

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

Soluciones sostenibles en ambientes mediterráneos

COORDINADORES

RAMÓN MECO MURILLO. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (JCCM)
CARLOS LACASTA DUTOIT. Centro de Ciencias Medio Ambientales (CCMA-CSIC)
MARTA MARÍA MORENO VALENCIA. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM)





MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO

Secretaría General Técnica: Alicia Camacho García. **Subdirección General de Información al Ciudadano, Documentación y Publicaciones:** José Abellán Gómez. **Directora del Centro de Publicaciones:** Cristina García Fernández. **Jefa del Servicio de Edición:** M.^a Dolores López Hernández.

Editan

© Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino
Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha
Sociedad Española de Agricultura Ecológica
Ediciones Mundi-Prensa

Distribución y venta:

P^o de la Infanta Isabel, 1
Teléfono: 91 347 55 41
Fax: 91 347 57 22

Maquetación, impresión y encuadernación:

V.A. Impresores, S.A.

Plaza San Juan de la Cruz, s/n
Teléfono: 91 597 61 87
Fax: 91 597 61 86

NIPO: 770-11-113-8

ISBN (MARM): 978-84-491-1083-2

ISBN (Mundi-Prensa): 978-84-8476-539-4

Depósito Legal: M-35950-2011

Catálogo General de Publicaciones Oficiales:

<http://www.060.es>

(servicios en línea/oficina virtual/Publicaciones)

Tienda virtual: www.marm.es
centropublicaciones@marm.es

Ediciones Mundi-Prensa

Avda. Filipinas, 50, bajo, puerta A
28003 Madrid (España)
Tel. (+34) 902 995 240
Fax (+34) 914 456 218
clientes@paraninfo.es

Mundi-Prensa México, s.a. de C.V.

Río Pánuco, 141 - Col. Cuauhtémoc
06500 México, D.F.
Tel. (+525) 55 533 56 58 - Fax (+525) 55 514 67 99
mundiprensa@mundiprensa.com.mx

Datos técnicos: Formato: 17 x 24 cm. Caja de texto: 14 x 20,1 cm. Composición: una columna. Tipografía: Bell Centennial cuerpos 10 y 11. Papel: Interior en estucado con certificación FSC® de 115 g. Cubierta en Symbol Card de 300 g. con certificación FSC®. Tintas: 4/4 más barniz. Encuadernación: rústica.

El certificado FSC® (Forest Stewardship Council®) asegura que la fibra virgen utilizada en la fabricación de este papel procede de masas certificadas con las máximas garantías de una gestión forestal social y ambientalmente responsable y de otras fuentes controladas. Consumiendo papel FSC® promovemos la conservación de los bosques del planeta y su uso responsable.



ÍNDICE

PRÓLOGO. <i>Nadia El-Hage Scialabba</i> . FAO	5
INTRODUCCIÓN. <i>Coordinadores</i>	9
1. EROSIÓN Y MANEJO DEL SUELO. IMPORTANCIA DEL LABOREO ANTE LOS PROCESOS EROSI- VOS NATURALES Y ANTRÓPICOS	13
<i>Saturnino de Alba Alonso, María Alcázar Torralba, Fernando Ivón Cermeño Martín, Fernando Barbero Abolafio. Instituto de Geociencias (CSIC-UCM). Dpto. Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid.</i>	
2. LA FERTILIZACIÓN ORGÁNICA EN SISTEMAS EXTENSIVOS DE SECANO	39
<i>Juana Labrador Moreno. Universidad de Extremadura.</i>	
3. MICROORGANISMOS FUNCIONALES DEL SUELO. SU PAPEL EN EL MANEJO ECOLÓGICO DE LOS SECANOS	77
<i>María del Carmen Jaizme-Vega. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias.</i>	
4. LA FLORA ARVENSE, SU PAPEL Y CONTROL EN LOS CULTIVOS HERBÁCEOS EXTENSIVOS DE SECANO EN ZONAS MEDITERRÁNEAS	87
<i>Gabriel Pardo Sanclemente. Universidad de Sevilla. Joaquín Aibar Lete. Universidad de Zaragoza. Alicia Cirujeda Razemberger, Carlos Zaragoza Larios. Gobierno de Aragón.</i>	
5. LA ROTACIÓN EN CULTIVOS HERBÁCEOS DE SECANO	107
<i>Carlos Manuel Lacasta Dutoit. Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC. Ramón Meco Murillo. Consejería de Agricultura de Castilla-La Mancha.</i>	
6. MANEJO DE PLAGAS EN LOS CULTIVOS ECOLÓGICOS DE SECANO	153
<i>José Luis Porcuna Coto. Departamento de Protección Vegetal. Generalitat Valenciana.</i>	
7. EL SUELO COMO “ENTE VIVO” Y SU RELACIÓN CON LAS ENFERMEDADES DE LAS PLANTAS	181
<i>Julio César Tello Marquina, Miguel de Cara García, Ángel Moreno Díaz, Mila Santos Hernández. Universidad de Almería. Daniel Palmero Llamas. Universidad Politécnica de Madrid.</i>	
8. VALORES ADAPTATIVOS DEL GERMOPLASMA PARA LA PRODUCCIÓN ECOLÓGICA DE LOS SECANOS	221
<i>Celia de la Cuadra González, Magdalena Ruiz Valcárcel, Federico Varela Nieto. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.</i>	
9. IMPORTANCIA DE LA BIODIVERSIDAD NATURAL EN CULTIVOS DE SECANO	241
<i>Concepción Fabeiro Cortés. Universidad de Castilla-La Mancha.</i>	
10. OLIVICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO	265
<i>Manuel Pajarón Sotomayor. Junta de Andalucía.</i>	

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

11. VITICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO	289
<i>José Casanova Gascón. Universidad de Zaragoza.</i>	
12. CULTIVO ECOLÓGICO DE ESPECIES ALTERNATIVAS LEÑOSAS EN SECANO (EL PISTACHERO) .	313
<i>Francisco Couceiro López, Julián Guerrero Villaseñor, María del Carmen Gijón López. Centro Agrario "El Chaparrillo". Consejería de Agricultura de Castilla-La Mancha.</i>	
13. EL MANEJO ECOLÓGICO DE LA GANADERÍA EN LOS AGROSISTEMAS DE SECANO Y SUS BENEFICIOS SOBRE EL APROVECHAMIENTO CINEGÉTICO	335
<i>Carmelo García Romero. Consejería de Agricultura de Castilla-La Mancha.</i>	
14. IMPACTO DE LA INTENSIFICACIÓN AGRÍCOLA Y EL USO DE AGROQUÍMICOS EN LA CONSERVACIÓN DE LA FAUNA SILVESTRE	357
<i>Ana López Antía, Manuel E. Ortiz Santilliestra, Rafael Mateo Soria. Instituto de Investigación en Recursos Cinegéticos. CSIC-UCLM-JCCM.</i>	
15. ECONOMÍA DE LA PRODUCCIÓN DE CEREALES Y GRANOS DE LEGUMINOSAS ECOLÓGICOS DE SECANO	377
<i>Roberto García-Trujillo, Antonio Alonso Mielgo, Melibea Alarcón Bautista. Consorcio Centro de Investigación y Formación de Agricultura Ecológica y Desarrollo Rural de Granada. Carlos Manuel Lacasta Dutoit. Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC.</i>	
16. POSIBLES EFECTOS ADVERSOS DE ALGUNAS TECNOLOGÍAS EN LOS AGROECOSISTEMAS TRADICIONALES DE SECANO	395
<i>José Antonio López Pérez. Centro Agrario Marchamalo, Consejería de Agricultura de Castilla-La Mancha. Miguel Ángel Díez Rojo. Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC.</i>	
17. BALANCE ENERGÉTICO EN CULTIVOS HERBÁCEOS	417
<i>Marta María Moreno Valencia. Universidad de Castilla-La Mancha. Carlos Manuel Lacasta Dutoit. Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC. Ramón Meco Murillo. Consejería de Agricultura de Castilla-La Mancha.</i>	
COLABORACIONES ESPECIALES	
18. ACEITE ECOLÓGICO PROCEDENTE DE OLIVOS CULTIVADOS EN SECANO	443
<i>José María Pérez Morales. Agricultor-Olivicultor. Los Navalmorales (Toledo).</i>	
19. ACEITE DE GIRASOL ECOLÓGICO. UNA EXPERIENCIA DE INNOVACIÓN EN CULTIVOS HERBÁCEOS DE SECANO	453
<i>José Félix Becerril García. Agricultor de secano. Industrial. Padilla de Arriba (Burgos).</i>	
20. ELABORACIÓN DE VINOS, CON UVA ECOLÓGICA DE CULTIVO DE SECANO	463
<i>Julián Ruiz Villanueva. Agricultor. Viticultor. Quero (Toledo).</i>	
21. CULTIVO ECOLÓGICO DE CEREALES. TRANSFORMACIÓN, ELABORACIÓN, COMERCIALIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SUS PRODUCTOS DERIVADOS	473
<i>Panadería Rincón del Segura Elche de la Sierra (Albacete).</i>	

Preface/Prólogo

Nadia El-Hage Scialabba

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)

nadia.scialabba@fao.org

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

The lack of connectedness between plant, animals and humans has contributed to our world's present environmental crisis and to the disintegration of rural communities. But to the benefit of all, biodynamic, organic and ecological farmers have been working, though in relatively minute and scattered locations, to heal the Earth, reconcile humans with the outside world and, chiefly, to take responsibility for the Earth and its future.

Farming in arid and semi-arid environments means dealing with variability and unpredictability. In the Mediterranean, infertile soils, climate contrasts and sloping landscapes require careful agricultural management. While agricultural intensification has moved these ecosystems in the direction of environmental degradation and desertification, countering with ecological management is not easy. It requires dealing with scarcity, not just of biomass and water, but of appropriate knowledge. Still, ecological management is the only option to stabilize these environments.

Converting to ecological management in Mediterranean countries presents several challenges in terms of rehabilitating soil fertility and re-establishing pest-predator balance. Soil fertility is challenged by the disrupted dynamics of biomass decomposition during long dry seasons.

The problem of slow build-up of soil organic matter is compounded by increased water uncertainty due to climate change.

Organic agriculture is based on adaptive management that promotes soil enrichment and diversification, without exceeding the land carrying capacity. As land, water and air become increasingly polluted and food more contaminated with synthetic substances, there is an urgent need to change direction towards creating living soils for healthy plants, healthy animals and healthy humans.

Extensive livestock systems and monocultures such as olives, almonds and grapes require considerable change in farm architecture and management in space and time in order to enhance farm productivity, food quality and environmental health. Yet, initiating composting and crop rotation and choosing adapted varieties, aromatic and medicinal plants or green manure and forage crops for intercropping, as well as improving pasture management, require skills that are often lacking.

Historically, droughts of varying extents and duration and erratic rainfall have evolved fascinating adaptive responses in plants, animals and humans—from genes in populations of desert habitats, through phenotypic plasticity in plant communities and predator-prey foraging games, to community ecology. Ecological management, or informed decision-making in such environments, requires wisdom. Throughout the millennia, peasants and pastoralists engineered agricultural systems adapted to Mediterranean conditions by observing change and responding to experience. But today, biophysical and socio-economic pressures have disrupted equilibria, eroding traditional wisdom, as well as the land. In arid environments, even agroecological knowledge is scarce.

Modern agriculture seemingly emerged in the nineteenth century, when agriculturists learned to synthesize nitrogen salt in order to fertilize plants. Yet this development actually harkened back the farming approach to pre-Christian times when plants were fertilized with water and its loamy deposits in the river valleys of the Euphrates, Tigris and Nile. Even though in the eighth century, European agricultural development had begun to transform landscape by manuring the Earth and establishing integrated farms, relating animal husbandry and arable work, today's agriculture has reverted to ancient Egyptian approaches.

Today's dependence on synthetic agricultural inputs, from fertilizers to pesticides and seeds, has forgotten to enliven the Earth and to consider farms as living organisms where everything is connected. By disenfranchising farmers, disconnecting animals from the land and applying a mechanistic approach, the art of farming in harmony with nature is on the verge of extinction.

In ecological management, a landscape is perceived as a whole rather than isolated segments; every single feature is related to the others. The goal must be to harness ecological processes, understand the connectedness of the physical, biological and social environments, and intervene to maximize goods and services. But how can modern ecological science be established in our era of rapid change?

A first step is to pool existing knowledge and make it available: this book is an opportunity to deepen agroecological knowledge for all those interested in practicing ecological agriculture in dry areas. But a second step must follow, and that is to generate even more dryland agroecological knowledge. This will require ingenuity, creativity and action research—a combination that the organic community has historically embraced.

Preface/Prólogo

La falta de conexión entre plantas, animales y personas ha contribuido a la presente crisis ambiental de nuestro mundo y a la desintegración de las comunidades rurales. Pero en beneficio de todos, los agricultores ecológicos, orgánicos y biodinámicos han estado trabajando, aunque en relativamente pequeñas y dispersas localizaciones, en la “curación” de la Tierra, reconciliando al ser humano con el entorno y, sobre todo, haciéndose responsables de la Tierra y su futuro.

La agricultura en zonas áridas y semiáridas conlleva enfrentarse con la variabilidad y la imprevisibilidad. En la cuenca Mediterránea, la presencia de suelos poco fértiles, los contrastes climáticos y la topografía escarpada requiere una gestión cuidadosa en el manejo agrícola. Mientras que la intensificación de la agricultura ha llevado a estos ecosistemas a la degradación ambiental y la desertificación, contrarrestarlo con un manejo ecológico no es fácil. Se requiere hacer frente a la escasez, no solo de biomasa y agua, sino de los conocimientos adecuados. Aún así, la gestión ecológica es la única opción para estabilizar estos ambientes.

En los países mediterráneos, la conversión de las prácticas agrícolas convencionales a manejo ecológico presenta varios desafíos en cuanto a la rehabilitación de la fertilidad del suelo y al restablecimiento del equilibrio entre plagas y sus depredadores. La fertilidad del suelo se ve comprometida por la interrupción de la dinámica en la descomposición de la biomasa durante las largas estaciones secas. El problema de la lenta acumulación de materia orgánica en el suelo se ve agravado por la creciente incertidumbre en lo referente a la disponibilidad del agua como consecuencia del cambio climático.

La agricultura ecológica se basa en un manejo que promueve el enriquecimiento y diversificación del suelo, sin exceder la capacidad de tolerancia de la tierra. Dado que el suelo, el agua y el aire cada vez están más contaminados y los alimentos contienen más sustancias de origen sintético, existe una necesidad urgente de cambiar de dirección hacia la creación de suelos vivos que permitan el desarrollo de plantas, animales y personas saludables.

Los sistemas de ganadería extensiva y monocultivos tales como olivares, viñas y explotaciones de almendros, requieren un cambio considerable en la arquitectura de la explotación y en el manejo del espacio y el tiempo a fin de mejorar la productividad agraria, la calidad alimentaria y la salud ambiental. Sin embargo, el adoptar técnicas productivas como el compostaje y la rotación de cultivos, la elección de variedades adaptadas a cada zona, plantas aromáticas y medicinales, cultivos como abono verde y forrajeros intercalados, así como la mejora en la gestión de los pastos, requiere habilidades que a menudo escasean.

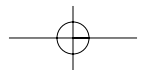
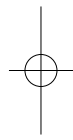
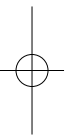
Históricamente, las sequías de extensión y duración variable y la imprevisibilidad de las precipitaciones han ocasionado fascinantes respuestas adaptativas en plantas, animales y seres humanos—desde genes en las poblaciones de los hábitats del desierto, pasando por la plasticidad fenológica de las comunidades vegetales y del depredador hacia su presa, a la ecología de la comunidad—. El manejo ecológico, o la toma de decisiones en tales ambientes, requiere sabiduría. A lo largo de los milenios, los campesinos y los pastores se han adaptado a las condiciones mediterráneas mediante la observación de los cambios y las respuestas en base a la experiencia. Pero hoy en día, las presiones biofísicas y socio-económicas han alterado los equilibrios, erosionando la sabiduría tradicional, así como la tierra. En ambientes áridos, incluso los conocimientos en agroecología son escasos.

La agricultura moderna aparentemente surgió en el siglo XIX, cuando los agricultores aprendieron a sintetizar sales nitrogenadas para fertilizar las plantas. Sin embargo, este desarrollo realmente se remontó a la visión que se tenía de la agricultura en la época cristiana, cuando las plantas se fertilizaban con agua y los depósitos arcillosos en los valles de los ríos Éufrates, Tigris y Nilo. Y aunque en el siglo VIII el desarrollo agrícola europeo había empezado a transformar el paisaje abonando el suelo y estableciendo fincas integradas asociadas a la cría de animales y al trabajo de los campos, la agricultura de hoy en día ha vuelto a los antiguos logros de Egipto.

La dependencia actual a los insumos de síntesis en agricultura, desde fertilizantes a pesticidas y semillas, se ha olvidado de animar a la Tierra y de considerar las explotaciones agrícolas como organismos vivos donde todo está interconectado. El privar de sus derechos a los agricultores, separar a los animales de la tierra y aplicar un enfoque mecanicista, lleva al arte de la agricultura en armonía con la naturaleza al borde de la extinción.

En el manejo ecológico, el paisaje se percibe como un todo más que como partes aisladas, de forma que todas las funciones se relacionan entre sí. El objetivo debe ser aprovechar los procesos ecológicos, entender la conexión de los ambientes físicos, biológicos y sociales, e intervenir con objeto de maximizar los bienes y servicios. Pero, ¿cómo puede establecerse la ciencia ecológica moderna en nuestra era de rápidos cambios?

Un primer paso sería agrupar los conocimientos existentes y ponerlos a disposición de la sociedad: este libro es una oportunidad para profundizar en el conocimiento de la agroecología para todos aquellos interesados en practicar la agricultura ecológica en ambientes áridos. Pero debe seguirse un segundo paso, que es generar aún más conocimiento agroecológico del seco. Esto requerirá ingenio, creatividad e investigación activa, una combinación que la comunidad ecológica ha abrazado históricamente.



Introducción

El Informe del Relator Especial sobre el derecho a la alimentación, Sr. Olivier de Schutter, publicado en la Asamblea General de la O.N.U. el pasado 20 de diciembre de 2010, hace referencia y aconseja la Agroecología como el mejor modelo a seguir para garantizar el abastecimiento alimentario en las próximas décadas. Plantea a los estados recomendaciones importantes con objeto de conseguir una armonización entre la necesidad de alimentos y la forma sostenible para conseguirlos y manifiesta la posibilidad de crear un entorno propicio para esos modos de producción sostenibles mediante políticas públicas adecuadas, entre las que se incluyen: dar prioridad, en el gasto público, a la contratación de bienes públicos, en lugar de limitarse a ofrecer subvenciones a los insumos, e invertir en el conocimiento mediante la reinversión en investigación agrícola y en servicios de extensión.

Aparentemente, los secanos son los grandes olvidados de la agricultura. A pesar de que hoy en día la mayor parte de la producción agrícola y de la población rural se sigue sustentando y viviendo de los secanos, la escasez de bibliografía en comparación con la existente acerca de temas relacionados con los cultivos irrigados, indica hasta qué punto no se ha considerado necesario profundizar, en aspectos aparentemente conocidos, por el estamento técnico y científico.

Se entiende como cultivo en régimen de secano el que se practica según permiten las condiciones naturales de la zona de que se trate y sin aporte externo de agua. De esta forma podríamos decir que el cultivo en régimen de secano es el más natural que existe, ya que únicamente se vale, para la obtención de la cosecha, de las condiciones ambientales que la naturaleza pone a su disposición.

Debido a esta circunstancia, también podríamos decir que existen tantos secanos como climas y que las posibilidades productivas son distintas, lógicamente, entre un secano con 2.000 mm de precipitación y un secano que recibe únicamente 200 mm de lluvia al año. Ambos casos constituyen agroecosistemas diferentes pero con todos los elementos que la evolución y la adaptación de las especies les ha conferido a lo largo de los años en lo silvestre, y a la selección y mejora genética que los agricultores han propiciado durante generaciones para esas condiciones ambientales concretas.

En el caso que nos ocupa, nos hemos centrado en los secanos de ambientes semiáridos, por ser los que se corresponden con nuestra área geográfica (precipitaciones inferiores a 500 mm).

Son, por tanto, grandes áreas de nuestra geografía más próxima, tanto de la Península Ibérica como de toda la cuenca mediterránea, las que están sometidas a este régimen climatológico y que es el que condiciona su productividad, puesto que el agua y su distribución es el factor limitante por excelencia. Desgraciadamente, según los datos de los científicos, las proyecciones sobre las consecuencias del cambio climático en este área terrestre llevan a pensar que los regímenes de precipitación van a disminuir en las próximas décadas. En consecuencia, si no queremos que el medio rural se despueble, con las consecuencias socio políticas que este hecho puede conllevar, será necesario ir adaptándose a estos cambios con una agricultura que proporcione unos productos de calidad indiscutible y, por tanto, que les confiera un valor añadido.

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

Precisamente la región mediterránea se puede considerar, desde el punto de vista histórico, la cuna de cultivos tan trascendentes para la humanidad como el olivo y la vid, cereales como el trigo, la cebada y el centeno, y leguminosas como el garbanzo y la lenteja, entre otros. Sus derivados (el aceite de oliva, el vino, el pan, la cerveza, etc.), lo que actualmente se conoce como “cocina mediterránea”, constituyen la base de la alimentación de tantos y tantos pueblos y civilizaciones que han habitado las orillas del *Mare Nostrum*.

El aumento de la población ha sido, y continúa siendo, el principal motivo que ha justificado, en el llamado primer mundo, la necesidad de incrementar los rendimientos de todos los cultivos adaptados a las condiciones de aridez propias de los secanos. Sin embargo, la intensificación a través del regadío y de unas prácticas ahora reconocidas como insostenibles, no solo no ha llegado a satisfacer las demandas alimenticias reales, sino que ha provocado una enorme y galopante contaminación difusa en el medio, debida especialmente a los medios técnicos puestos, de una manera un tanto indiscriminada, a disposición de los agricultores.

Consecuencia lógica de estos hechos ha sido la aparición de las llamadas “agriculturas sostenibles” que, según la propia definición de sostenibilidad enunciada en el informe Brundtland (1987), constituyen el conjunto de técnicas cuya aplicación no compromete el futuro de las siguientes generaciones, siguiendo el nuevo concepto de solidaridad intergeneracional, o dicho en términos vulgares, “que no dejan huella” en el entorno por la explotación excesiva de los recursos.

En los momentos actuales, estamos sufriendo un segundo aviso en referencia a la crisis que se avecina, en los próximos años, ante el hecho incuestionable de la escasez del petróleo y su imparable incremento de precio. Este hecho va a poner en duda todo el sistema productivo actual, incluidas las nuevas tecnologías, altamente dependientes de los combustibles fósiles, y probablemente el problema del hambre en un mundo superpoblado no se solucionará con ellas sino con el desarrollo de producciones locales basadas en los propios recursos.

La producción ecológica, según determina el Reglamento CE 834/2007 del Consejo, sería el paradigma de la sostenibilidad, puesto que tiene en alta consideración el trabajo del agricultor que lo aplica y controla las prácticas y técnicas permitidas, recomendadas o prohibidas, en su caso, y siempre conducentes a esa producción equilibrada y mucho menos dependiente de los combustibles fósiles.

Con el fin de poner en valor esta idea hemos querido agrupar, en esta publicación, diferentes trabajos que indican, tanto a los técnicos como a los agricultores que quieren transitar por esta vía de equidad y justicia social de cara al futuro, cuál es el camino a seguir y el conocimiento sobre los diferentes aspectos que intervienen en el manejo de los agrosistemas de secano, siempre desde la experiencia de muchos años de investigación, experimentación o práctica diaria.

Son muchos los autores de los diferentes trabajos que se exponen y que han aportado su experiencia y su conocimiento para que este libro pueda cumplir con el deseo de servir de guía o, al menos, de referencia, para quienes son conscientes de que una buena parte del futuro de la agricultura tendrá que seguir dependiendo del buen manejo que se otorgue a la agricultura de secano, precisamente porque el agua será un bien cada día más escaso y cotizado. Fundamentalmente se ha requerido la colaboración de autores con participación directa en proyectos y experimentos realizados en la **Finca Experimental La Higuera** o bien cuyas especialidades han contribuido a complementar los trabajos realizados, durante décadas, en ese entorno.

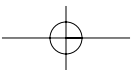
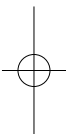
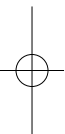
Especialmente es para nosotros necesario destacar desde estas líneas el compromiso del Profesor de Investigación **D. Antonio Bello Pérez**, ilustre canario y manchego de adopción, quien facilitó e impulsó, desde su puesto de Director del Instituto de Edafología y Biología Vegetal del CSIC, el arranque de los experimentos de

Introducción

los que, generaciones de investigadores, se han ido valiendo para obtener resultados y conclusiones válidos con una suficiente perspectiva temporal, así como a los Directores del Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC y Consejeros de Agricultura de Castilla-La Mancha que, sucesivamente, han permitido la continuidad de los experimentos de larga duración que han sido base de los conocimientos aportados.

Es pues desde estas páginas desde donde queremos dar las gracias tanto a las personas, muchas, que nos han animado a realizar el esfuerzo de recopilar todos estos trabajos, como a todos los autores quienes, desde sus respectivas especialidades, han contribuido a dar estructura a esta obra, así como a todos los investigadores y técnicos que, aunque ya se encuentren retirados de su vida profesional, han contribuido con su esfuerzo y su ilusión a los trabajos que han dado origen a esta obra, apostando por la sostenibilidad incluso en tiempos en los que este concepto era poco considerado en ambientes científicos. Todo ello ha conferido a esta obra un carácter multidisciplinar, pero, en su conjunto, hemos intentado que tenga un "alma" propia, con las aportaciones de cuatro productores ecológicos, casos reales, cuyas fincas son totalmente representativas de estos agroecosistemas y que constituyen la verdadera motivación para los técnicos y científicos que hemos tratado de aproximarnos, de una manera participativa, a la realidad del campo y de los agricultores.

Los Coordinadores



EROSIÓN Y MANEJO DEL SUELO. IMPORTANCIA DEL LABOREO ANTE LOS PROCESOS EROSIVOS NATURALES Y ANTRÓPICOS

SOIL EROSION AND SOIL MANAGEMENT. IMPORTANCE OF TILLAGE IN THE NATURAL AND ANTHROPOGENIC PROCESSES OF SOIL EROSION

Saturnino de Alba Alonso, María Alcázar Torralba, Fernando Ivón Cermeño Martín, Fernando Barbero Abolafio

Instituto de Geociencias (CSIC-UCM). Dpto. Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid.
C/ José Antonio Novais, s/n. 28040 - Madrid - sdealba@geo.ucm.es

Resumen

El suelo es un recurso natural no renovable a una escala temporal humana y el soporte básico imprescindible para la existencia de ecosistemas terrestres, ya sean naturales o modificados por las actividades humanas. Su naturaleza como recurso no renovable hace que cualquier proceso de degradación que sufra tenga consecuencias irreversibles en la mayor parte de los casos. Los ecosistemas agrícolas son particularmente sensibles ante la degradación del suelo dado que su productividad depende en última instancia de las cualidades y del estado de conservación de este. En este capítulo se presenta una revisión de los principales procesos erosivos, erosión hídrica y erosión mecánica, que son activos en los paisajes del secano mediterráneo. Investigaciones recientes han revelado que más del 85% de las tasas anuales medias de pérdida de suelo corresponden a la erosión que tiene lugar durante episodios que pueden ser clasificados como de erosión extrema. En el secano mediterráneo estos episodios extremos no solo ocurren durante tormentas de elevada intensidad de lluvia (ej. células convectivas), sino que también tienen lugar durante situaciones invernales de temporal. En éstas últimas, el suelo con frecuencia se encuentra próximo a la saturación y basta la ocurrencia de lluvias de baja energía para que se desencadenen fenómenos erosivos de una elevada magnitud. Los datos de campo y resultados experimentales actualmente disponibles, muestran que estos episodios erosivos extremos deben ser considerados claves a la hora de evaluar la eficacia de las distintas alternativas de prácticas agronómicas y planes de conservación del suelo, como son el caso de todas aquellas incluidas en los reglamentos derivados de la PAC. En este contexto, destaca que la labranza a nivel (labranza en contorno) se ha revelado como una práctica que no solo no es efectiva para controlar la erosión hídrica en el secano mediterráneo, sino que intensifica dramáticamente los efectos erosivos que tienen lugar en episodios extremos. Por otro lado, la redistribución del suelo durante las prácticas de laboreo ha sido identificada como un intenso proceso de degradación del suelo (erosión mecánica o erosión por laboreo), que debe ser considerado a la hora de evaluar el impacto de la erosión del suelo sobre la productividad de los campos agrícolas, la calidad medioambiental o la evolución de los paisajes en el secano mediterráneo.

Palabras clave: Secano mediterráneo, erosión hídrica, prácticas de conservación, labranza a nivel, labranza según la pendiente, episodios erosivos extremos, erosión mecánica.

Abstract

Soil is a natural resource non-renewable at a human temporal scale; hence any disturbance usually produces its irreversible degradation. Agricultural systems are especially sensible to soil degradation as theirs

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

productivity depends directly on the health and quality of the soils. This paper presents a review of the mine soil degradation processes of water erosion and mechanical erosion active in the Mediterranean rainfed agricultural landscapes. The available literature indicates that the extreme episodes of water erosion cause more than 85% of the total annual soil losses. In Mediterranean environments, extreme erosion episodes not only occur during high intensity rainfall (e.g. convective cells), but also occur in typically winter periods, in which soil is close to saturation and moderate intensity rains are enough to cause great magnitude erosion processes. Recent field data and experimental results reveal that those extreme erosive episodes should be the key factor in order to identify effective soil conservation practices and conservation plans, like those derive from the European Common Agriculture Policy (CAP). A particular case is it of the conservation practice of contour tillage, that it has been demonstrated not to be effective to control soil erosion in Mediterranean climate, furthermore increases dramatically the erosion effects of extreme episodes. As well, soil redistribution by tillage (tillage or mechanical erosion) has been identified as an important global soil degradation process that has to be accounted for when assessing the impact of soil erosion on soil productivity, environmental quality or landscape evolution in the Mediterranean agro-systems.

Key words: *Mediterranean rainfed agriculture, water erosion, conservation practices, contour tillage, up-slope tillage, extreme erosive episodes, tillage erosion.*

1. El suelo: un recurso natural no renovable

El suelo constituye el recurso natural básico para el soporte de los ecosistemas terrestres, ya sean naturales o productivos. La importancia de conservar un suelo de buena calidad es particularmente patente en los sistemas agrícolas, donde la productividad va a depender, en buena medida, del estado de conservación del suelo. Más aún en los paisajes mediterráneos de agricultura extensiva donde las condiciones climáticas ya son, por sí mismas, una importante limitación para la productividad.

La erosión del suelo consiste en la remoción, arranque y transporte de los materiales que constituyen la capa más superficial del suelo, sea cual sea el agente responsable: agua, viento, hielo, actuaciones humanas, etc. En este capítulo se va a incidir expresamente en los efectos *on site* de la erosión, es decir los efectos directos sobre la degradación del suelo en los campos de cultivo; y no se consideran los posibles efectos *off site* de dicha erosión, tales como el aterramiento de embalses o la acumulación de sedimentos en infraestructuras viales.

Como resultado de los procesos erosivos, el suelo manifiesta un descenso neto de su fertilidad natural y productividad biológica. La erosión produce la reducción del espesor efectivo del perfil edáfico y, por tanto, del volumen de suelo explotable por la vegetación o el cultivo. Dado que la pérdida de material afecta fundamentalmente a las capas superficiales del suelo, en las que reside la mayor fertilidad, su pérdida supone una merma significativa de los contenidos de materia orgánica y nutrientes. La acción de los agentes erosivos provoca una degradación progresiva de la estructura física del suelo lo que, a su vez, aumenta la vulnerabilidad de este a ser degradado y afecta al resto de las funciones del suelo. Por todo lo anterior, el suelo manifiesta una disminución progresiva en su capacidad de retención de agua y nutrientes disponibles para las plantas, lo que repercute en una reducción drástica de su fertilidad.

El hecho de reconocer la naturaleza no renovable a escala temporal humana del recurso edáfico es de extraordinaria importancia. Su degradación supone la mayoría de las veces su destrucción irre-

versible y en el caso límite la desertificación del territorio. La formación de suelo fértil, susceptible de ser económicamente productivo, mediante la alteración del material original, es un proceso sumamente lento medible únicamente en una escala de tiempo geológico [1]. La formación de apenas 5 cm de suelo puede necesitar el transcurso de cientos e incluso miles de años, mientras que los procesos erosivos pueden actuar rápida y drásticamente. El equivalente a esos 5 cm de espesor de la capa superficial de suelo puede ser eliminado durante una única tormenta [2]. En condiciones naturales, los procesos responsables de la formación de los suelos y aquellos responsables de su destrucción por erosión, alcanzan un equilibrio tal que asegura el mantenimiento de una capa superficial de suelo capaz de soportar una cubierta vegetal estable. La ruptura del equilibrio suelo-vegetación-clima debido a las actividades humanas puede llegar a desencadenar la degradación irreversible del suelo y, con ello, limitar tanto su potencial productivo agro-forestal como su capacidad de regeneración y soporte de los ecosistemas naturales. En consecuencia, la gestión del territorio desde una perspectiva conservacionista debe asumir el objetivo de mantener, de forma indefinida, el potencial productivo de los suelos y, con ello, asegurar la sostenibilidad de las explotaciones agro-forestales [3]. Con tal fin, es necesario conocer los límites tolerables de pérdida del suelo que no supongan una degradación progresiva de este; es decir, cuando la tasa de pérdida de suelo no sea superior a la de su regeneración.

De forma generalizada, se considera la cantidad 11,2 t/ha como el límite máximo de tolerancia de erosión anual [4]. Esta cantidad corresponde a una capa de suelo de 1 mm de espesor que sea removida uniformemente de la superficie, tomando como valor medio de densidad aparente del suelo 1,12 g/cm³. No obstante, dicho límite tolerable de pérdida de suelo varía de manera importante para los distintos tipos de suelos, en función de su estado de conservación, profundidad y propiedades físicas y químicas. En la Tabla 1 se recogen los valores máximos de tolerancia de pérdida de suelo adoptados por el Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU. [5] para la evaluación de las distintas alternativas de manejo. Los valores de tolerancia a la erosión varían en función de la profundidad efectiva del suelo entre 11,2 t/ha.año para suelos con profundidad efectiva superior a 150 cm, y 2,2 t/ha.año cuando dicha profundidad es inferior a 25 cm. Además, la tolerancia disminuye cuando el substrato sobre el que se desarrolla el suelo resulta desfavorable para la regeneración de este, incluso cuando se apliquen prácticas de manejo tales como enmiendas orgánicas o aportes de fertilizantes químicos.

Tabla 1

Valores máximos de pérdida de suelo tolerable en función de que no superen las tasas de formación de suelo [5], y del mantenimiento de la capacidad productiva de los suelos [6]

Prof. efectiva del suelo (cm)	Tasas de erosión máximas tolerables (t/ha.año)		
	Servicio de Conservación de Suelo de los EE.UU. (SCS, 1973)		Moreira (1991)
	Substrato favorable	Substrato desfavorable	Valle del Guadalquivir
0-25	2,2	2,2	0,2
25-50	4,5	2,2	1,1-1,8
50-100	6,7	4,5	1,7-2,5
100-150	9,0	6,7	5,0-7,0
> 150	11,2	11,2	5,3-7,1

En España destaca el trabajo realizado por J. L. Moreira [6] para la estimación de los valores máximos de tolerancia de pérdida de suelo en el valle central del Guadalquivir (Tabla 1). Este autor propuso determinar dichos valores de tolerancia con la condición de mantener la productividad de los suelos a un nivel equivalente al actual durante un plazo de al menos 1.000 años. En este caso los valores se reducen de forma drástica. La tolerancia máxima de pérdida de suelo es de 7,1 t/ha.año en el caso de suelos más profundos que 150 cm y tan solo de 0,2 t/ha.año para suelos con una profundidad inferior a 25 cm.

2. Por qué es difícil percibir los efectos erosivos en los paisajes agrícolas

Un aspecto singular que dificulta la percepción por parte de la sociedad de la gravedad de la erosión del suelo en los paisajes agrícolas es el carácter efímero de los rasgos erosivos. En comparación con otras zonas naturales en las que los rasgos erosivos tales como las incisiones de regueros y cárcavas permanecen visibles sobre la superficie del suelo una vez que han sido generados; la degradación del suelo en los campos agrícolas no es tan claramente apreciable. Esto se debe a que las prácticas convencionales de laboreo eliminan periódicamente estos rasgos erosivos superficiales. A modo de ejemplo, en la imagen de la izquierda de la Foto 1 se observa la erosión producida por una tormenta de verano, de escasamente 45 min. de duración, sobre una ladera que permanecía en condiciones de barbecho blanco. La imagen muestra la formación de una cárcava de más de 2 m de anchura y 40 cm de profundidad, que revela una pérdida de suelo de enorme magnitud. Sin embargo, en la imagen de la derecha, tomada apenas diez días después de la anterior, el campo se presenta recién labrado y sin rasgo alguno que permita sospechar la ocurrencia del episodio erosivo anterior. Como en la mayoría de los casos, los efectos erosivos fueron visibles sobre la superficie de los campos apenas unos días después de la tormenta, justo el tiempo necesario para que el suelo alcanzara unas condiciones óptimas que permitieran realizar la labranza.



Foto 1. Los rasgos erosivos permanecen sobre la superficie apenas unos días después de la tormenta. a) Regueros y cárcavas fotografiados apenas cuatro días después de la tormenta. b) Imagen del mismo campo tomada diez días después de la tormenta e inmediatamente después de realizarse la labor.

A pesar de la dificultad de visualizar directamente en campo las consecuencias de los procesos erosivos cuando éstos se producen, la observación detallada del paisaje si permite identificar los efectos acumulados a largo plazo. Así, en el paisaje característico del secano mediterráneo se observa una presencia generalizada de suelos truncados en las lomas y hombreras, y en general en los tramos convexos de las laderas. Se trata de perfiles de suelo que han perdido por erosión total o parcial los horizontes edáficos superficiales (el *solum*, horizontes A y B), de tal modo que quedan expuestos en superficie los materiales pertenecientes a horizontes C originariamente subsuperficiales, o una mezcla de éstos horizontes con restos de los superficiales. De este fenómeno resulta particularmente ilustrativo el modelo idealizado propuesto por J. Gallardo y colaboradores [7] para la formación de perfiles truncados de suelo en laderas cultivadas representado en la Figura 1.

La Foto 2 recoge una panorámica aérea que puede ser considerada como representativa de los campos de agricultura extensiva del secano mediterráneo. En la imagen, se observa como los suelos truncados son claramente predominantes en los tramos altos y hombreras de las laderas. En estas zonas, los tonos claros revelan la presencia en superficie de materiales pertenecientes a horizontes cálcicos originariamente subsuperficiales en perfiles de suelo de los tipos Luvisol cálcico y Calcisol (FAO, [8]), que son característicos de esta zona. Como consecuencia de la decapitación de los horizontes superficiales, en la Foto 2 se puede apreciar como las prácticas de laboreo y cultivo se realizan directamente sobre los materiales procedentes de los horizontes cálcicos. Como se verá más tarde, la aparición de ese material carbonatado en la capa de labranza supone una importante limitación para el desarrollo de los cultivos, tanto por sus propiedades químicas como físicas, y por tanto una reducción drástica de la productividad. De todo lo anterior, se pone de manifiesto la elevada intensidad con la que tiene lugar la degradación del suelo por erosión en los paisajes del secano mediterráneo, así como la extensión y gravedad de los efectos resultantes.

Una dificultad añadida para percibir las consecuencias adversas de la degradación

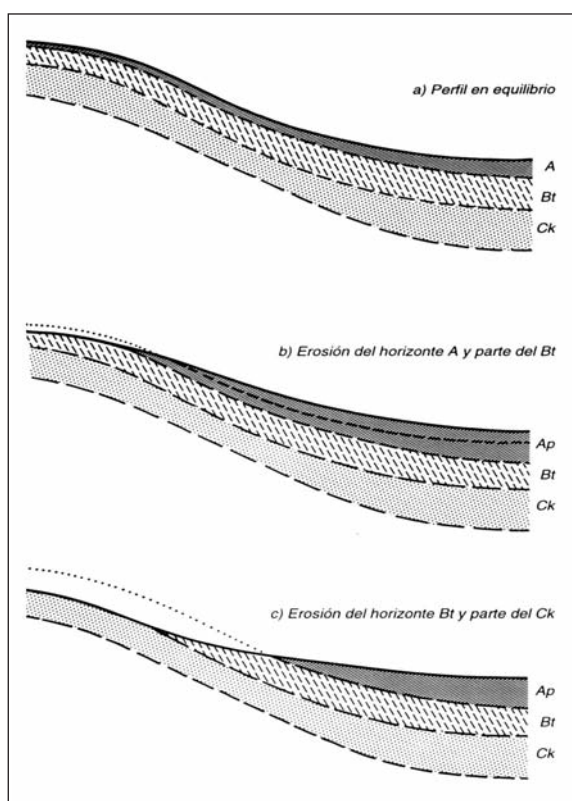


Figura 1. Modelo idealizado de las fases de formación de suelos truncados en las laderas agrícolas. La situación original representa un perfil de suelo más o menos uniforme a lo largo de toda la ladera, con horizontes edáficos A, B y C, como el que podría existir bajo una cubierta de bosque natural. En una primera fase, por ej. tras la deforestación y puesta en cultivo, el suelo comienza a ser erosionado y el horizonte A superficial se pierde en las zonas altas de la ladera, para acumularse en la base de la misma. Posteriormente, la erosión provoca la eliminación total del solum (horizontes A y B) en la parte alta de la ladera, que es acumulado en la base de la pendiente, apareciendo en superficie el horizonte originariamente subsuperficial de muy reducida o nula fertilidad natural (después de J. Gallardo y colaboradores [7]).

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO



Foto 2. Paisaje agrícola con rasgos evidentes de intensa degradación del suelo por erosión. Se observa una presencia generalizada de suelos truncados en las lomas y hombreras, y en general en los tramos convexos de las laderas; en la imagen corresponden a las zonas de tonos claros debido a la presencia en superficie de material procedente de horizontes cálcicos originariamente subsuperficiales. A la izquierda se muestra uno de los perfiles edáficos representativos en las áreas no degradadas del mismo paisaje. (Santa Olalla).

del suelo, reside en que éstas quedan parcialmente camufladas por la utilización de agroquímicos, lo que conduce a una reducción progresiva de la fertilidad natural del suelo, a la vez que aumenta la dependencia de los mismos para mantener la rentabilidad de la explotación.

3. Información disponible sobre tasas de erosión hídrica en el secano mediterráneo

Destacan los Mapas de Estados Erosivos realizados por el ICONA y finalizados en 1991 [9]. En estos mapas se estimaron las tasas de pérdida de suelo mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, USLE, conforme a los algoritmos y nomogramas de cálculo tal como fueron establecidos por Wischmeier y Smith en 1978 [10]. El estudio abarcó toda la superficie nacional, estructurando el territorio en función de las distintas cuencas hidrográficas y presentó la cartografía de estados erosivos a escala 1:400.000. En dicho estudio se concluyó que la tasa de erosión anual media para el conjunto del territorio asciende a 23,37 t/ha.año, es decir más del doble del valor considerado como máximo tolerable de pérdida de suelo (11,2 t/ha.año); que en un 43,8% de la superficie nacional (22,1 10⁶ ha) la tasa de erosión hídrica supera este valor tolerable; y que en otro 18,1% de la superficie (9,16 10⁶ ha) los procesos erosivos se manifiestan con una elevada intensidad [11]. Al mismo tiempo, el estudio puso de manifiesto la importancia de la degradación del suelo en los

campos agrícolas, ya que el 73% de las pérdidas totales de suelo tiene lugar en los campos de agricultura extensiva de cultivos arbóreos, viñedos y herbáceos de secano; y hasta el 11% en terrenos de erial o con matorral y arbolado disperso.

A pesar de los indicadores anteriores que revelan la gravedad de la erosión en España, y más concretamente en el secano mediterráneo, contrasta la carencia casi total de datos medidos directamente en campo que permitan cuantificar las pérdidas de suelo que tienen lugar en los distintos escenarios agroambientales. En cuanto a los estudios disponibles para la medición en campo de las tasas de erosión, apenas se han realizado algunos trabajos dispersos en los que mayoritariamente se han utilizado parcelas experimentales del tipo USLE y de reducido tamaño (<30 m²). En otros casos, se han realizado experimentos de simulación de lluvia sobre parcelas de tamaño muy variable, pero salvo excepciones siempre inferior a 1 m². Tanto en el caso de las parcelas experimentales como en los ensayos de simulación de lluvia, se han aplicado métodos y técnicas muy diversas que hacen sumamente difícil la comparación de los resultados obtenidos en cada caso. Una de las implicaciones de esta falta de datos de campo es que no resulta posible calibrar o validar adecuadamente los distintos modelos de estimación de la pérdida de suelo (USLE, RUSLE, etc.), para las condiciones específicas de los agrosistemas mediterráneos. Sin embargo, dichos modelos son aplicados de forma sistemática y generalizada en todo tipo de trabajos e informes técnicos, incluidos aquellos que se utilizan para ajustar las distintas normativas legislativas del sector a las condiciones agronómicas regionales; así por ejemplo, para identificar áreas con elevado riesgo de erosión, o para seleccionar las prácticas de conservación más adecuadas.

4. Erosión hídrica y medio físico en el secano mediterráneo

a) *Procesos de erosión hídrica*

Los procesos de erosión hídrica incluyen todos aquellos en los que el agua es el agente responsable del arranque, transporte y sedimentación de los materiales del suelo. En este capítulo tan solo haremos referencia a los procesos que son operativos a escala de ladera agrícola, que afectan a la degradación del recurso natural "suelo" y cuya intensidad erosiva puede verse directamente afectada por el modelo de manejo agronómico que se aplique. Estos procesos incluyen la erosión difusa y erosión en regueros y cárcavas efímeras.

La erosión difusa se refiere a la ocasionada directamente por el impacto de las gotas de lluvia, también denominada erosión por salpicadura (*splash erosion*), o a la producida por el transporte de material por el agua de escorrentía que fluye en forma de lámina de agua (flujo no concentrado) sobre la superficie del suelo (Foto 3).

La erosión en regueros (*rill erosion*), tiene lugar cuando la concentración de escorrentía genera un caudal con energía suficiente para que la fuerza cortante del agua supere a la resistencia del suelo, dando lugar a la incisión de regueros (Foto 4). Estos se denominan cárcavas efímeras cuando alcanzan dimensiones mayores pero no llegan a impedir la mecanización del campo, por lo que pueden ser eliminados de la superficie; y cárcavas verdaderas, cuando los ca-

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO



Foto 3. La presencia de pedestales indica que el campo a sufrido importantes pérdidas de suelo por erosión difusa. La parte alta del pedestal preserva el nivel original de la superficie del campo (Paracuellos del Jarama, Madrid).



Foto 4. Red de regueros formada durante una tormenta de elevada intensidad sobre un campo recién labrado (Paracuellos del Jarama).

nales llegan a fragmentar los campos de forma irreversible y su eliminación requiere el uso de maquinaria pesada.

La intensidad con la que actúan los distintos procesos erosivos va a depender de un conjunto de factores. Los más destacables son: entre los que cabe destacar en primer lugar las características físicas del medio, principalmente en cuanto a parámetros meteorológicos (distribución de las precipitaciones, intensidades de lluvia, etc.), el tipo de suelo y el relieve de los campos de cultivo. No obstante, como veremos a continuación, el manejo agronómico va a jugar un papel predominante para reducir o aumentar los efectos erosivos y por tanto la degradación del suelo.

b) Medio físico y erosión hídrica

En el secano mediterráneo se da una combinación muy particular de características físicas y ambientales, que hacen que los procesos erosivos presenten una dinámica muy contrastada respecto a otras zonas agroambientales propias de climas templados y húmedos.

Se conoce como **erosividad de la lluvia** a la capacidad de ésta para generar erosión, y guarda relación con la cantidad de agua que cae por unidad de superficie y la energía con la que ésta impacta sobre la superficie del suelo. A su vez, la energía de la lluvia es directamente proporcional a su intensidad, es decir, a la cantidad de agua por unidad de superficie y de tiempo. El clima mediterráneo se caracteriza por presentar una muy marcada irregularidad en la distribución de las precipitaciones, tanto a nivel estacional (con una acusada sequía estival) como interanual. Más aún, un rasgo característico del clima mediterráneo, es la ocurrencia de fenómenos tormentosos aislados de poca duración y elevadas intensidad y erosividad, como son las tormentas típicas de verano. Todo ello provoca que en el secano mediterráneo la erosión hídrica no sea un fenómeno continuo y uniformemente distribuido en el tiempo, sino todo lo contrario, ya que las pérdidas de suelo se concentran en muy pocos episodios de lluvia de elevada energía.

La **longitud** y la **pendiente** de las laderas son dos factores determinantes de la intensidad de la erosión. Conforme aumenta la longitud de la ladera cultivada, aumenta la superficie de captación de escorrentía, y por tanto los caudales de agua que pueden llegar a concentrarse. Al mismo tiempo, con la pendiente aumenta la velocidad del agua y por tanto su capacidad erosiva. No obstante, los campos en los que la erosión pueden llegar a ser un problema grave, se sitúan en paisajes en los que el relieve puede ser tanto suavemente ondulado (pendientes entre el 3% y 10%) como en laderas con pendientes acusadas.

Las propiedades de la capa superficial del suelo, o capa de labor, van a determinar la **erosionabilidad del suelo**, es decir, su vulnerabilidad o susceptibilidad a ser erosionado. Entre otras propiedades que determinan esta erosionabilidad, cabe destacar el contenido de materia orgánica, la estabilidad estructural, la estructura del suelo, la permeabilidad y la textura. El secano mediterráneo se caracteriza por presentar una gran variabilidad de tipos de suelo, que en buena medida va a venir determinada por las características geológicas del territorio, y más concretamente, de la naturaleza del material litológico sobre el que se desarrollan. Sin embargo, una característica generalizada, y posiblemente resultado de una larga historia de uso agrícola, es que los suelos presentan horizontes superficiales con contenidos muy reducidos de materia orgánica, con frecuencia inferiores al 1%, y con una estabilidad estructural muy débil, que les hace fácilmente erosionables. Algunas de estas propiedades del suelo son propiedades primarias, como es el caso de la textura, y difícilmente pueden ser modificadas, pero otras dependen en gran medida del modelo de manejo que se aplique. Así por ejemplo, son necesarias estrategias de manejo que aumenten los contenidos de materia orgánica en el suelo, no favorezcan la compactación y permitan el desarrollo de estructuras edáficas estables. En la medida de lo posible es necesario evitar la realización de labores profundas con volteo de suelo. Este tipo de labores sacan a la superficie materiales subsuperficiales, que con frecuencia son menos fértiles que los más superficiales, dando lugar a un empobrecimiento de la capa superficial del suelo. Por otra parte, el sobrelaboreo altera la estructura del suelo, aumenta su inestabilidad y favorece el sellado de la superficie durante las primeras lluvias que se producen después de realizar la labor.

5. Manejo y erosión hídrica en el secano mediterráneo

De todo lo anterior se deduce que a la hora de establecer las estrategias de manejo más adecuadas para una conservación del suelo mas eficiente en el secano mediterráneo, es preciso identificar cuáles son los factores clave que ejercen una mayor influencia sobre la erosión en estas condiciones agroambientales.

a) La erosión del suelo se concentra en muy pocos episodios de lluvia

Como se ha dicho anteriormente, en el secano mediterráneo la erosión hídrica se produce en episodios de lluvia singulares (Foto 5). De Alba y colaboradores [12] determinaron que más del 87% de las tasas de erosión medias anuales corresponden a la erosión que tiene lugar en episodios extremos de lluvia con períodos de retorno próximos a los 10 años (Tabla 2). Estos autores estimaron en diversos campos de barbecho blanco en la localidad de Rielves (Toledo), tasas de erosión de 351,2 t/ha, que se produjeron durante una tormenta de 90 mm de precipitación que apenas duró 45 min. Mientras que para el mismo manejo de barbecho blanco, la tasa anual media de erosión medida en parcelas experimentales [15] en la Finca Experimental La Higuera (Toledo) [16], durante un período de 16 años (1992/93 a 2007/08), tan solo asciende a 3,04 t/ha.año. Por otro lado, incluso en esta última serie de datos se observa una gran variabilidad interanual (Figura 2). Destaca que en un solo año la tasa de erosión ascendió a 24 t/ha.año, mientras que en 14 de las campañas restantes la tasa no superó 4 t/ha.año y en seis de ellas fue inferior a 1 t/ha.año.



Foto 5 (a y b). Imágenes de una erosión extrema en campos de olivar durante una tormenta de elevada intensidad de lluvia ocurrida en mayo de 2007 en Villarrubia de los Ojos (Ciudad Real).

Tabla 2

Importancia relativa de los efectos erosivos de episodios extremo de lluvia frente a los episodios de moderada y baja intensidad y elevada frecuencia [12] [13]

	Tasas de erosión		Rebajamiento equivalente del nivel de la superficie del suelo
Episodios de moderada y baja intensidad de lluvia ¹	7,3 t/ha.año	15,8%	0,5 mm ($Da=1,5 \text{ g/cm}^3$)
Episodios extremos ²	39,0 t/ha.año	84,2%	2,6 mm ($Da=1,5 \text{ g/cm}^3$)
Tasa total de erosión	46,3 t/ha.año	100%	3,1 mm ($Da=1,5 \text{ g/cm}^3$)

¹ Tasa de erosión media registrada en la parcela de Barbecho blanco durante el período 1993/94-96/97 en la Finca Experimental La Higuera.

² Tasa anual media equivalente considerando el período de retorno de 9 años para el episodio de elevada intensidad registrado en Rielves (1995), (De Alba, et al., 1998).

Se han identificado dos situaciones meteorológicas diferentes en las que tiene lugar la mayor parte de la erosión. La primera, corresponde a las tormentas aisladas de elevada intensidad de lluvia, como el caso de Rielves, que suelen corresponder a células convectivas de desarrollo vertical típicas del verano mediterráneo. La segunda, se trata de situaciones meteorológicas de temporal, generalmente invernales, en las que se encadenan varios días de lluvia consecutivos que dan lugar a precipitaciones acumuladas elevadas, aunque estas no lleguen a desarrollar altas intensidades. En ambos casos, el factor clave desencadenante de la erosión es la acumulación y drenaje del agua de escorrentía sobre la superficie del suelo. En el primer caso, porque la intensidad de lluvia es muy superior a la capacidad de infiltración de la capa superficial del suelo; y en el segundo, porque una vez que el perfil de suelo se satura, la infiltración de agua se reduce drásticamente.

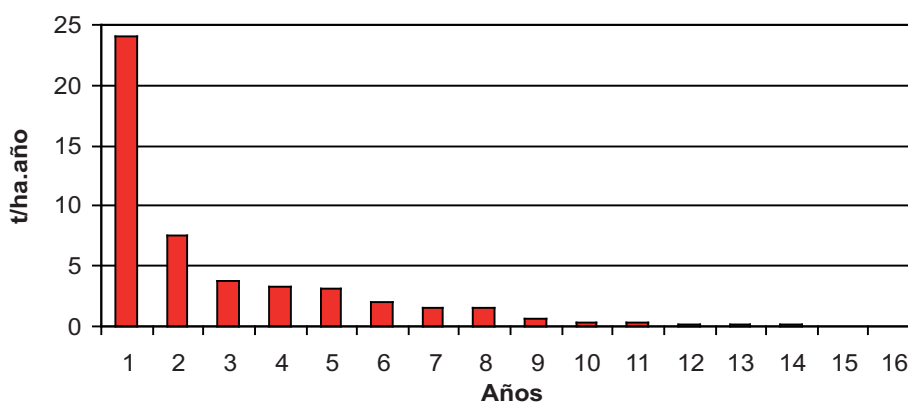


Figura 2. Variabilidad interanual de las pérdidas de suelo medidas en parcelas de erosión de barbecho blanco en la Finca Experimental La Higuera (Toledo), durante un período de 16 años (1992/93 y 2007/08).

b) Efecto de la dirección de laboreo: “la paradoja del laboreo a nivel en el secano mediterráneo”

El laboreo a nivel es una de las prácticas de conservación más básicas y es considerada de obligado cumplimiento a nivel universal. Este es el caso de la normativa española de la Condicionalidad,

Buenas Condiciones Agrarias y Medioambientales, en relación con las ayudas directas en el marco de la PAC (Real Decreto 2352/2004, de 23 de diciembre), en la que se establece como condición exigible para evitar la erosión del suelo, el no labrar en la dirección de la pendiente cuando los campos de cultivos herbáceos o de viñedo tengan una pendiente media superior al 10%.

Se considera evidente que la labranza a nivel favorece la infiltración, ya que la orientación de los surcos de labranza perpendiculares a la pendiente hace que estos actúen a modo de pequeñas presas (Figura 3) que retienen el agua evitando la formación de flujos de escorrentía ladera abajo, y por tanto la erosión. Más aún, es fácil pensar que tras un período no muy largo de tiempo el agua retenida en los surcos termine por infiltrarse en el suelo. Por todo ello, se considera que el laboreo a nivel es óptimo tanto para la prevención de la erosión como para la conservación del agua. Sin embargo, dadas las condiciones agroambientales particulares del secano mediterráneo, el modelo no solo no funciona sino que produce efectos dramáticamente adversos. Los autores han constatado en más de una decena de episodios erosivos extremos ocurridos en diversas localidades de la meseta castellana, que los campos labrados a nivel (o siguiendo direcciones oblicuas a la pendiente) produjeron tasas de erosión mucho más elevadas que los labrados a favor de la pendiente. En todos los casos estudiados, tanto en lluvias de elevada intensidad como situaciones de temporal, el volumen máximo de retención de agua en los surcos se vio claramente superado (Figura 3). Lo que provoca el desbordamiento de algún surco, desencadenando un efecto de rotura en cascada de los surcos situados aguas abajo, con el resultado final del acarreamiento de la ladera (Foto 6). Los regueros así formados tienden a adquirir la dirección de la máxima pendiente dando lugar a la confluencia de unos con otros, y a la formación de redes de drenaje complejas de tipo dendrítico, de gran capacidad de concentración de agua ladera abajo, y por tanto con mayor potencial erosivo. Este efecto se ve acentuado cuando la supuesta labranza a nivel, no se realiza exactamente paralela a las curvas de nivel, de tal modo que el agua fluye lateralmente a lo largo de los surcos hacia las zonas más bajas, donde se concentra, generando el desbordamiento de los mismos. En campo se observa que esto último sucede en la práctica totalidad de casos en los que se ha pretendido cumplir la norma de la Condicionalidad, en los que la labor siempre se ha realizado de forma más o menos oblicua a la pendiente, en parte debido a la dificultad de realizar la labor estrictamente a nivel sobre relieves complejos.

En el caso opuesto, cuando los surcos de labranza presentan una orientación paralela a la pendiente, se optimiza el drenaje de la escorrentía que fluye con facilidad ladera abajo reduciendo su capacidad erosiva. De este modo, la mayoría de las veces la acción erosiva queda limitada a sobreexcavar el surco ya existente. En este caso, los regueros tienden a formar una red de canales paralelos entre sí y el caudal de escorrentía drenado por cada surco se restringe a la lluvia recolectada directamente en el mismo surco aguas arriba, ya que los aportes laterales son mínimos. Lo que contrasta con las redes de morfología de tipo dendrítico que se forman en las laderas no labradas a favor de la pendiente. La Figura 4 muestra dos ejemplos de redes de canales paralelos y dendríticos desarrollados en campos labrados a favor de la pendiente y a nivel, respectivamente.

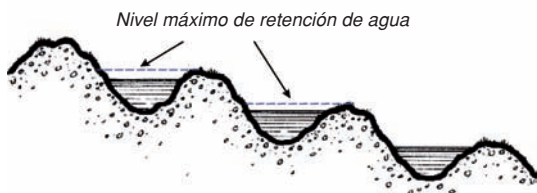


Figura 3. En un campo labrado a nivel, los surcos de labranza actúan a modo de pequeñas presas que retienen el agua de precipitación. Si el volumen acumulado de agua supera la capacidad máxima de retención del surco, este se desborda provocando un efecto de rotura en cascada de surcos situados aguas abajo en la ladera.

Erosión y manejo del suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos

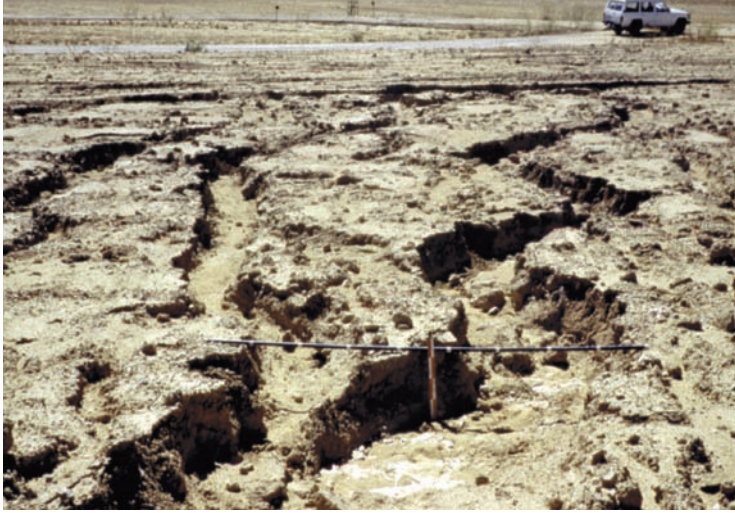


Foto 6. Cárcavas y regueros formados por el desbordamiento de los surcos en un campo labrado a nivel (Rielves 1995, Toledo).

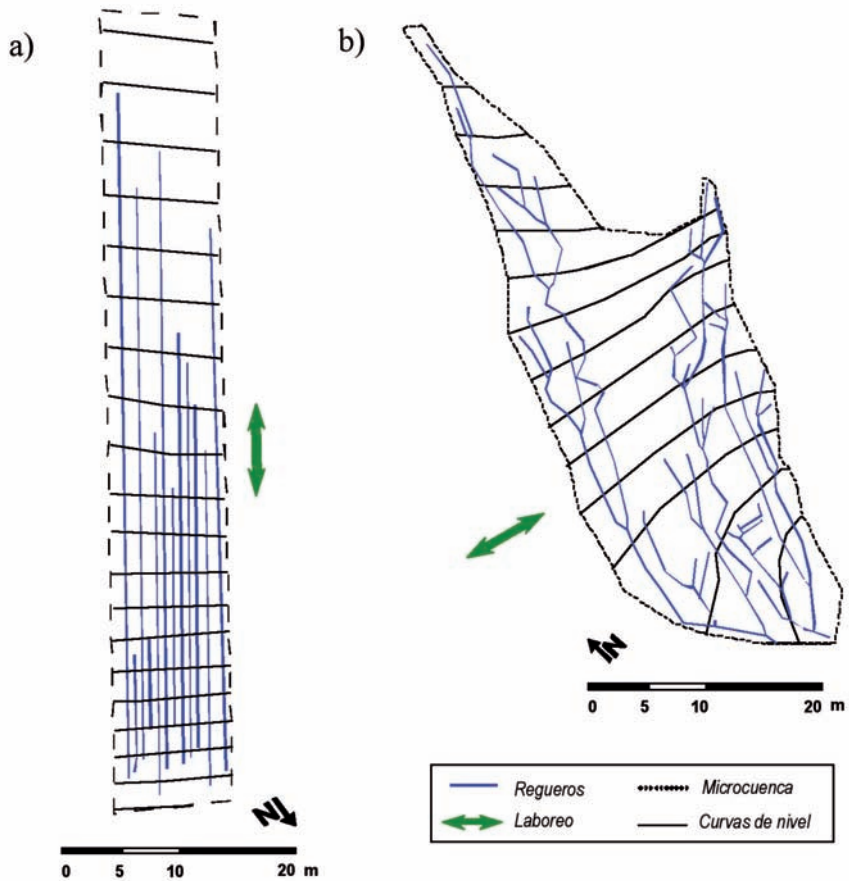


Figura 4. (a) Canales paralelos entre sí confinados en los surcos de labranza en un campo labrado a favor de la pendiente. (b) redes dendríticas de canales desarrollados en un campo labrado siguiendo una dirección más o menos paralela a las curvas de nivel.

Se remarca aún más lo inadecuado de la labranza a nivel en el secano mediterráneo cuando se tiene en cuenta que, como se ha dicho anteriormente, la erosión hídrica ocurre principalmente (más de 84% del total) en episodios de lluvia extrema [2] [12]. En estos, la estrategia de conservación óptima debe ser aquella que facilite el drenaje superficial y evite la concentración de la escorrentía sobre el campo de cultivo.

b) *Una práctica a evitar: hacer marcas de rodada a favor de la pendiente*

Las marcas de rodadura producidas por el tráfico de la maquinaria son situaciones particularmente críticas que favorecen la erosión del suelo (Foto 7). En el plano de rodadura queda una superficie de suelo compactada y de escasa infiltración que tiende a encharcarse con facilidad. De tal modo que la erosión llega a ser máxima cuando la rodadura se orienta a favor de la pendiente. Para evitar la formación de marcas de rodadura se debe evitar el tráfico de maquinaria cuando el suelo presenta exceso de humedad. Como alternativa para eliminar el sellado de la banda de rodadura, se está ensayando con la instalación de una pequeña reja justo detrás de las ruedas motrices del tractor, que produzca una labor superficial de descompactación.



Foto 7. La imagen muestra la formación de regueros a lo largo de las rodadas del tractor (Arroyomolinos, Madrid).

c) *Reducir la intensidad de la labranza*

Un exceso en la frecuencia de realización de operaciones de labranza, sea cual sea el apero utilizado, contribuye de una forma contundente a debilitar la estructura de la capa superficial del suelo. La acción mecánica destruye los agregados de suelo y deshace cualquier estructura generada en torno a los sistemas radiculares de las plantas. Aunque el suelo recién labrado presente una capacidad de infiltración muy alta, si este tiene una estabilidad estructural débil, la acción de las primeras lluvias intensas va a provocar el sellado superficial y una rápida reducción de su permeabilidad. El impacto de las gotas de agua provoca la rotura de los agregados de suelo y la liberación de las partículas más finas, que son redistribuidas por la superficie próxima y rellenan los poros más superficiales. Este proceso provoca un progresivo sellado e impermeabilización de la superficie (Foto 8).



Foto 8. Superficie sellada por el efecto de una lluvia de 65 mm/h de intensidad durante 40 minutos sobre un suelo de textura franco arenosa recién labrado (Finca Experimental La Higuera, Toledo).

Además de la propia acción mecánica, el exceso de laboreo provoca otros efectos adversos,

Erosión y manejo del suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos

entre los que destaca la sobreaireación de la capa superficial del suelo que acelera los procesos de mineralización y la pérdida de materia orgánica. A su vez, la pérdida de ésta repercute negativamente sobre la estabilidad estructural del suelo e intensifica el efecto del sellado superficial descrito anteriormente.

d) *Evitar las labores profundas de volteo*

En la medida de lo posible se deben evitar las labores primarias de vertedera o arado de discos que provocan el volteo del suelo, el cual da lugar a una mezcla e inversión de los horizontes edáficos, sacando a la superficie material originariamente subsuperficial. Generalmente, este material va a presentar unas cualidades de peor calidad respecto al horizonte superficial, en cuanto al contenido de materia orgánica, estabilidad estructural, permeabilidad..., que van a ocasionar un descenso neto de la fertilidad natural de la capa de labranza así como un aumento de su erosionabilidad.

e) *Favorecer y mantener el recubrimiento máximo posible*

Es importante destacar que el recubrimiento del suelo es uno de los factores que más influyen sobre la generación de la escorrentía y la pérdida de suelo por erosión hídrica; al mismo tiempo que es una de las

variables más directamente dependientes del modelo de manejo aplicado. Por ello, como criterio de evaluación de la eficacia de los distintos sistemas de manejo en cuanto a la conservación del suelo, se deben considerar conjuntamente los porcentajes de recubrimiento de suelo a los que dan lugar, ya sea por planta verde o por rastrojos de cultivos anteriores, y la variabilidad estacional de este recubrimiento. Más aún, debe considerarse prioritario maximizar la coincidencia de los momentos de máximo recubrimiento superficial con los períodos de mayor erosividad de la lluvia.

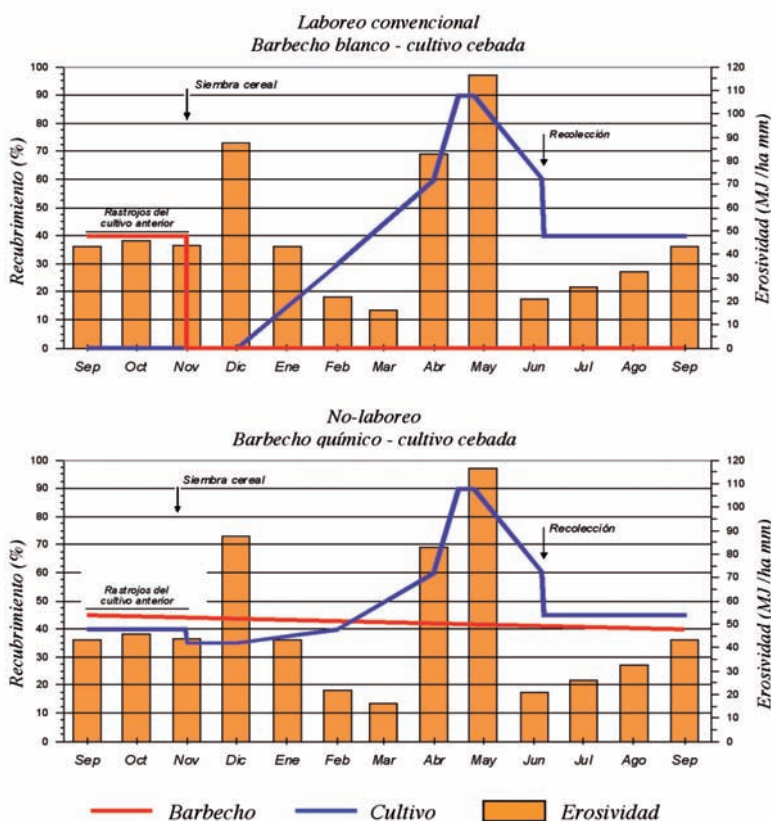


Figura 5. Variación del recubrimiento del suelo (%) para la rotación Cultivo de cereal-Barbecho blanco según el manejo aplicado: (a) Laboreo convencional y (b) No-laboreo. Al fondo en barras se representa la distribución estacional de la erosividad de la lluvia (Finca Experimental La Higuera, Toledo).

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

A modo de ejemplo, en la Figura 5 se presenta la distribución estacional de la erosividad de la lluvia (factor R de la USLE) medida en la Estación Experimental La Higuera (Toledo), y la evolución del recubrimiento para las dos campañas agrícolas de la rotación cereal-barbecho con dos modelos de manejo diferentes: a) Laboreo convencional y b) No-laboreo. La Figura 5 muestra que la erosividad de la lluvia presenta una acusada variabilidad estacional con dos períodos de valores máximos. El primero de ellos, en los meses de primavera como consecuencia de precipitaciones con frecuencia de elevada intensidad. Y el segundo, en los meses de invierno con un pico de máxima erosividad en diciembre, que corresponde a situaciones de temporal con elevados volúmenes de precipitación. Al mismo tiempo, la Figura 5 muestra claramente que el manejo de No-laboreo da lugar a una protección del suelo significativamente mayor que el Laboreo convencional, debido a que con el No-laboreo la práctica totalidad de los rastrojos del cultivo anterior permanece sobre la superficie del suelo. Esto es particularmente claro en el caso del barbecho químico, que mantiene un recubrimiento superior al 40% durante toda la campaña agrícola.

En la Foto 9 se observa como la respuesta erosiva durante un episodio extremo de lluvia es radicalmente diferente en dos campos adyacentes dependiendo del estado de la superficie del suelo. En el campo de la derecha, que se encontraba en barbecho blanco recientemente labrado, la erosión por reguerización y acarreamiento es extrema. Mientras que en el campo de la izquierda, que mantenía la superficie del suelo cubierta por la rastrojera de cereal de la campaña anterior, la erosión apenas es apreciable. Más aún, en los campos no labrados situados en la parte alta de la ladera, que presentan vegetación espontánea de porte arbustivo y herbáceo, los rasgos erosivos son inexistentes.



Foto 9. Influencia del estado del recubrimiento del suelo sobre la respuesta erosiva durante un episodio de lluvia de elevada intensidad (Paracuellos del Jarama, Madrid).

f) *El barbecho blanco debe ser una práctica a evitar en todos los casos*

El barbecho blanco, que consiste en mantener la superficie del suelo desprovista de cualquier cubierta vegetal durante toda una campaña agrícola mediante la realización de diversas operaciones de laboreo, representa el caso más desfavorable de manejo frente a la erosión, y da lugar a las pérdidas de suelo más extremas [12] [14] (Fotos 1, 4, 6, 9). De Alba y colaboradores, han demostrado que otros modelos alternativos de manejo del barbecho reducen de forma significativa las tasas de erosión hídrica del barbecho blanco. En parcelas de erosión en la Finca Experimental La Higuera durante el período 2003-07, estos autores obtuvieron reducciones de la tasa de erosión del barbecho blanco de un 50% para el barbecho tardío, un 60% para el barbecho sembrado o barbecho verde, y en casi el 100% para el barbecho químico (No-laboreo).

Es de destacar el caso del barbecho tardío que consigue reducir a la mitad la tasa de erosión con tan solo retrasar las labores de alzada de la rastrojera hasta la primavera. El beneficio de este manejo del barbecho reside en que durante el máximo invernal de erosividad de lluvia se conserva la mayor cantidad posible de recubrimiento de la rastrojera del cultivo anterior.

6. Erosión mecánica

La redistribución del suelo por arrastre mecánico durante las operaciones agrícolas de laboreo produce a largo plazo una intensa transformación del paisaje y degradación de los suelos [17]. El proceso es conocido en la literatura como erosión mecánica o erosión por laboreo (*tillage erosion*). Su importancia se pone de manifiesto al considerar que las prácticas de laboreo suponen la movilización de una capa de suelo de espesor más o menos uniforme, generalmente de entre 15 y 40 cm, cuya extensión abarca toda la superficie cultivada. A modo de ejemplo, una única pasada de vertedera (Foto 10) con una profundidad media de labor de 30 cm da lugar a la movilización de un total de 4.050 toneladas de suelo por hectárea labrada (considerando una densidad aparente del suelo de 1,35 g/cm³); si la profundidad de laboreo fuera de 40 cm, la cantidad total de suelo movilizado ascendería a 5.400 t/ha. Cuando los campos de cultivo se sitúan en superficies llanas, las labores con direcciones alternantes en años sucesivos producen un movimiento del suelo de tipo errático sin que resulte desplazamiento neto alguno. En un punto cualquiera del terreno, las pérdidas de suelo ocurridas durante una labor son compensadas con las labores posteriores. Sin embargo, en campos situados en laderas alomadas la movilización del suelo no resulta equivalente en todas las direcciones, sino que guarda una estrecha relación con la pendiente del terreno. El arrastre del suelo ladera arriba provocado por un pase de labor realizado en contra de la pendiente, no resulta suficiente para compensar la pérdida sufrida como resultado de esa misma labor hecha a favor de la pendiente, lo que produce una pérdida neta de suelo en las zonas altas de la ladera.

Los efectos acumulados de la redistribución del suelo ocasionada por las prácticas agrícolas realizadas en el pasado han dado lugar a una drástica transformación de la morfología y relieve de las laderas cultivadas, así como de la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos. La larga historia de labranza de los campos ha dejado una serie de huellas y rasgos que son fácilmente reconocibles en los paisajes actuales. El estudio de esos rasgos permite determinar la intensidad a la que

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO



Foto 10 (a y b). La labranza con el apero de vertedera es una de las labores más básicas y extendidas del manejo convencional del secano mediterráneo.

opera la erosión mecánica, la magnitud de los efectos provocados y sus implicaciones edafológicas, agronómicas y sobre la transformación del paisaje

a) Remodelado del paisaje: erosión y nivelación del relieve

La redistribución del suelo por el laboreo produce una progresiva erosión y rebajamiento del nivel de la superficie del suelo en las zonas de morfología convexa y tramos altos de las laderas; mientras que da lugar a la acumulación de suelo y relleno de las zonas de morfología cóncava y en los tramos bajos de las laderas (Figura 6). Por el contrario, en sectores de ladera de perfil rectilíneo tienen lugar elevadas tasas de transporte de suelo, pero sin que se produzcan balances netos significativos de variación del nivel de la superficie; de tal modo que la capa de labranza se comporta como una cinta transportadora de suelo, que lo transporta desde las partes altas de la ladera a las partes bajas. La intensidad del proceso de transporte guarda relación directa con la pendiente local máxima, pero el balance final de pérdida o acumulación de suelo depende de la curvatura y morfología del terreno. Como resultado a medio y largo plazo, la redistribución mecánica del suelo hace que el relieve original resulte progresivamente suavizado y nivelado [18] [19].

b) Modificación de la morfología de laderas

El patrón general de redistribución mecánica del suelo muestra que este es transportado desde las partes altas de las laderas y zonas de morfología convexa, para ser acumulado en la base de las

laderas y rellenar vaguadas y depresiones localizadas en el interior de los campos. Los bordes y lindes de los campos de cultivo representan barreras físicas que interrumpen este transporte del suelo, dado que los tractores no realizan el laboreo atravesando los límites del campo. En consecuencia, el movimiento y la redistribución del suelo quedan restringidos al interior de los límites de cada campo. Cuando la linde entre campos de cultivo se sitúa en posiciones intermedias en la

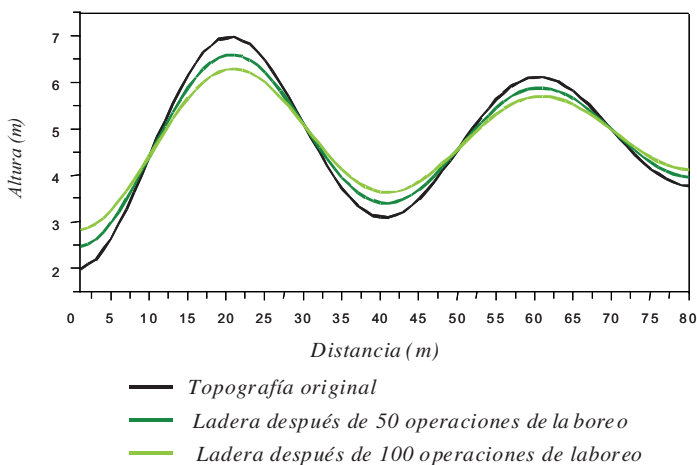


Figura 6. Erosión y nivelación progresivas de una ladera agrícola como resultado de la redistribución mecánica del suelo por las prácticas de laboreo. Se presentan los efectos acumulados después de simular 50 y 100 operaciones de laboreo con el apero de vertedera, aplicando el modelo de simulación SORET (Soil Redistribution by Tillage; [25]).

ladera, en ambos lados de las lindes los balances de pérdida o acumulación de suelo resultan ser opuestos: pérdida neta de suelo en la parte inferior del borde del campo y acumulación de suelo en la parte alta. Dichos balances opuestos de redistribución de suelo dan lugar a la rotura del perfil de ladera y a la formación de un escalón o talud paralelo a la linde (Foto 11). El número, posición y distribución en el paisaje de las lindes entre campos determinan la intensidad y los patrones espaciales de redistribución de suelo, así como la morfología final de los perfiles de las laderas [20].

Como se ha dicho anteriormente, las lindes son barreras que interrumpen el transporte de suelo ladera abajo, dando lugar a la formación de las anomalías topográficas que constituyen los taludes en posiciones intermedias de ladera. De tal modo que la aparición de estas anomalías hace visible el proceso de transporte de suelo. Sin embargo, en laderas que son labradas de forma continua desde



Foto 11 (a y b). Taludes formados en las lindes entre campos de cultivo como consecuencia del efecto acumulado de la redistribución de suelo por el laboreo (Aljalvir, Madrid).

 AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

la loma a su base, sin la existencia de lindes intermedias, el transporte de suelo ladera abajo pasa desapercibido pero sigue operativo con la misma intensidad (Foto 12); manifestándose tan solo en los límites superior e inferior de los campos, donde visualizaremos la formación de taludes por excavación y acumulación de material, respectivamente.



Foto 12 (a y b). La redistribución del suelo por la labranza construye taludes en las lindes entre campos. Sin embargo éstos no tienen continuidad lateral y desaparecen en los campos colindantes en los que la labor se hace de forma continua a lo largo de la ladera.

c) *Aumento de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo*

La erosión mecánica da lugar al truncamiento de los perfiles edáficos situados en las hombreras y partes altas de las laderas, como resultado de la pérdida total o parcial de los horizontes superficiales del suelo (Foto 2). Lo opuesto tiene lugar en las depresiones y partes bajas de las laderas, donde se produce el engrosamiento y enterramiento de los horizontes superficiales debido a la acumulación neta de material sobre el perfil original. En los tramos de ladera de morfología rectilínea, donde el proceso predominante es el transporte de suelo a lo largo de la capa de labranza, los horizontes superficiales que forman dicha capa resultan transportados ladera abajo y substituidos por material de suelo procedente de las partes altas de la ladera. Cuando el material transportado procede de perfiles edáficos previamente truncados, y por tanto el suelo transportado procede de horizontes que originariamente fueron subsuperficiales pero que quedaron expuestos en superficie, puede dar lugar a la formación de falsos suelos truncados y perfiles edáficos en los que se presentan secuencias invertidas de horizontes genéticos de suelo [21] [22].

A la hora de interpretar el origen de la variabilidad actual de los suelos en el paisaje se debe recurrir a explicaciones que combinen la acción de los procesos de erosión hídrica y mecánica. No obstante, las evidencias revelan una predominancia del transporte mecánico del suelo a la hora de justificar la presencia de perfiles edáficos truncados en las hombreras y partes altas de las laderas en paisajes alomados. Los modelos existentes para la erosión hídrica predicen un aumento de la erosión conforme aumenta la longitud de la ladera (distancia desde la divisoria de aguas) y la pendiente del terreno, alcanzando la máxima intensidad en el sector intermedio de ladera. Sin embargo, los modelos de redistribución de suelo por laboreo, predicen pérdidas máximas de suelo en las partes altas de la ladera donde la distancia a la divisoria y la pendiente son prácticamente nulas.

d) *Variabilidad de la productividad agrícola*

El efecto de la redistribución del suelo sobre la productividad de los campos de cultivo va a depender de la naturaleza y fertilidad de los distintos horizontes del perfil de suelo, así como de su variabilidad espacial. No obstante, como tendencia general se ha observado que el aumento de la variabilidad de las propiedades del suelo producido por el laboreo, a su vez, da lugar a un aumento significativo de la variabilidad de la productividad [21] [23] [24].

e) *Influencia de los patrones de laboreo*

Para una más fácil visualización del efecto de aplicar distintos patrones de laboreo, la Figura 7 presenta los mapas de redistribución de suelo obtenidos tras simular la aplicación de 25 secuencias de laboreo sobre el Modelo Digital del Terreno (MDT) de un campo de cultivo de relieve alomado (Figura 8) [25]. Como patrones de laboreo se simuló los tres casos que con mayor frecuencia se aplican. En dos de los patrones, el sentido de la marcha del tractor se invierte en operaciones consecutivas siendo: (1) laboreo paralelo a la dirección de la pendiente (cuesta arriba y cuesta abajo), (2) laboreo en contorno (volteando el suelo lateralmente cuesta arriba y cuesta abajo); y en el tercero, (3) el laboreo es siempre a favor de la máxima pendiente (cuesta abajo). En todos los casos la profundidad media de laboreo fue de 0,3 m. Con el laboreo repetido cuesta abajo, un 62% de la superficie total presentó un rebajamiento medio de 0,25 m, y en el 38% de la superficie restante la acumulación media tuvo un espesor de 0,40 m. Para los patrones de laboreo en contorno y paralelo a la pendiente, los rebajamientos medios fueron de 0,12 m (59% de la superficie) y 0,11 m (67%) respectivamente; y las acumulaciones presentaron espesores medios de 0,17 m (41%) y 0,22 m (33%) respectivamente.

f) *Tasas de erosión mecánica y erosión hídrica*

Para poder comparar la intensidad de ambos procesos, en la Tabla 3 se presentan las pérdidas de suelo por erosión hídrica registradas en parcelas experimentales y las estimadas de erosión mecánica para parcelas de iguales dimensiones y tres patrones de laboreo diferentes. Se observan diferencias muy elevadas entre las tasas de erosión obtenidas con los dos patrones de laboreo que alternan la dirección de la labor en pases consecutivos, respecto a las del patrón de laboreo repetido a favor de la pendiente. En todos los casos el laboreo en contorno presenta las tasas más reducidas mientras que los valores máximos corresponden al laboreo repetido a favor de la pendiente. Así por ejemplo, para una parcela de pendiente media del 20% (límite máximo para realizar la labor en contorno), las tasas medias por pase de labor ascienden a 13,2 t/ha para el laboreo en contorno, a 15,9 t/ha para el laboreo según la pendiente y a más de 66 t/ha para el laboreo a favor de la pendiente (Tabla 3). Cuando la inclinación de la ladera supera una pendiente del 25%, el único patrón de laboreo posible de ejecutar es siempre cuesta abajo, por lo que las pérdidas de suelo son extremas. Así, para la parcela tipo se estiman pérdidas de suelo por pase de labor de 74,5 t/ha para la pendiente del 30% y de 82,6 t/ha para la de 40%. Por otro lado, la tasa anual media de erosión hídrica se refiere a la medida en la parcela de erosión de barbecho blanco de la Figura 5, que tiene una pendiente media del 9%. En este caso, mientras que la tasa de erosión hídrica es de 3,0 t/ha.año, la tasa de erosión mecánica para un único pase de labor varía entre 5,9 t/ha con el laboreo en contorno y 57,4 t/ha

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

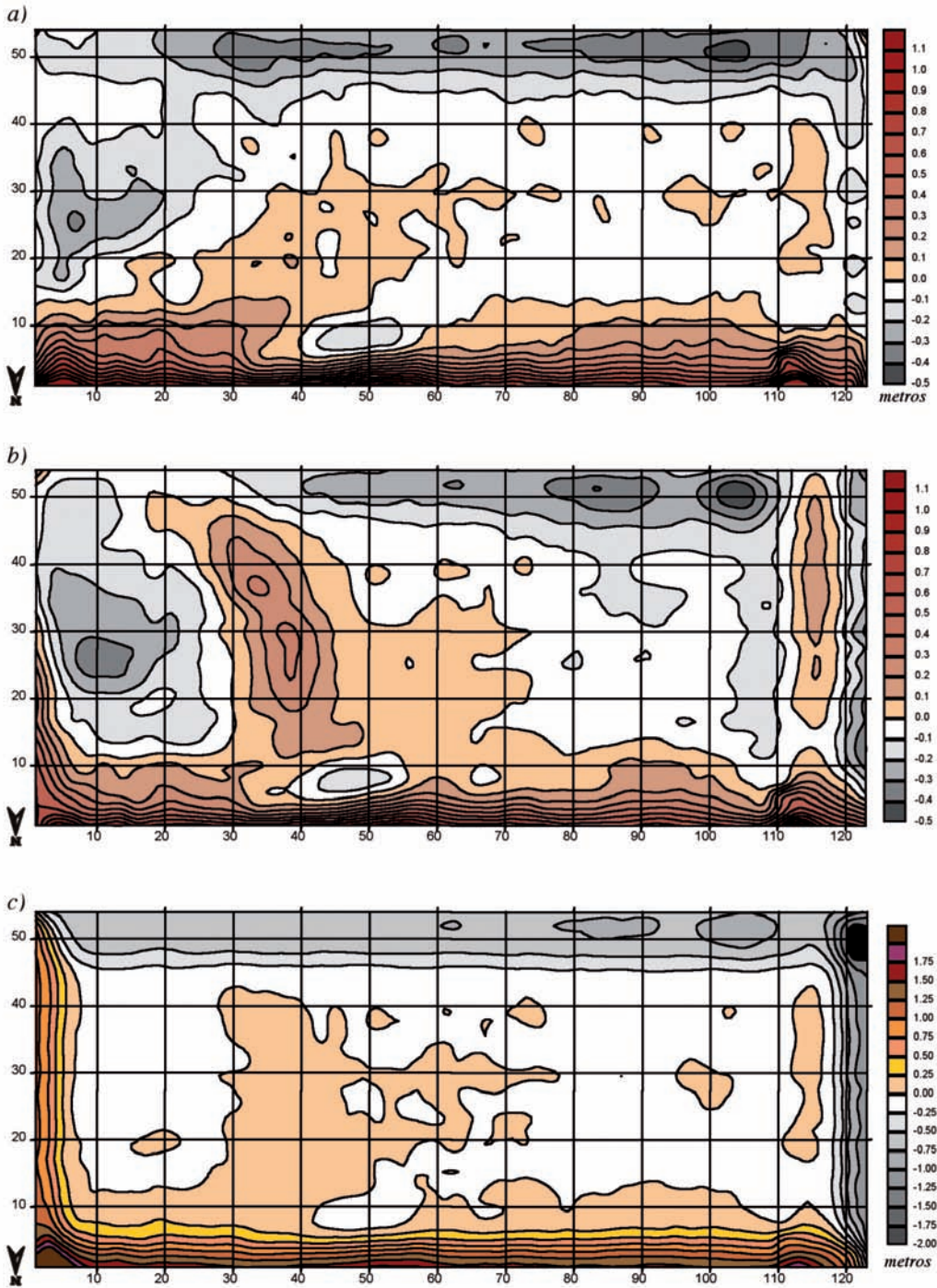


Figura 7. Mapas de redistribución de suelo obtenidos después de simular la aplicación de 25 secuencias de laboreo sobre el campo de la figura 10, siguiendo tres patrones de laboreo diferentes: a) Laboreo según la pendiente hacia arriba y abajo, alternativamente; b) Laboreo a nivel, alternando el volteo lateral arriba y abajo; y c) Laboreo repetido a favor de la pendiente. La simulación se ha hecho para labranza con un apero de vertedera de mano derecha, con el modelo SORET (Soil Redistribution by Tillage[25]).

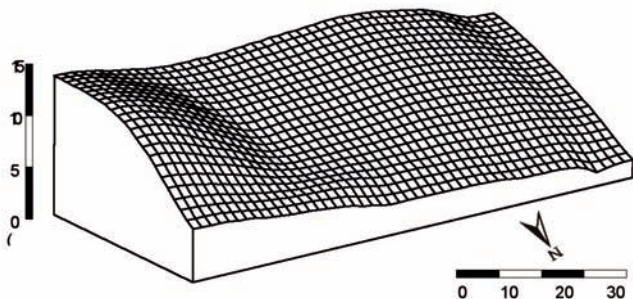


Figura 8. Modelo 3D del campo de la figura 9, tiene una extensión total de 6.642 m², un desnivel máximo de 12,5 m y pendientes media y máxima del 17% y 40%, respectivamente.

para el laboreo repetido a favor de la pendiente. Es decir, la tasa de erosión mecánica puede llegar a ser de un orden de magnitud superior a la tasa anual media de erosión hídrica. La elevada intensidad del proceso de erosión por laboreo se percibe más claramente cuando se considera que las tasas de erosión de la Tabla 3, deben ser multiplicadas por

el número total de pases aplicados al año. De hecho, en el caso de los manejos convencionales es frecuente que se realicen al menos dos labores por campaña, en especial en los barbechos.

Tabla 3

Comparativa entre las tasas de erosión hídrica y mecánica estimadas para parcelas de dimensiones constantes y pendientes diferentes, labradas según tres patrones de laboreo diferentes [26]

	Pendiente del terreno				
	9%	20%	25%	30%	40%
Tasas de erosión mecánica (t/ha por pase de labor)					
Laboreo a nivel	5,9	13,2	–	–	–
Laboreo en la dirección de la pendiente	7,2	15,9	19,8	–	–
Laboreo a favor de la pendiente	57,4	66,3	70,4	74,5	82,6
Tasa anual media de erosión hídrica (t/ha.año)					
Parcelas experimentales: Finca La Higuera (1992/93-2007/08)	3,0	–	–	–	–

g) Reducir la erosión mecánica, una necesidad acuciante

De todo lo anterior se concluye que la erosión mecánica es el proceso predominante responsable de la degradación física de los suelos del secano mediterráneo. Las tasas de erosión mecánica con frecuencia superan en un orden de magnitud las tasas consideradas como máximas tolerables, siempre inferiores a 11,2 t/ha.año (Tabla 1).

En consecuencia, a la hora de diseñar los manejos que sean compatibles con la conservación del suelo frente a la erosión mecánica se deben considerar como prioritarios los siguientes cuatro objetivos:

- 1) Reducir al mínimo posible la intensidad de la labranza: frecuencia y profundidad de laboreo.
- 2) Evitar las labores con volteo de suelo de vertedera y de arado de discos.

- 3) Priorizar las labores verticales que minimicen la movilización de suelo.
- 4) Observar cual es el efecto de redistribución de suelo producido por nuestros aperos y elegir el patrón (dirección o combinación de direcciones) de laboreo que reduzca el desplazamiento neto de suelo ladera abajo.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de diversos proyectos de investigación por el Servicio de Investigación Agraria, Consejería de Agricultura de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, del proyecto MANERO con Ref. AGL2004-00650 del Plan Nacional de I+D+I 2004-07 (MEC) y del Ministerio de Medio Ambiente en el marco de la RESEL del Programa de Acción Nacional contra la Desertificación.

Referencias

- [1] Duchaufour, P. 1987. Manual de Edafología. Masson. pp. 214.
- [2] De Alba, S.; Benito, G.; Lacasta, C.; Pérez-González, A. 2003. Erosión hídrica en campos de agricultura extensiva de clima mediterráneo. Influencia del manejo del suelo en Castilla-La Mancha. Edafología, Soc. Española Ciencia del Suelo (SECS), 10-3: 103-113.
- [3] FAO, 1983. Mantengamos viva la tierra: causas y remedios de la erosión del suelo. FAO. Roma, pp. 77.
- [4] Schmidt, B. L.; Allmaras, R. R.; Mannering, J. V. y Papendick, R. I. 1982. Determinants of soil loss tolerance. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, pp. 153.
- [5] SCS, 1973. Citado en McCormack, D. E.; Young, K. K. y Kimberlin, L. W. 1982. Current criteria for determining soil loss tolerance. En B. L. Schmidt, R. R. Allmaras, J. V. Mannering y R. I. Papendick. (Ed.). Determinants of soil loss tolerance. ASA Publication, nº 45. American Society of Agronomy-Soil Science of America: 95-112.
- [6] Moreira, J. M. 1991. Capacidad de uso y erosión de suelos. Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Sevilla, pp. 446.
- [7] Gallardo Díaz, J.; Ortega Martos, A. y Rodríguez Rastrero, M. 1990. Erosión en suelos agrícolas, ganaderos y forestales. En S. De Alba; J. Romea, D. Orueta y J. Mondejar. (Ed.). Hombre y Medio Ambiente. Ayuntamiento de Alcobendas, pp. 365-373.
- [8] FAO, 1989. Leyenda del mapa mundial de suelos de la FAO-UNESCO (Versión en castellano de: FAO, 1988. FAO-UNESCO Soil Map of the World: Revised Legend. FAO World Soil Resources Reports, nº 60: 119, Rome). Soc. Esp. Ciencia del Suelo. Santiago de Compostela, pp. 201.
- [9] MOPT, 1992. Medio Ambiente en España 1990-91. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid.
- [10] Wischmeier, W. H. y Smith D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. Agriculture Handbook, nº 537. United States Department of Agriculture. Washington.
- [11] MOPT, 1991. Medio Ambiente en España 1990-91. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid.

Erosión y manejo del suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos

- [12] De Alba, S.; Benito, G. y Pérez González, A. 1998. Erosión de suelo en episodios de lluvia de elevada intensidad versus episodios de moderada y baja intensidad y elevada frecuencia en ambientes semiáridos. En A. Gómez Ortiz y F. Salvador Franch. (Ed.). Investigaciones recientes de la Geomorfología española. Sociedad Española de Geomorfología. Logroño, pp. 483-492.
- [13] De Alba, S.; Benito, G. y Pérez González, A. 2003. Degradación del suelo por erosión hídrica en campos de agricultura extensiva en Castilla-La Mancha. Naturaleza en la Provincia de Toledo. Dip. Prov. de Toledo, pp. 469-492.
- [14] De Alba, S.; Benito, G. y Pérez González, A. 1999. El barbecho convencional, una práctica convencional que intensifica la degradación del suelo por erosión hídrica en los sistemas agrícolas de ambientes semiáridos. Congreso Europeo de Agricultura Sostenible en Ambientes Mediterráneos. Escuela de Ingenierías Agrarias de la Universidad de Extremadura-Junta de Extremadura, pp. 262-266.
- [15] De Alba, S. 1997. Metodologías para el estudio de la erosión en parcelas experimentales: relaciones erosión-desertificación a escala de detalle. En J. Ibáñez; B. L. Valero Garcés y C. Machado (Eds.). El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación. CCMA-CSIC, Geofoma Ediciones. Logroño, pp. 259-293.
- [16] De Alba, S.; Alcázar, M.; Lacasta, C. y Benito, G. 2009. Water Erosion on Agricultural Lands in a Mediterranean Semiarid Climate in Central Spain. In a. Faz Cano, A. R. Mermut; J. M. Arocena, R. Ortiz (Editors). Land Degradation and Rehabilitation. Dryland Ecosystems. Catena Verlag, Advances in GeoEcology, 40: 27-36.
- [17] De Alba, S. 2008. Erosión y redistribución mecánica del suelo (Tillage erosion): Transformación de los paisajes agrícolas. En A. Cerdá (Ed.) Erosión y degradación del suelo agrícola en España. Universidad de Valencia. Cátedra de Divulgación Científica, Universidad de Valencia, pp. 149-182.
- [18] Govers, G.; Lobb, D. A., y Quine, T. A. (1999). Tillage erosion and translocation: emergence of a new paradigm in soil erosion research. Soil & Tillage Research, 51: 167-174.
- [19] De Alba, S.; Torri, D.; Borselli, L. y Lindstrom, M. 2003. Degradación del suelo y modificación de los paisajes agrícolas por erosión mecánica (Tillage erosion). Edafología, Soc. Española Ciencia del Suelo (SECS), 10-3: 93-101.
- [20] De Alba, 2002. Implicaciones Geomorfológicas de la redistribución y erosión del suelo por el laboreo (Tillage erosion). In A. Pérez-González, J. Vegas & M. J. Machado (eds). "Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio". Soc. Española Geomorfología-ITGE, Madrid, pp. 219-225.
- [21] De Alba, S. 2002. Redistribución del suelo por las prácticas de laboreo: Erosión por Laboreo. Edafología, Soc. Española Ciencia del Suelo (SECS), 7-2: 75-89.
- [22] De Alba, S.; Lindstrom, M.; Schumacher, T. E. y Malo, D. D. 2004. Soil landscape evolution due to soil redistribution by tillage: A new conceptual model of soil catena evolution in agricultural landscapes. Catena, 58: 77-100.
- [23] Schumacher, T. E.; Lindstrom, M. J.; Schumacher, J. A., y Lemme, G. D. (1999). Modeling spatial variation in productivity due to tillage and water erosion. J. Soil Till. Res., 51: 331-339.
- [24] Torri, D.; Borselli, L.; Calzolari, C.; Yañez, M. y Salvador Sanchis, M. P. 2002. Soil erosion, land use, soil quality and soil functions: Effects of erosion. In Rubio, J. L.; Morgan, R. P. C., Asins, S., Andreu, V.(eds), Man an soil at the third millennium. Geofoma Ediciones-CIDE, pp. 131-148.

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

- [25] De Alba, S. 2003. Simulating long-term soil redistribution generated by different patterns of mouldboard ploughing in landscapes of complex topography. *Soil & Tillage Research*, 71: 71-86.
- [26] De Alba, S. 1998. Redistribución y erosión del suelo por las prácticas agrícolas de laboreo en laderas cultivadas. En A. Gómez Ortiz y F. Salvador Franch (Ed.). *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*. Sociedad Española de Geomorfología. Logroño, pp. 471-482.

LA FERTILIZACIÓN ORGÁNICA EN SISTEMAS EXTENSIVOS DE SECANO

ORGANIC FERTILIZATION IN EXTENSIVE RAINFED SYSTEMS

Juana Labrador Moreno

Escuela de Ingenierías Agrarias. Universidad de Extremadura
labrador@unex.es

Resumen

La clave para mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas de secano en las regiones semiáridas es la fertilidad del suelo, cuyo componente vital es la materia orgánica. En este contexto y dentro de las técnicas que favorecen los objetivos de la producción ecológica, este capítulo persigue contribuir al conocimiento de las pautas para el manejo de la fertilidad del suelo en agrosistemas extensivos de secano, a través del conocimiento y la práctica de la fertilización orgánica.

Palabras clave: *Materia orgánica, fertilidad, fertilización orgánica, agrosistemas extensivos.*

Abstract

The key to improving the sustainability of rainfed farming systems in semiarid regions is soil fertility, whose vital component is the organic matter content. In this context and considering the techniques that promote the goals of organic production, this chapter aims to contribute to the knowledge of the guidelines for the management of soil fertility in extensive rainfed agrosystems, through the knowledge and the practice of organic fertilization.

Key words: *Organic matter, fertility, organic fertilization, extensive agrosystems.*

La enorme importancia que los sistemas extensivos de secano, suponen para la conservación del medio y la vertebración del territorio y las ventajas que su gestión óptima podrían representar para el sector agrícola y ganadero español, teniendo en cuenta las futuras estrategias de la UE, en cuanto a los objetivos sobre Agricultura, Medio Ambiente y Desarrollo Rural, no se ven reflejadas en actuaciones específicas para su potenciación y conservación. Por el contrario, en la actualidad, estos modelos de gestión ofrecen un escenario de gran incertidumbre –socioeconómica y agroambiental–.

A nivel agroambiental los sistemas extensivos de secano manejados desde la agricultura convencional, presentan graves riesgos de desertificación con altas tasas de erosión y disminución alarmante del contenido en materia orgánica, debido al escaso aporte y a la separación de la producción agrícola y ga-

 AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

nadera; también tienen implicaciones directas en la contaminación de las aguas subterráneas, por lixiviación de elementos fertilizantes y por herbicidas; y muestran una escasa biodiversidad como consecuencia de la eliminación o modificación de sus hábitat y por una peligrosa homogeneización varietal.

A nivel socioeconómico el sector está inmerso en una profunda falta de competitividad¹; si la intensificación ha supuesto para la mayoría de los agrosistemas, que los costes de producción superen a los ingresos por cosecha² en sistemas extensivos de secano, el balance es claramente negativo. En la actualidad, la mayor parte del sector está subsistiendo gracias a las ayudas de la Política Agraria Comunitaria —más del 50% de las rentas agrarias netas de una explotación de secano, proceden de las subvenciones comunitarias (Mate, 1999)— que han suavizado factores como falta de créditos, disminución de precios pagados en origen, disminución de las superficies sembradas, ascenso en las tasas de desempleo agrario, etc —Agroindicadores MARM, 2010—. Algunas de las medidas procedentes de la PAC, diseñadas ignorando las singularidades de la agricultura de secano extensivo —como la retirada de tierras de la producción— han tenido enormes repercusiones³ económicas y ambientales.

Sin lugar a dudas, la agricultura extensiva de secano debe ser recuperada y “puesta en valor”, reconvirtiendo los factores limitantes en señas de identidad cultural, estabilidad ecológica y calidad de vida en el ámbito rural [1]. Y es aquí donde las nuevas Políticas de Desarrollo Rural y las Políticas Agrarias y Ambientales Nacionales e Internacionales deben trabajar al unísono para el diseño y puesta en marcha de medidas que favorezcan y que sirvan de estímulo, consolidación y expansión al enfoque más acorde con el objetivo de la multifuncionalidad agraria.

La Agroecología, “disciplina científica que propone un enfoque de la agricultura más ligado al medio ambiente y más sensible socialmente, centrado no solo en la producción sino en la estabilidad ecológica del sistema de producción”, ha demostrado ser capaz de proporcionar, las bases científicas y los argumentos técnicos capaces de generar alternativas más perdurables de diseño y manejo de los sistemas productivos, proporcionando estrategias de uso agropecuario y silvícola del territorio de aplicación local, basadas en el saber tradicional y desde la innovación tecnológica procedente del conocimiento científico multidisciplinar.

Los esfuerzos de los investigadores y técnicos en agroecología se centran hoy en priorizar la investigación aplicada al desarrollo de modelos de gestión agropecuaria Ecológica. Estos modelos, ampliamente exitosos en lo agronómico, en lo económico y en lo social generan además, toda una gama de “servicios ambientales” en ambiente mediterráneo que deberían ser compensados en un futuro próximo.

Es en este contexto ambiental, cómo ya se ha demostrado, es donde la agricultura ecológica —Tabla 1— puede ser la mejor alternativa para la sostenibilidad de estos agrosistemas, ya que puede mantener una productividad de calidad acorde con la capacidad del suelo de cultivo; ser económica-

¹ Las estadísticas del MARM correspondientes a febrero del 2010 nos muestran como la depreciación del sector cerealista ha sido de un 16,96% interanual; la del sector vitivinícola del 31,79%, la de las leguminosas un 13,92%, la del aceite de oliva un 10,91%.

² La agricultura cerealista depende intensamente del consumo de energía no renovable, a través de los fertilizantes (50-60%), combustibles fósiles (25-40%), productos fitosanitarios (8%) y maquinaria (2%) (Fernández-Quintanilla, 1999).

³ Añadir como dato relevante que la condicionalidad de la PAC, para los agrosistemas, extensivos en vez de un estímulo al equilibrio producción-conservación, está siendo el aliciente para que una gran parte del territorio quede sin cultivar en un futuro cercano.

mente viable y desde el punto de vista ambiental aumentar la biodiversidad, la materia orgánica y facilitar las condiciones para un óptimo secuestro de carbono lo que implica la mitigación del cambio climático, la disminución de la erosión y la contaminación del suelo y la óptima gestión del agua [2, 3].

Tabla 1

Normas para la producción vegetal en agricultura ecológica

<p>Título III</p> <p>Art. 12. Normas de producción vegetal</p> <p>Reglamento 834/2007</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▲ la producción ecológica recurrirá a las prácticas de labranza y cultivo que mantengan o incrementen la materia orgánica del suelo, refuercen la estabilidad y la biodiversidad edáficas. ▲ la fertilidad y la actividad biológica del suelo deberán ser mantenidas o incrementadas mediante la rotación plurianual de cultivos que comprenda las leguminosas y otros abonos verdes y la aplicación de estiércol o materia orgánica, ambos de preferencia compostados, de producción ecológica. ▲ está permitido el uso de preparados biodinámicos. ▲ asimismo, solamente podrán utilizarse fertilizantes y acondicionadores del suelo que hayan sido autorizados para su utilización en la producción ecológica de conformidad con el artículo 16. ▲ no se utilizarán fertilizantes minerales nitrogenados. ▲ todas las técnicas de producción utilizadas prevendrán o minimizarán cualquier contribución a la contaminación del medio ambiente. ▲ la prevención de daños causados por plagas, enfermedades y malas hierbas se basará fundamentalmente en la protección de enemigos naturales, la elección de especies y variedades, la rotación de cultivos, las técnicas de cultivo y los procesos térmicos. ▲ en caso de que se haya constatado la existencia de una amenaza para una cosecha, solo podrán utilizarse productos fitosanitarios que hayan sido autorizados (...) de conformidad con el artículo 16. ▲ para la producción de productos distintos de las semillas y los materiales de reproducción vegetativa, solo podrán utilizarse semillas y materiales de reproducción producidos ecológicamente (...). ▲ solo se utilizarán productos de limpieza y desinfección en la producción vegetal en caso de que hayan sido autorizados para su utilización en la producción ecológica de conformidad con el artículo 16.
<p>Capítulo I.</p> <p>Artículo 3. Gestión y fertilización del suelo</p> <p>Reglamento 889/2008</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Cuando las necesidades nutricionales de las plantas no puedan satisfacerse mediante las medidas contempladas en el artículo 12 (...) del Reglamento (CE) no 834/2007, solo podrán utilizarse en la producción ecológica los fertilizantes y acondicionadores del suelo mencionados en el anexo I del presente Reglamento y únicamente si son necesarios (...). ▲ La cantidad total de estiércol ganadero, definida en la Directiva 91/676/CEE del Consejo relativa a la "Protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura", extendida en la explotación no podrá exceder de 170 kilogramos de nitrógeno anuales por hectárea de superficie agrícola empleada (...). ▲ Las explotaciones dedicadas a la producción ecológica podrán establecer acuerdos de cooperación escritos exclusivamente con otras explotaciones y empresas que cumplan las normas de producción ecológicas con la intención de extender estiércol. ▲ Podrán utilizarse las preparaciones adecuadas de microorganismos para mejorar las condiciones generales del suelo o la disponibilidad de nutrientes en el suelo o en los cultivos. ▲ Para la activación del compost podrán utilizarse preparados adecuados a base de plantas o preparados de microorganismos.
<p>Artículo 5</p> <p>Gestión de plagas, enfermedades y malas hierbas</p> <p>Reglamento 889/2008</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Cuando las plantas no puedan protegerse adecuadamente de las plagas y enfermedades mediante las medidas contempladas en el artículo 12 (...) del Reg.(CE) 834/2007, solo podrán utilizarse en la producción ecológica los productos mencionados en el anexo II del presente Reglamento (...). ▲ En el caso de los productos utilizados en trampas y dispersores, excepto en el caso de los dispersores de feromonas, tales trampas y dispersores evitarán que las sustancias se liberen en el medio ambiente, así como el contacto entre las sustancias y las plantas cultivadas. Las trampas deberán recogerse una vez que se hayan utilizado y se eliminarán de modo seguro.

Finalmente cuando hablamos de fertilidad, no podemos perder de vista que una de sus manifestaciones, el concepto de rendimiento, depende de la suma de muchos factores, no solo de una abundante fertilización y si consideramos el agrosistema como una unidad ambiental –unidad orgánica–, los umbrales biológicos, en definitiva, los valores límite de cada componente que se sobrepasasen para conseguir esa productividad van a hacerlo a costa de perder resiliencia, estabilidad, en una palabra “vitalidad” del sistema productivo.

Dentro de las técnicas que favorecen los objetivos de la producción ecológica, este capítulo, persigue contribuir al conocimiento de las pautas para el manejo de la fertilidad del suelo en agrosistemas extensivos de secano, a través de la gestión de la fertilización orgánica.

Entendiendo por fertilidad al “potencial de un suelo de cultivo, para mantener de manera perdurable un nivel de producción óptimo y de calidad, conservando un estado de alta estabilidad frente a procesos que implicarían su degradación o pérdida; y dentro de unos límites determinados por un manejo específico y por un contexto ambiental y socioeconómico concreto”.

En la actualidad la comprensión del concepto fertilidad se complementa y amplía, integrando en la misma la comprensión de los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo, sus propiedades emergentes resultado de su génesis y de las interacciones entre sus componentes, así como los “servicios” que genera para la sociedad⁴ [4, 5].

En este sentido la clave para mejorar la funcionalidad de los sistemas agrícolas de secano en las regiones semiáridas es la conservación de la fertilidad del suelo, cuyo componente vital es la materia orgánica.

1. Una aproximación al conocimiento de la dinámica de la materia orgánica en el suelo de cultivo

Desde la agroecología entendemos que la mayoría de los procesos que forman parte de la dinámica de los agrosistemas tienen al suelo como centro regulador crítico. En base a ello, uno de los pilares de la Agroecología para la gestión sostenible de los sistemas productivos es la mejora de la fertilidad del suelo.

En el ámbito mediterráneo, el suelo constituye un recurso prácticamente no renovable a escala de tiempo humana en función de una tasa de renovación muy lenta y en función de su alta vulnerabilidad.

Aumentar su fertilidad y promover su conservación, en ambientes semiáridos exige un manejo dirigido a gestionar de forma eficiente, la dinámica del agua y el contenido de materia orgánica, este último mediante dos vías principales:

- ▲ el diseño de un balance orgánico a nivel de finca para favorecer las entradas de materia orgánica, frente a las pérdidas por extracción de biomasa, mineralización y erosión.

⁴ En las últimas décadas el concepto de “fertilidad” ha sido sustituido por el concepto de “calidad”. Entre las definiciones más citadas cabe mencionar la de Doran y Parkin (1994), que definen la calidad como “la capacidad del suelo de funcionar, dentro de las fronteras del ecosistema y el uso de la tierra, manteniendo la calidad ambiental y fomentando la salud de plantas, de los animales y del hombre”.

- ▲ la gestión del balance húmico en el suelo, para mantener un contenido de materia orgánica en todas sus formas y una eficiente dinámica de nutrientes, limitando las pérdidas por erosión, emisión y lixiviación.

La gestión eficiente de la materia orgánica además limitará la degradación del suelo de cultivo⁵, potenciará la dinámica de los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes⁶, la eficiencia en el uso y conservación del agua y aumentará la biodiversidad edáfica.

La materia orgánica está considerada por la Ciencia del Suelo como “un componente principal que regula la capacidad del mismo para mantener la fertilidad así como para optimizar su conservación; además ofrece servicios ambientales que permiten el desarrollo del ser humano en el ámbito local y a escalas globales”.

Los principales factores que actúan sobre la evolución de la materia orgánica están relacionados con la vegetación –cantidad de biomasa y necromasa y composición vegetal–, de los factores climáticos –condiciones de temperatura y humedad– y de las propiedades del suelo –textura, estructura agregacional, contenido y mineralogía de la arcilla y pH preferentemente–.

La dinámica de la materia orgánica depende de la velocidad a la que es usada por los microorganismos y el uso de esta por los microorganismos va a depender:

- ▲ de la presencia permanente o no de vegetación, ya que el sistema radicular actúa como un dinamizador de la vida en el suelo⁷
- ▲ de la composición bioquímica del sustrato fundamentalmente del contenido de carbono y nitrógeno, pero también de otros componentes que facilitan su degradación –polisacáridos, aminoácidos– o que la retardan –ligninas, taninos–,
- ▲ de la accesibilidad del sustrato a la acción macro y microbiana –restos incorporados o dejados en superficie, picado del material vegetal, etc.–,
- ▲ de factores edáficos y ambientales –tipos de suelos, agregación, humedad, temperatura, aireación–,
- ▲ y del manejo del suelo –laboreo o no laboreo, riego, suelos desnudos...–.

Si el conocimiento de la vida en el suelo es todavía escaso –debido a la enorme heterogeneidad de organismos y la diversidad de hábitat–; si son conocidos los servicios decisivos que la biodiversi-

⁵ Por degradación del suelo entendemos “la reducción o pérdida de la productividad biológica o económica de la complejidad de las tierras...ocasionada en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, por los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos...(CLD, 2008)”.

⁶ En la gestión del balance de nutrientes se requiere, en una primera fase, que se adicione al suelo lo extraído por las cosechas y se repongan las pérdidas por percolación, erosión o escorrentía. Este se realizaba desde arriba –aporte de biomasa, abonos, cultivos y laboreo– y desde abajo –favoreciendo la dinámica del medio vivo y mineral en el perfil–. Pero el balance no es solo lo que entra y sale, sino también lo que ocurre dentro y el intercambio con el medio “el enigma del suelo como fábrica de nutrientes” (Naredo, 2001).

⁷ Un nivel emergente de enorme importancia en relación a la gestión de la fertilidad, es el contexto rizosférico; en la rizosfera, las raíces de las plantas, exploran un determinado volumen de suelo, compartiendo el espacio poroso, con los organismos, el aire y el agua y es aquí, en la zona de influencia de la raíz el lugar en donde se da, la relación más íntima entre la vida orgánica y la mineral, expresándose de la forma más eficiente la deseada relación entre biodiversidad, productividad y sostenibilidad.

dad edáfica representa para la sostenibilidad de la biosfera y la perdurabilidad de los sistemas productivos⁸ siendo determinante considerar la íntima relación entre la materia orgánica y la vida en el suelo.

ALGUNOS “SERVICIOS” AGROSISTÉMICOS DE LOS ORGANISMOS EDÁFICOS

- ▲ Contribuyen a la biodegradación de los materiales orgánicos y al transporte en el suelo –junto con el agua– de los transformados.
- ▲ Están implicados en el funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos.
- ▲ Modifican la arquitectura del suelo dando forma a la porosidad, manteniendo la estabilidad estructural y facilitando una mayor eficiencia en el uso del agua.
- ▲ Mejoran la cantidad y eficacia de la adquisición de nutrientes por la vegetación y participan en la optimización del desarrollo vegetal.
- ▲ Facilitan una mayor resistencia ante enfermedades y plagas, actuando en el suelo como filtros biológicos y detoxificadores de compuestos contaminantes.
- ▲ Regulan la dinámica de la materia orgánica del suelo, la retención del dióxido de carbono y la emisión de gases de efecto invernadero.

En ambiente semiárido existen “especificidades” que condicionan la actividad transformadora de los organismos edáficos, pero siempre, el carbono que almacena el suelo, determina la disponibilidad de nutrientes, energía y microhábitat para las biocenosis, por lo que su actividad depende en gran medida del contenido y la calidad de aquel (Tabla 2).

Tabla 2

Procesos que influyen en la actividad mineralizadora de la materia orgánica por los organismos edáficos en ambiente semiráridos

- ▲ Existen dos períodos de parada biológica edáfica, verano por falta de agua e invierno por temperaturas bajas. La mineralización de la materia orgánica se produce preferentemente en primavera y otoño que es cuando se producen las condiciones de temperatura y humedad adecuadas para la mayor bioactividad.
- ▲ Las rotaciones de cultivo en el secano semiárido, permiten gestionar los recursos hídricos, manteniendo un cierto nivel de humedad en el suelo que favorece la actividad biológica, para que el proceso de mineralización continúe en verano.
- ▲ En una rotación de año y vez, el año que está el suelo de barbecho, la materia orgánica aportada por la biomasa vegetal –restos de cosecha y vegetación no cultivo que se ha desarrollado en período de otoño e invierno–, sirve de sustento a los microorganismos del suelo en primavera, gracias a que en el suelo hay agua, al no haber sido exportada por la vegetación; por esta razón, el proceso de mineralización de la materia orgánica se sigue produciendo durante el otoño
- ▲ Se ha demostrado que en ambientes mediterráneos, semiáridos y áridos, los organismos del suelo descienden a mayores profundidades en los períodos desfavorables –ya sea por falta de agua y/o por temperaturas superficiales excesivamente frías– y vuelven a retornar cerca de la superficie del suelo cuando son idóneas.

⁸ La percepción de la importancia de la vida en el suelo en relación con los servicios que presta a la sostenibilidad de los sistemas de producción, ha hecho que de nuevo se preste interés al estudio de la biodiversidad del suelo a un nivel más global, a su protección a nivel político y al estudio de su gerencia perdurable dentro de los ecosistemas y agrosistemas.

La fertilización orgánica en sistemas extensivos de secano

La mayor parte de la materia orgánica procede de restos vegetales, sin embargo todos los constituyentes orgánicos, pasan al suelo en algún momento, siendo su existencia en el mismo más o menos transitoria ya que las condiciones de escasez de carbono y la flexibilidad bioquímica de la población edáfica, aseguran que no se produzca nunca una gran acumulación de material biodegradable.

En suelos agrícolas manejados con bases y técnicas agroecológicas la materia orgánica mayoritariamente procede de⁹:

- ▲ Restos de plantas y de macro y microorganismos en diferentes estados de transformación –biomasa y necromasa–.
- ▲ Abonos orgánicos u organominerales.
- ▲ Síntesis, metabolismo y productos de excreción de los organismos edáficos –copromasa, señales, secreciones, neomasa–.
- ▲ Exudados procedentes de la rizosfera –rizodeposición–.

La diversidad de fuentes orgánicas, asegura un conjunto heterogéneo de constituyentes, con distinta composición, con distinta susceptibilidad al ataque macro y microbiano y con diferentes velocidades de transformación; lo que se traduce en el suelo en variados almacenes de carbono, con diversas ubicaciones pero lo que es más importante, con diferentes “utilidades” que se traducen en diferentes influencias en la fertilidad del suelo.

Una posible secuencialidad de la biodegradación de los componentes orgánicos en el suelo seguiría las etapas descritas en la Tabla 3 y en la Figura 1.

En cierta manera la dinámica de la materia orgánica en el suelo, su variación a través agrosistemas y su respuesta a las perturbaciones se pueden entender con la interacción de estos tres apar-

Tabla 3

Dinámica secuencial de la transformación de la materia orgánica en el suelo

- ▲ la deposición en el suelo de compuestos orgánicos bioquímicamente heterogéneos de procedencia mayoritariamente vegetal, pero también de abonos orgánicos, de deyecciones y material fragmentado por macroorganismos.
- ▲ la biotransformación y el procesado en nuevas estructuras. Produciéndose variaciones en las características moleculares de los compuestos de carbono aportados, asimilados y sintetizados, por la acción de sistemas endo y exoenzimáticos –de bacterias y hongos–. La biotransformación ofrece la formación de nuevas moléculas y macromoléculas con propiedades específicas.
- ▲ la redistribución física y estabilización del carbono gracias a las múltiples interacciones con el medio mineral, dando lugar a los procesos de estabilización física y química de la materia orgánica.

⁹ Biomasa: fracción formada por los seres vivos del suelo. Necromasa: contenidos y estructuras celulares de la biomasa vegetal, microbiana y animal al morir. Copromasa: residuos de la digestión y no asimilación animal. Señales: productos orgánicos de uso biológico, generadas por excreción como un sistema de llamada- respuesta específica, que exploran las relaciones entre los seres vivos del suelo o entre estos y las raíces. Secreciones. Rizodepositos, catabolitos, mucopolisacáridos y otros generadas y depositadas por vegetales, animales y microorganismos del suelo, de forma expresa, y utilizados con fines “constructivos, nutricionales y defensivos en el ámbito de la rizosfera. Neomasa. Productos orgánicos de neoformación del propio suelo. Adaptado de Gonzalez Carcedo, 2007.

tados. Los cambios químicos que se producen como consecuencia de la transformación de la MOS se reflejarán en:

- ▲ variaciones en las características moleculares de los compuestos orgánicos,
- ▲ múltiples interacciones con el medio mineral dando lugar a los procesos de estabilización física y química de la MOS,
- ▲ bioformación de nuevas moléculas y macromoléculas que ampliarán las propiedades de la MO en el suelo de cultivo.

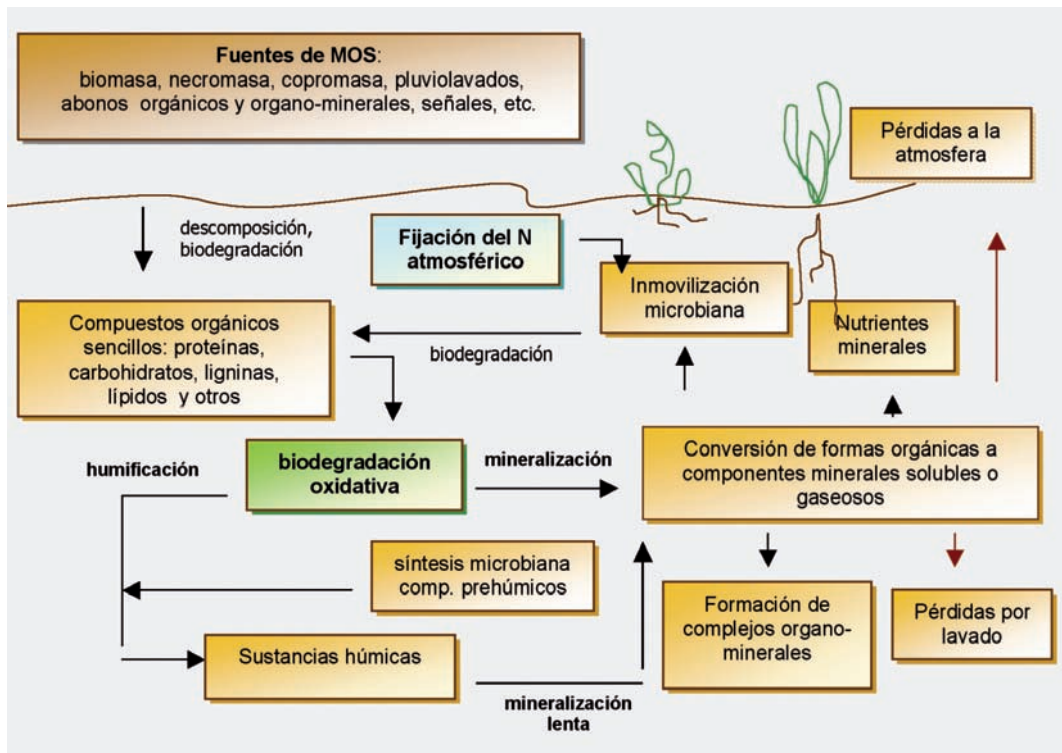


Figura 1. Esquema simplificado de la dinámica de la materia orgánica en el suelo.

Operativamente la materia orgánica se divide en distintas fracciones basadas en sus características físicas –tamaño, densidad y localización en la matriz mineral– y químicas. Una clasificación muy didáctica es la que divide la materia orgánica en “materia orgánica viva” y “no viva” [6] –Tabla 4–.

La clasificación anterior se amplía [7], agrupando la diversidad de componentes de la fracción “no viva” en cuatro grupos –Tabla 5–. Sin embargo es frecuente encontrar otras clasificaciones derivadas de métodos de fraccionamiento físicos y químicos de la materia orgánica.

Tabla 4

División de la materia orgánica del suelo

Materia orgánica viva	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Biomasa macro y microbiana y las raíces de las plantas.
Materia orgánica "no viva"	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Materiales orgánicos poco transformados, simples o complejas macromoléculas, derivados de la síntesis y el metabolismo microbiano. Destacamos dos subgrupos: <ul style="list-style-type: none"> – la fracción "no húmica" formada por compuestos orgánicos producidos por la biotransformación de los restos orgánicos, de las excrecciones radiculares y de los compuestos orgánicos generados por síntesis y/o metabolismo microbiano, bioquímicamente identificables, siendo la mayoría fácilmente biodegradables, – la fracción "húmica constituida por macromoléculas complejas resultado de los procesos de humificación; unidas al medio mineral; no pueden ser separados por métodos mecánicos.

Tabla 5

Características de las fracciones de la materia orgánica "no viva"

<ul style="list-style-type: none"> ▲ La materia orgánica soluble o materia orgánica disuelta. Hace referencia al conjunto de moléculas orgánicas de diferente tamaño y estructura que pasan por un filtro de 0.45 μm de poro (Baldock and Nelson, 1999). Es un término genérico que se debe matizar especialmente cuando queremos interpretar su papel en las funciones ecológicas del suelo de cultivo. Sin embargo ya que todos los mecanismos microbianos de absorción requieren un medio acuoso, numerosos estudios sugieren que la biodegradación de la MO del suelo está mediada por la fase acuosa y que la MOD podría ser el componente dominante sobre el que actuaría la actividad biotransformadora de los microorganismos (Kalbitz, 2003). La protección por la matriz mineral del suelo le afecta. ▲ La materia orgánica particulada, es la fracción física de la MO, constituida por restos preferentemente, en distintos grados de descomposición no estando asociada a la fracción mineral. Es una importante reserva de carbono fácilmente disponible. Su magnitud varía con el tipo de vegetación y con el manejo y puede estar protegida dentro de los agregados (Cambardella & Elliott 1992). Su naturaleza fisico-química le confiere labilidad y rápida capacidad de reacción ante los cambios producidos por las prácticas de manejo, por lo tanto, constituye un buen indicador biológico de los efectos producidos como consecuencia de diferentes manejos agronómicos a corto y largo plazo y el seguimiento de su variación puede dar indicios tempranos de los impactos producidos por aquéllos (Fabrizzi y cols., 2003). ▲ El humus corresponde a la MO del suelo incorporada en complejos organominerales, asociada a las partículas de arcilla –también limo y arena–. En general las sustancias húmicas se caracterizan por su elevado peso molecular, su insolubilidad en un medio acuoso y su resistencia –siempre relativa– a la descomposición microbiana, que las transformará en formas orgánicas menos complejas, o las mineralizará a compuestos minerales u órgano minerales. La visualización al microscopio electrónico, muestra un conjunto de partículas planas y redondeadas unidas entre sí, formando un retículo esponjoso (Almendros y cols., 1983). Este retículo de espacios abiertos puede atrapar o unir otros componentes orgánicos e inorgánicos y a partículas de agua. ▲ Las denominadas huminas correspondería a esos materiales orgánicos heterogéneos en cuanto a composición elemental, estructura y polaridad y altamente recalcitrantes a la biodegradación (Wen y cols, 2007).
--

Aunque, como hemos indicado existe un "continuo de biodegradabilidad" controlado por la composición bioquímica y grado de alteración de los materiales y componentes orgánicos, este proceso también puede ser alterado por interacciones de la MO con la fracción mineral del suelo. Esta interacción es capaz de estabilizar, aunque no permanentemente, la materia orgánica más o menos lábil frente a la oxidación biológica –Tabla 6– y aumentar tu tiempo de permanencia en el suelo [8].

Tabla 6**Mecanismos de estabilización del carbono orgánico en el suelo**

- ▲ **Química:** hace referencia a la unión de partículas minerales elementales del tamaño de limos y arcillas con materiales orgánicos, quedando estos últimos protegidos en forma de compuestos organominerales.
- ▲ **Bioquímica:** hace referencia a la estabilización de la materia orgánica debida a la heterogeneidad de su propia composición química.
- ▲ **Física:** corresponde a la protección de la materia orgánica dentro de los agregados del suelo.

Fuente: Álvaro Fuentes, J. (2006).

Los mecanismos de estabilización químicos, bioquímicos y físicos de la materia orgánica en el suelo van en escalas de tamaño que se extienden de micrómetros a centímetros y son dependientes de las características de los componentes minerales y orgánicos y del arreglo tridimensional de esas partículas minerales [7].

Pero lo más importante es que esa “protección” impide –con distinta temporalidad– la mineralización o pérdida del carbono orgánico y que el buen manejo del suelo¹⁰, como veremos más adelante es un factor muy importante a la hora de mantener la estabilización de la materia orgánica.

Cada componente y cada fracción de la materia orgánica tiene un papel específico sobre una determinada función del suelo, siendo esta función, la mayoría de las veces, reforzada por distintos componentes interactuando conjuntamente.

Por ejemplo la materia orgánica particulada, es la fuente metabólicamente más activa del suelo lo que supone una mayor implicación en la actividad macro y microbiana pero contribuye poco a la capacidad de cambio; mientras que el humus contribuye a la capacidad de cambio, a la retención de nutrientes y a la formación de la estructura y a su estabilidad; por otra parte los materiales recalcitrantes como las huminas no participan activamente en ninguna de las propiedades anteriores pero pueden tener un papel importante en la termicidad del suelo.

Retomando la transformación de la materia orgánica conviene incidir en uno de los procesos más importantes de su dinámica, que es la formación de las sustancias húmicas –humificación– por su papel en los suelos de cultivo.

Los precursores de las sustancias húmicas son macromoléculas de procedencia diversa. En general los oligómeros peptídicos, glucídicos o fenólicos cuando no son biodegradados en una primera fase vía mineralización, sufren interacciones bioquímicas, que conducen a la formación de compuestos condensados pigmentados, de estructura más compleja que los anteriores y que denominaremos

¹⁰ Los agregados del suelo juegan un papel fundamental en el secuestro del carbono orgánico ya que la materia orgánica encapsulada dentro de los mismos agregados no resulta accesible al ataque de los microorganismos (Tisdall y Oades, 1982). Cuanto menos estable sea un agregado, menor será su resistencia ante procesos de alteración que pueden llegar a ocasionar su rotura, liberándose la materia orgánica protegida en su interior. En agroecosistemas, la principal causa de la rotura de los agregados de suelo es el laboreo.



como “policondensados prehúmicos”. Estos son los precursores directos de los compuestos húmicos y pueden tener un doble origen, microbiano y vegetal aunque mayoritariamente corresponden al segundo.

Otros precursores prehúmicos serán monosacáridos unidos a aminoácidos, que pueden tener origen microbiano, o proceder de exudados vegetales o de la degradación de la quitina, y que dan lugar a “melanoidinas”, que son productos de condensación nitrogenados, de color oscuro y muy reactivos, análogos estructuralmente a los ácidos húmicos. Las hojas de algunas plantas neutrófilas –tales como la ortiga– aportan con sus residuos, compuestos fenólicos pigmentados que denominaremos “melaninas vegetales”. Igualmente tienen gran importancia la formación de compuestos prehúmicos por los microorganismos, las denominadas “melaninas microbianas”.

Los distintos precursores evolucionarán de forma completamente diferente en la síntesis húmica por neoformación, como se refleja en el esquema sobre la formación de sustancias húmicas (Figura 1 y 2):

- ▲ Los azúcares y los aminoácidos procedentes de la biodegradación de polisacáridos y péptidos además de otros compuestos orgánicos sencillos, servirán fundamentalmente de alimento y soporte energético a la biomasa microbiana, que tiene una vida efímera y que suministrará al medio ciertos compuestos prehúmicos que participan en la formación de las moléculas húmicas como unidades estructurales.
- ▲ Los aminoácidos son utilizados por las bacterias en la construcción de sus proteínas mientras que los azucares se usan para la obtención de energía. Este mecanismo hace que el nitrógeno se conserve en su mayor parte, pasando de forma orgánica a inorgánica y viceversa, mientras que el carbono es consumido y transformado en dióxido de carbono que pasa a la atmósfera del suelo y de allí a la atmósfera libre. Todo ello conduce a que la relación C/N inicial de los restos vegetales vaya disminuyendo a medida que se avanza hacia la formación de sustancias húmicas. Esta disminución viene favorecida por la posibilidad de algunas bacterias, algas y hongos de fijar nitrógeno atmosférico, que compensa, y a veces con creces, las pérdidas de nitrógeno inorgánico que se producen por lavado o por desnitrificación.
- ▲ La celulosa y la lignina son atacadas por hongos y actinomicetos, mientras que las proteínas son destruidas por las bacterias con liberación de nitrógeno inorgánico, que permite el creci-

AGRICULTURA ECOLÓGICA EN SECANO

miento fúngico y hace posible la continuidad del proceso destructivo. La celulosa termina dando azúcares sencillos. Las sustancias aromáticas culminan su transformación con la formación de ácidos polifenólicos sencillos, derivados del fenilpropano producido en la rotura de la lignina preferentemente, que son considerados como precursores húmicos.

- ▲ La lisis de los polifenoles y la posterior polimerización de las unidades que no son biodegradadas, darán lugar a los núcleos aromáticos de las macromoleculas húmicas alrededor de los cuales se organizarán las cadenas alifáticas –ricas en grupos carboxílicos, amínicos y alcohólicos– para generar los ácidos fúlvicos, húmicos, himatomelánicos y huminas de condensación que son los componentes del humus.

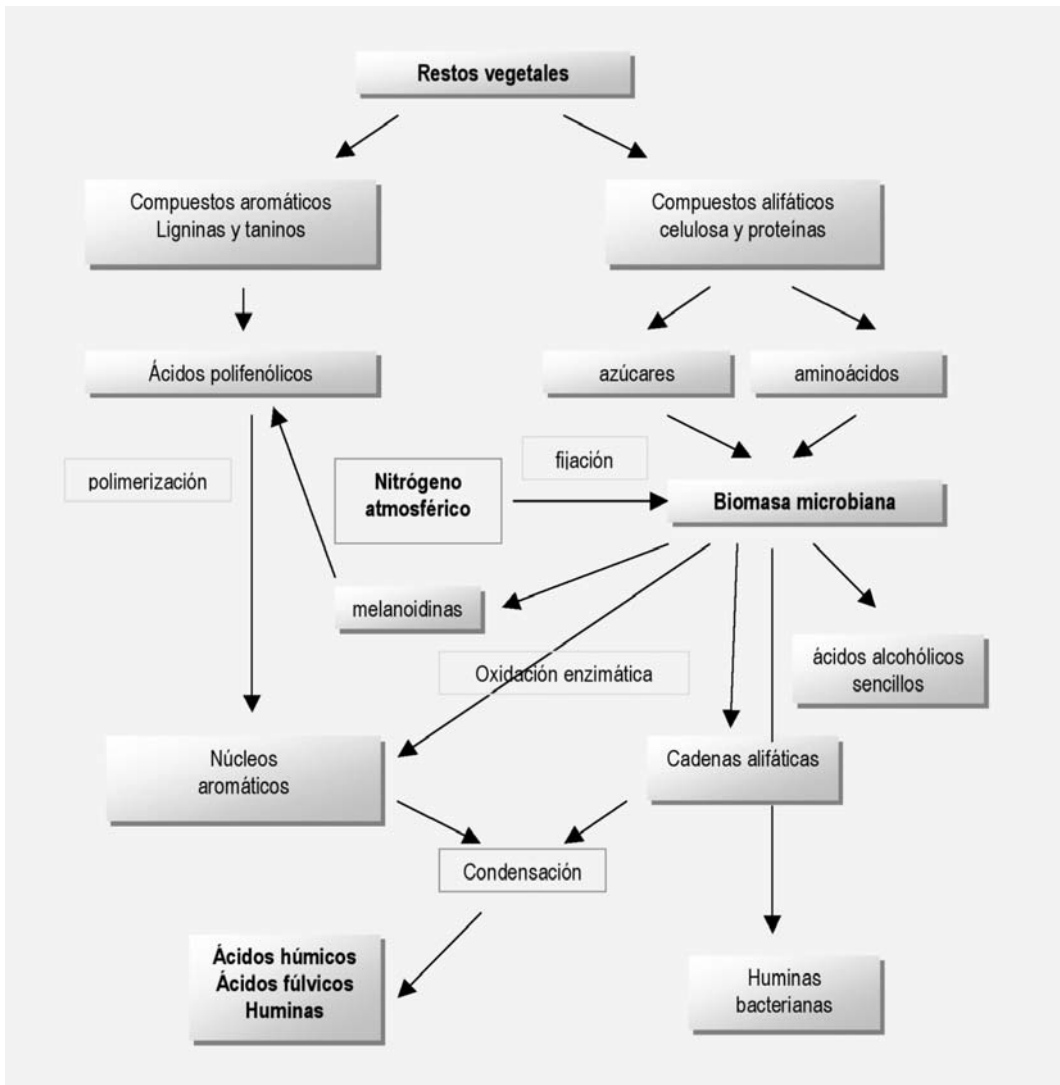


Figura 2. Formación de sustancias húmicas por neoformación.