fruits harvested at three different maturation degrees. Annals of Nutrition and Metabolism, 63.

12. 17. Pérez, M.A.; Vergara, G.; González, Z.; de Lorenzo, C.; Alarcón, R.; González, G.; **Sastre, B.**; Palancar, M. (2011) Total antioxidant capacity and polyphenol content of monovarietal virgin olive oils produced in Madrid (Spain). Proceedings of the 4th International Conference on Olive Culture and Biotechnology of Olive Tree Products Vol. 2, 573-575. K.S. Chartzoulakis Ed., Chania, Greece.

13. **Sastre, B.**; González, G.; Vergara, G.; de Lorenzo, C.; Sanjuán, I.; Cabezas, J.A. (2011) Survey and characterization of olive trees in Comunidad de Madrid. Proceedings of the 4th International Conference on Olive Culture and Biotechnology of Olive Tree Products Vol. 1, 57-61. K.S. Chartzoulakis Ed., Chania, Greece.

14. Bienes Allas R, Ruiz Colmenero M, Arévalo D, **Sastre B**, Marqués Pérez M.J. (2011) Distribución del tamaño de gota de una lluvia natural y su energía cinética. Control de la degradación y uso sostenible del suelo, 165-168. R. Ortiz Silla, A. Sánchez Navarro Eds. ISBN: 978-84-615-1679-7.

15. **Sastre, B.**; González, G.; Vergara, G.; Palancar, M.; Pérez, M.A.; González, Z.; Pons, J.R.; Martínez, A.; de Lorenzo, C. (2010) Apuntes sobre la olivicultura madrileña. Los proyectos de I+D del IMIDRA en el futuro de los aceites y aceitunas de Madrid. Oleo. Revista profesional del mundo del Aceite, 139, 38-42.

Congresos

1. **B. Sastre**; R. Bienes; A. García-Díaz. How much soil volumetric water content is influenced by cover crops in an olive grove of Central Spain? 8th International Olive Symposium. Split- Croacia. 2016, Póster.

2. **B. Sastre**; A. Benito; M.A. Perez; A. Cuevas; C. de Lorenzo. Impact of different irrigation strategies on two cultivars of olive tree grown under super-intensive conditions on fruit production and olive oil quality. 8th International Olive Symposium. Split-Croacia. 2016, Póster.

3. **Blanca Sastre**; Ramón Bienes; Andrés García-Díaz; Alfredo Cuevas. Incidencia de las cubiertas vegetales sobre la infiltración del agua de lluvia. I Congreso Ibérico de Olivicultura. Badajoz-Elvás. 2016, Póster.

4. Alfredo Cuevas; Cristina de Lorenzo; Mª Ángeles Pérez; Alejandro Benito; **Blanca Sastre**. Evaluación de la productividad de distintas variedades de olivo en la Comunidad de Madrid bajo condiciones de secano y regadío. I Congreso Ibérico de Olivicultura. Badajoz-Elvás. 2016, Póster.
5. Rios, S.; Bienes, R.; **Sastre, B.**; García-Díaz, A. Influencia de cubiertas vegetales en la estabilidad de agregados y carbono orgánico del suelo en viñedo. VII Condegres. Bilbao. 2015, Póster
6. García-Díaz, A.; Bienes, R.; **Sastre, B.**; Rios, S. Diseño, construcción, calibración y puesta en marcha de un simulador de escorrentía. VII Condegres. Bilbao. 2015, Póster.
7. García-Díaz, A.; Bienes, R.; **Sastre, B.**; Ríos, S. Evaluación de la eficacia de las cubiertas vegetales para el control de la escorrentía. VII Condegres. Bilbao. 2015, Comunicación oral.
8. Bienes, R.; García-Díaz, A.; **Sastre, B.**; Ríos, S. Influencia del empleo de cubiertas vegetales en viñedo sobre el aprovechamiento del agua. VII Condegres. Bilbao. 2015, Comunicación oral.
9. **B. Sastre**, A. Benito, C. Carmona, J.R. Pons, Z. González, M.A. Pérez, C. de Lorenzo. Efecto del riego deficitario en el cultivo superintensivo de Arbequina y Cornicabra en la Comunidad de Madrid. IV Jornadas del Grupo de Olivicultura de la SECH. Baeza. 2014, Póster.
10. C. Carmona, **B. Sastre**, J.R. Pons, Z. González, A. Pérez, G. Vergara, C. de Lorenzo. Caracterización agronómica de nueve variedades de olivo en regadío en la zona centro de España. IV Jornadas del Grupo de Olivicultura de la SECH. Baeza. 2014, Póster.
11. Mena, C.; González, Z.; Horcas, E.; **Sastre, B.**; Pérez, M.A. Momento óptimo de recolección de variedades de aceituna cultivadas en la zona centro para elaborar AOV de la máxima calidad sensorial. IV Jornadas del Grupo de Olivicultura de la SECH. Baeza. 2014, Póster.
12. **B. Sastre**, R. Bienes, C. Carmona, M.A. Pérez, C., de Lorenzo, C. Influencia de las cubiertas vegetales sobre la producción de aceituna y el

AOV en un olivar de la zona centro. XVII Simposium Científico-Técnico EXPOLIVA. Jaén.2014, Comunicación oral.

13. **B. Sastre**, C. de Lorenzo, M.A. Pérez y J.A. Cabezas. Variabilidad inter e intra-cultivar del olivar de la Comunidad de Madrid. XVII Simposium Científico-Técnico EXPOLIVA. Jaén. 2014, Póster.
14. García-Díaz, **B. Sastre**, R. Bienes. Influencia de las cubiertas vegetales sobre la materia orgánica del suelo en un olivar en clima mediterráneo semiárido. VI Congreso Ibérico de la Ciencia del Suelo. Santiago de Compostela. 2014, Póster.
15. **B. Sastre**, R. Bienes, A. García-Díaz. Efecto del manejo del suelo de un olivar sobre la estabilidad de los agregados. VI Congreso Ibérico de la Ciencia del Suelo. Santiago de Compostela. 2014, Póster.
16. R. Bienes, B. Sastre, A. García-Díaz. Pérdida de suelo y transporte selectivo bajo eventos de lluvia natural de moderada y baja capacidad erosiva en suelos del centro de la Península Ibérica. VI Congreso Ibérico de la Ciencia del Suelo. Santiago de Compostela. 2014, Póster.
17. Mena, C.; González, A.Z.; Horcas, E.; **Sastre, B.**; Pérez, M.A. Nutritional changes in monovarietal virgin olive oils produced in Madrid (Spain) during olive ripening. Euro Fed Lipid Congress. Montpellier-Francia. 2014, Póster.
18. **Sastre, B.**, Bienes, R., García-Díaz, A., Panagopoulos, T., Marques, M.J. The influence of cover crops and tillage on actual and potential soil erosion in an olive grove. EGU. Viena. 2014, Póster.
19. Bienes, R.; Marqués, M.J.; Ruiz-Colmenero, M.; Arévalo, D.; **Sastre, B.**; García-Díaz, A. Effects of shrub revegetation with *Atriplex halimus* L. and *Retama sphaerocarpa* L. in gypsiferous soils. Influence in soil properties. EGU. Viena-Austria. 2014, Póster.
20. García-Diaz, A.; Bienes, R.; **Sastre, B.** Study of climatic variations and its influence on erosive processes in recent decades in central Spain. IAEG XII Congress. Torino-Italia. 2014, Póster.
21. Mena, C., Olivero-David, R., Pérez, M.A., Lorenzo, C., **Sastre, B.**, Vergara, G. Influence of Organic and Conventional Farming Systems on Potential

Quality of Virgin Olive Oils Produced in the Central Region of Spain. 11th Euro Fed Lipid Congress. Antalya-Turquía. 2013, Póster.

22. Pérez, M.A., Mena, C., Lorenzo, C., **Sastre, B.**, González, Z., Horcas, E, Vergara, G. Oxidation, Antioxidants and Deep Frying. 11th Euro Fed Lipid Congress. Antalya-Turquía. 2013, Póster.
23. Bienes, R.; Gumuzzio, J.; Rodríguez-Rastrero, M.; **Sastre, B.**; García-Díaz, A. Environmental study to obtain quality wines. EUGEO. Roma-Italia. 2013, Póster.
24. Olivero-David, R.; Mena, C.; Pérez-Jiménez, MA.; Vergara, G.; **Sastre, B.**; De Lorenzo, C.; Bastida, S.; Sánchez-Muniz, FJ. Thermal oxidation in three different Picual extra virgin olive oils during potato frying. IUNS 20th International Congress of Nutrition. Granada. 2013, Póster.
25. Olivero-David, R.; Mena, C.; Pérez-Jiménez, MA; Vergara, G.; **Sastre, B.**; De Lorenzo, C.; Sánchez-Muniz, FJ. Oxidation and hydrolytic profiles of Cornicabra virgin olive oils obtained from olive fruits harvested at three different maturation degrees. IUNS 20th International Congress of Nutrition. Granada. 2013, Póster.
26. **Sastre, B.**; Vergara, G.; Pérez, M.A.; Sanjuán, I.; Carmona, C.; de Lorenzo, C. Aproximación a la variabilidad de cultivares de olivo en la Comunidad de Madrid. XVI Simposio científico-técnico EXPOLIVA. Jaén. 2013, Póster.
27. García-Díaz, A.; Bienes, R.; **Sastre, B.**; Marqués, M.J. Evaluación de la erosión mediante la técnica del ^{137}Cs: corrección mediante la pedregosidad y la textura. VI Simposio Nacional sobre Control de la Degradación y Restauración de Suelos. Almería. 2013, Comunicación oral.
28. Bienes, R.; **Sastre, B.**; García-Díaz, A. Determinación de medidas de la actividad de radionucleidos de origen antrópico y natural en sedimentos y parcelas experimentales USLE. VI Simposio Nacional sobre Control de la Degradación y Restauración de Suelos. Almería. 2013, Comunicación oral.

29. Bienes, R.; **Sastre, B.**; García-Díaz, A. Determinación de la pérdida de suelo mediante la aplicación del radionucleido antrópico ^{137}Cs. VI Simposio Nacional sobre Control de la Degradación y Restauración de Suelos. Almería. 2013, Comunicación oral.

30. Pérez, M.A.; Palancar, M.; Lorenzo, C.; Mena, C.; **Sastre, B.**; González, Z.; Sanjuán, I.; Horcas, E.; Vergara, G. Pigment Content and Colour of Monovarietal Virgin Olive Oils from Four Olive Varieties grown in Madrid (Spain). Euro Fed Lipid Congress 10th. Cracovia-Polonia. 2012, Póster.

31. García Ballesteros, M.E.; Sanjuán, I.; Arjona, M.E.; Vergara, G.; **Sastre, B.**; González, G.; de Lorenzo, C. Aptitud para la elaboración de Aceituna de Campo Real de diferentes variedades de aceituna de mesa. III Jornadas Internacionales de la aceituna de mesa. Sanlúcar La Mayor (Sevilla). 2010, Póster.

32. Gregorio Vergara; **Blanca E. Sastre**; Gema González; Ignacio Sanjuán; Juan Ramón Pons; Cristina de Lorenzo; Pilar Fernández; Ramón Bienes; MªCarmen Lobo; Mª Ángeles Pérez; Margarita Palancar; Zulima González. Investigación en Olivicultura y Elaiotecnia en la Comunidad de Madrid (IMIDRA-Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario). III Jornadas Nacionales del Grupo de Olivicultura de la SECH. Sevilla. 2011, Póster.

33. M.A. Pérez; G. Vergara; Z. González; C. deLorenzo; R. Alarcón; G. González; **B. Sastre**; M. Palancar. Total antioxidant capacity and polyphenol content of monovarietal virgin olive oils produced in Madrid (Spain). Olivebioteq 2011. Chania-Greece. 2011, Póster.

34. **B.E. Sastre**; G. González; G. Vergara; C. de Lorenzo; I. Sanjuán; J.A. Cabezas. Survey and characterization of olive trees in Comunidad de Madrid. Olivebioteq 2011. Chania-Greece. 2011, Póster.

35. Palancar, M.; Vergara, G.; De Lorenzo, C.; **Sastre, B.**; González, G.; Alarcón, R.; González, Z.; Pérez, M.A. Capacidad antioxidante de los aceites de oliva vírgenes monovarietales de cornicabra, picual, manzanilla castellana y manzanilla cacereña elaborados en la Comunidad de Madrid. XV Simposium Científico-Técnico de Expoliva. Jaén. 2011, Póster.

36. González Gema; **Blanca Sastre**; Gregorio Vergara; Ignacio Sanjuán; Ramón Bienes; Carmen Mena; Cristina de Lorenzo. Identificación de la base varietal del olivar tradicional en la Comunidad de Madrid. XV Simposium Científico-Técnico de Expoliva. Jaén. 2011, Póster.

37. **Sastre, B.**; Bienes, R. Influencia de las cubiertas vegetales en olivar sobre la estabilidad estructural. Resultados preliminares. VI Congreso Iberoamericano de Control de la Erosión y los Sedimentos. Granada. 2010, Comunicación oral.

38. **Sastre, B.**; González, G.; Vergara, G.; Borrego, J.; Sanjuan, I.; de Lorenzo, C. Variedades de aceituna de mesa en el Centro de Olivicultura de la Comunidad de Madrid: puesta a punto de un procedimiento de caracterización molecular y estudio del comportamiento en sistema superintensivo de Manzanilla Cacereña. III Jornadas Internacionales de la Aceituna de Mesa. Sanlúcar la Mayor (Sevilla). 2010, Póster.

Participación en proyectos de investigación

1. Sistemas Agrarios Sostenibles. Manejo de C, N y agua para optimizar producción y calidad (AGRISOST 2-CM (S2013/ABI-2717)). Consejería de Juventud, Educación y Deporte de la Comunidad de Madrid y cofinanciado por el ESIF. Comunidad de Madrid. Dr. Ramón Bienes Allas, coordinador grupo IMIDRA. 2014-2018. COAPA-UPM, MGP-UPM, AGSYSTEMS-UPM, CASAM-UPM, COSVE-INIA, GECA-CIEMAT, IMIDRA, Laboratorio Alimentario del IMIDRA, Laboratorio de Edafología y Técnicas Analíticas Instrumentales de la UPM. IP: Dr. Antonio Vallejo García. Universidad Politécnica de Madrid.

2. Influencia de las Cubiertas Vegetales en Viñedo sobre los Flujos de Agua por Escorrentía y la Exportación de Nutrientes (FP13-ICV). Comunidad de Madrid-IMIDRA. Comunidad de Madrid. IMIDRA. 2013-2015. IP: Dr. Ramón Bienes Allas. IMIDRA

3. Cultivo del olivo superintensivo en el Centro y Norte de España (RTA2012-00059). INIA. Dra. Cristina de Lorenzo Carretero, coordinadora subproyecto 2. IMIDRA. 2012-2016. IRTA, IVIA, IMIDRA, INTIA, Universidad de Lleida. IP: Dr. Josep Rufat Lamarca. IRTA.

4. Empleo de cubiertas vegetales en olivar: repercusión sobre el suelo, la erosión y la calidad del Aceite de Oliva Virgen (FP12-CVO). Comunidad de Madrid-IMIDRA. IMIDRA. 2012-2013. IP: Dr. Ramón Bienes Allas. IMIDRA.
5. Estudios científico-técnicos en colaboración con la industria elaboradora de Aceite de Oliva de la Comunidad de Madrid para la mejora y protección de la calidad de los aceites de Madrid (FP12-AO). Comunidad de Madrid-IMIDRA. IMIDRA. 2012-2013. IP: **Blanca Sastre**. IMIDRA.
6. Calidad potencial del aceite de oliva virgen elaborado con variedades de aceituna de la zona centro en cultivo convencional y ecológico. Determinación del momento óptimo de recolección, elaboración de coupages y análisis de preferencias del consumidor (RTA10-00097). INIA. IMIDRA. 2010-2013. IP: Dra. Mª Ángeles Pérez Jiménez. IMIDRA.
7. Prospección, caracterización y multiplicación de las variedades de olivo cultivadas en la Comunidad de Madrid (RF08-00032). INIA. IMIDRA. 2009-2013. IP: Dra. Cristina de Lorenzo Carretero.

Otros méritos

- 25 de Noviembre de 2016. Ponencia “Calidad del aceite de oliva” en la Jornada de “Riego y recolección en olivo” organizada por el IVIA en Villena (Alicante).
- 2 a 8 de Noviembre de 2016. Coordinación y ponencia “Introducción al olivar de la Comunidad de Madrid. Proyectos de Olivicultura y Elaiotecnia del IMIDRA” del Curso Teórico-Práctico “Olivicultura Moderna para la Comunidad de Madrid” dentro del Programa Cursos de Transferencia al Sector Agrario del IMIDRA, en Alcalá de Henares (Madrid).
- Octubre de 2016 a Marzo de 2017 (700 h). Dirección de las Prácticas externas de Natalia Verdugo del “Grado en Tecnología de las Industrias Agrarias y Alimentarias” de la Universidad Politécnica de Madrid.
- 17 de Octubre de 2016. Ponencia “El olivar en la Comunidad de Madrid. Proyectos del IMIDRA en olivicultura y elaiotecnia” en el Curso “Elaboración y cata de Aceite de Oliva Virgen Extra” dentro del

Programa Cursos de Transferencia al Sector Agrario del IMIDRA, en Alcalá de Henares (Madrid).

- Julio de 2016. Dirección del Trabajo Fin de Grado de Andrés Domíngez pertenenciente al "Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos" de la Universidad Rey Juan Carlos (Nota: Sobresaliente).
- 20 de Mayo 2016. Ponencia "Proyectos del imidra en relación al olivo y al aceite" dentro de la Feria del olivar y ajo, en Morata de Tajuña (Madrid).
- Febrero a Abril de 2016 (301 h). Dirección de las Prácticas externas de Iván Carmelo del "Grado en Biología" de la Universidad Rey Juan Carlos.
- Febrero a Abril de 2016 (301 h). Dirección de las Prácticas externas de Carmen Albelda del "Grado en Biología" de la Universidad Rey Juan Carlos.
- Enero a Abril de 2016 (400 h). Dirección de las Prácticas externas de Mª Paz Centenera del "Grado en Ciencias Ambientales" de la Universidad de Alcalá.
- 2 a 6 de Noviembre de 2015. Coordinación y ponencia "Introducción al olivar de la Comunidad de Madrid. Proyectos de Olivicultura y Elaiotecnia del IMIDRA" del Curso Teórico-Práctico "Olivicultura Moderna para la Comunidad de Madrid" dentro del Programa Cursos de Transferencia al Sector Agrario del IMIDRA, en Aranjuez (Madrid).
- Noviembre de 2015 a Enero de 2016 (420 h). Dirección de las Prácticas externas de Andrés Domíngez del "Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos" de la Universidad Rey Juan Carlos.
- 5 de Octubre de 2016. Ponencia "El olivar en la Comunidad de Madrid. Proyectos del IMIDRA en olivicultura y elaiotecnia" en el Curso "Elaboración y cata de Aceite de Oliva Virgen Extra" dentro del Programa Cursos de Transferencia al Sector Agrario del IMIDRA, en Alcalá de Henares (Madrid).
- Octubre a Diciembre de 2015 (400 h). Dirección de las Prácticas externas de Alfonso Rojas del "Grado en Ciencias Ambientales" de la Universidad de Alcalá.
- 17 de Junio de 2015. Ponencia "Olivicultura" en el Curso "Incorporacion a la empresa agraria. Parte técnica y específica de agricultura"

organizado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, en Marchamalo (Guadalajara).

- 19 y 20 de Mayo de 2015. Ponencia "Cover crops in olive groves under semi-arid climate" y asistente de campo en la finca "La Chimenea" en el "Training School 6 Iberian Training School on Restoration in Mediterranean Drylands" organizado por la Dra. Maria José Marqués del Departamento de Geología y Geoquímica de la Universidad Autónoma de Madrid dentro de la Acción COST ES4011 "Arid Lands Restoration and Combat of Desertification: Setting up a Drylands and Desert Restoration Hub".
- 4 de Mayo de 2015. Comunicación "Empleo cubiertas vegetales en olivar: incidencia en el suelo, erosión, enfermedades, rendimiento y calidad del Aceite de Oliva Virgen" en la Jornada "Conocimiento y Tecnología para una agricultura más sostenible en la Comunidad de Madrid" dentro del Proyecto AGRISOST II, en Madrid.
- 22 de Abril de 2015. Ponencia "Cubiertas vegetales" en la Jornada técnica "Actualización en Olivicultura: Sostenibilidad, eficiencia y nuevas tecnologías" organizada por el IMIDRA dentro de los Proyectos RTA2012-00059-C02 y AGRISOST II, en Aranjuez (Madrid).
- 3 a 7 de Noviembre de 2014. Coordinación y ponencia "Introducción al olivar de la Comunidad de Madrid. Proyectos de Olivicultura y Elaiotecnia del IMIDRA" del Curso Teórico-Práctico "Olivicultura Moderna para la Comunidad de Madrid" dentro del Programa Cursos de Transferencia al Sector Agrario del IMIDRA, en Aranjuez (Madrid).
- Septiembre a Diciembre de 2014 (370 h). Dirección de las Prácticas externas de Leire Carracedo del Grado Superior "Laboratorio de Análisis y Control de Calidad" del IES Mateo Alemán.
- Septiembre a Diciembre de 2014 (400 h). Dirección de las Prácticas externas de Santiago Moreno del "Grado en Ciencias Ambientales" de la Universidad de Alcalá.
- Junio de 2014. Dirección del Trabajo Fin de Grado de Luis Recio pertenenciente al "Grado en Ciencias Ambientales" de la Universidad de Alcalá (Nota: Matrícula de Honor).
- 4 de Junio de 2014. Ponencia "Olivicultura" en el Curso "Incorporacion a la empresa agraria. Parte técnica y específica de agricultura" organizado

por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, en Marchamalo (Guadalajara).

- 13 de Mayo de 2014. Asistente de campo a la finca "La Chimenea" en el "Short Term Scientific Mission Influence of cover crops on soil properties in vineyards and olive groves" organizado por la Dra. Maria José Marqués del Departamento de Geología y Geoquímica de la Universidad Autónoma de Madrid.
- 2 de Abril de 2014. Ponencia "Ensayos en el centro de olivicultura de La Chimenea" en la Jornada Técnica Finca "La Chimenea", en Aranjuez (Madrid).
- Marzo a Junio de 2014 (370 h). Dirección de las Prácticas externas de David Ferrando del "Ciclo Formativo de Industrias Alimentarias" del IES Escuela de la Vid.
- Febrero a Mayo de 2014 (240 h). Dirección de las Prácticas curriculares de Virgnia Núñez de "Ciencia y Tecnología de los Alimentos" de la Universidad Complutense de Madrid.
- 16 de Octubre de 2013. Ponencia "Experiencia en olivar superintensivo en las variedades Arbequina y Cornicabra en la Comunidad de Madrid" en la Jornada "Riego y fertirrigación en olivar superintensivo" organizada por el IRTA en Torres del Segre (Lleida).
- 17 a 19 de Septiembre 2013. Participación como joven investigadora y comunicación oral "Effects of cover crops in olive groves of semi-arid Spain (south of Madrid)" en el "Management Committee Meeting 4 / WG4 Fieldtrip Mediterranean Agronomic Institute of Bari (IAMB)" en Valenzano (Italia) dentro de la Acción COST ES4011 "Arid Lands Restoration and Combat of Desertification: Setting up a Drylands and Desert Restoration Hub".
- 20 de Junio de 2013. Comunicación oral "Olivar y aceite de oliva" en el "VIII Foro de Intercambio Investigación-Empresa sobre Olivar y Aceite" organizado por el INIA en el IFAPA de Alameda del Obispo, Córdoba.
- Marzo a Junio de 2010 (350 h). Dirección de las Prácticas externas de Marina Samper del "Ciclo Formativo en Sanidad" del IES Mirasierra.

Workshops y cursos

- Junio de 2016 (38 h) Curso "Iniciación al manejo de los software anexos a cromatógrafo de masas y gases (presencial)" organizado por la Dirección General de la Función Pública de la Comunidad de Madrid, en Alcalá de Henares (Madrid).
- Febrero de 2016 (8 h) Jornada de "Transferencia sobre cubiertas vegetales en olivar" por Juan Castro (IFAPA) organizado por la Fundación para la Promoción y Desarrollo del Olivar y del Aceite de Oliva y Tekieroverde en Cortijo Spiritu Santo en Baeza (Jaén).
- Octubre de 2015 (30 h) Curso "Diseño experimental y análisis de datos" por Jose María Carrascal del Museo Nacional de Ciencias Naturales organizado por la Dirección General de la Función Pública de la Comunidad de Madrid, en Alcalá de Henares (Madrid).
- Junio de 2015 (25 h) Seminario "Introducción al Modelo Hidrológico SWAT con ArcGIS (ArcSWAT)" del Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente de la Universidad de Alcalá, en Alcalá de Henares (Madrid).
- Septiembre de 2014/Junio de 2015 (625 h) Curso de Experto Universitario en "Métodos Avanzados de Estadística Aplicada" de la UNED (on line).
- Abril/Mayo de 2014 (30 h) Curso "El oficio de investigador: captación de recursos, transferencia y divulgación de la información" de la Universidad Internacional de Andalucía (on line).
- Abril de 2014 (12 h) Curso "Claves para comunicarte en público: vídeo currículo, presentaciones de tesis y trabajos" de la Escuela de Escritura de la Universidad de Alcalá, en Alcalá de Henares (Madrid).
- Mayo de 2013 (23 h) Curso "Avances en los métodos de análisis de suelos y plantas" de la Universidad Internacional de Andalucía en Baeza (Jaén).
- Abril de 2013 (40 h) Curso "Short Term Scientific Mission on WOCAT methods" en CDE (Centre for Development and Environment) y University of Bern dentro de la Acción COST ES4011 "Arid Lands Restoration and Combat of Desertification: Setting up a Drylands and Desert Restoration Hub" en Berna (Suiza).

- Abril de 2012 (25 h) Curso “ARCGIS 10 Avanzado - ámbito de Medio Ambiente” en el Centro de Formación de ICM de la Comunidad de Madrid, en Madrid.
- Febrero de 2012 (4 h) Seminario “Sondas ECH2O de contenido de humedad del suelo de Decagon Devices Inc” del Instituto de Ciencias Ambientales – CSIC, en Madrid.
- Mayo de 2011 (10 h) Curso “Madrid y la gestión de la Investigación en el marco Europeo” de la Dirección General de la Función Pública de la Comunidad de Madrid, en Madrid.
- Febrero de 2011 (24 h) Curso “Introduccion a la estadística ambiental” por Luis Cayuela, organizado por el Departamento de Ecología de la Universidad de Alcalá en Alcalá de Henares y la Universidad Rey Juan Carlos, en Alcalá de Henares (Madrid).
- Abril de 2010 (30 h) Curso “Prevención de riesgos en laboratorios” del Centro Nacional de Capacitación del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, en San Fernando de Henares (Madrid).

Sociedades académicas

Sociedad Española de Ciencias del Suelo

Sociedad Española de Ciencias Hortícolas