

Conservación de suelo y agua en el olivar andaluz en relación al sistema de manejo de suelo



Consejería de Agricultura y Pesca

CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN EL OLIVAR ANDALUZ EN RELACIÓN AL SISTEMA DE MANEJO DE SUELO

AUTORES

José Alfonso Gómez¹

Elías Fereres²

¹ Instituto de Agricultura Sostenible C.S.I.C.
Alameda del Obispo S/N Apartado 4084. 14080 Córdoba.
E-mail: ag2gocaj@uco.es

² Dpto. de Agronomía. Universidad de Córdoba

**CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN EL OLIVAR ANDALUZ EN RELACIÓN
AL SISTEMA DE MANEJO DE SUELO**

© JUNTA DE ANDALUCÍA. *Consejería de Agricultura y Pesca*

Publica: Viceconsejería. *Servicio de Publicaciones y Divulgación.*

© **Textos (Autores):** José Alfonso Gómez, Elías Fereres

Colección: Agricultura.

Serie: Olivicultura y Elaiotecnia.

ISBN: 84-8474-151-6

Depósito Legal: SE-4920-04

Producción: Gráficas Monterreina, S.A. (SEVILLA)

ÍNDICE DE MATERIAS

1. INTRODUCCIÓN.	7
2. CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA.....	9
3. SISTEMAS DE MANEJO DE SUELO MÁS UTILIZADOS EN OLIVAR.....	10
4. TÉCNICAS DE CONTROL DE EROSIÓN EN OLIVAR COMPLEMENTARIAS AL SISTEMA DE MANEJO.	12
5. ESCORRENTÍA.	14
5.1. Factores que influyen sobre la escorrentía superficial al modificar la infiltración.	14
5.2. Análisis del efecto de los diferentes sistemas de manejo sobre la escorrentía.	21
5.3. Estimación de la escorrentía diaria para un sistema de manejo determinado.	27
5.4. Determinación del caudal de escorrentía máximo.	31
6. IMPACTO DEL MANEJO DE SUELO SOBRE EL USO DE AGUA EN OLIVAR	32
6.1. Evaporación.	32
6.2. Transpiración de la cubierta.	36
7. EROSIÓN HÍDRICA.	37
7.1. Factores que influyen sobre la erosión hídrica.	37
7.2. Técnicas de control complementarias al sistema de manejo del suelo.	39
7.3. Análisis del efecto de los diferentes sistemas de manejo de suelo sobre la erosión hídrica.....	43
7.4. Cálculo del efecto sobre la erosión hídrica de un sistema de manejo determinado.	46

8. CÁLCULO DE LAS PROTECCIONES NECESARIAS EN LAS ZONAS DE DESAGÜE.	52
9. RESUMEN Y RECOMENDACIONES FINALES.	54
10. REFERENCIAS	56
ANEXOS	61
ANEXO 1: VALORES TABULADOS DEL NÚMERO DE CURVA, CN.	63
ANEXO 2: VALORES DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA, C, PARA EL MÉTODO RACIONAL.	65
ANEXO 3: ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE TERRAZAS.	66
ANEXO 4: VALORES DE P Y C PARA RUSLE.	67

1. INTRODUCCIÓN.

El olivar es un cultivo históricamente ligado a la Cuenca Mediterránea, en la que se extendió desde su zona originaria que va desde el sur del Cáucaso hasta las altiplanicies de Irán, Palestina y Siria. A pesar de la reciente expansión del cultivo, hablar del olivar es hablar fundamentalmente del Mediterráneo, ya que el 98% de la superficie de olivar mundial se sitúa en países ribereños del Mediterráneo [Civantos, 1999]. Dentro de los países productores España ocupa un lugar destacado, siendo el primer productor mundial de aceite de oliva, con el 42 % de la producción, promedio 1996-2001 [Consejería de Agricultura y Pesca, 2003]. El 75% de esa producción provino de Andalucía [Consejería de Agricultura y Pesca, 2003], donde se concentra el 51% de la superficie de olivar española [Consejería de Agricultura y Pesca, 2003]. El olivar andaluz presenta a su vez una productividad media por superficie superior al promedio nacional, 2.9 Tm ha⁻¹ en Andalucía frente a 2.2 Tm ha⁻¹, datos del bienio 1997-1999 [Instituto Nacional de Estadística]. Por su extensión y localización el olivar tiene en Andalucía una importancia ambiental indiscutible. Las 1.480.000 ha de olivar existentes en Andalucía [Consejería de Agricultura y Pesca, 2003] suponen el 17% de la superficie total de la comunidad. Su peso económico en Andalucía es también notable, con el aceite y sus subproductos constituyendo el 20.1% de la producción final agraria en 2001 [Consejería de Economía y Hacienda, 2002]. Para dar una idea del valor relativo del aceite y sus derivados baste considerar que en 2001 fue equivalente al 44% del valor añadido bruto del sector hostelero andaluz ese mismo año [Consejería de Economía y Hacienda, 2002], generando un promedio de 28 millones de jornales por campaña [Sánchez 2002].

Una primera característica del olivar andaluz es que gran parte del mismo está situado en zonas de pendiente. Un 24.5% de la superficie dedicada al cultivo del olivo en Andalucía se sitúa en zonas de pendiente media superior al 20%, pendientes consideradas en numerosas agriculturas como marginales para la producción agrícola [Lal, 1988], y un 59% está en pendientes de entre el 5 y el 20%, inclinaciones en las que se recomendaría algún tipo de medidas de conservación. Habiendo ocupado tradicionalmente zonas en pendiente y/o marginales no resulta sorprendente que muchos de los suelos de olivar se clasifiquen con algún tipo de limitación a la producción. Volviendo al caso andaluz nos encontramos que un 50% de los olivares (en superficie) presentan una limitación im-

portante, y un 17% moderada. Por ello la mayoría del olivar se cultiva en condiciones extensivas en seco, aunque en el riego ha experimentado una fuerte expansión en los últimos años, estando declaradas como de riego el 17.5% de la superficie de olivar de Andalucía [Consejería de Agricultura y Pesca, 2003]. Otra característica del olivar andaluz es que la mayoría es del tipo extensivo con densidades de plantación bajas (un 41% de la superficie está ocupado por plantaciones con menos de 100 árboles/ha) o moderadas (un 49.5% de la superficie ocupado por plantaciones de entre 100 y 200 árboles/ha), aunque existen también plantaciones superintensivas con más de 400 árboles/ha. Otro factor importante a la hora de cualquier análisis de explotaciones es su tamaño, que como vemos en la Figura 1 correspondiente a las explotaciones andaluzas es muy heterogéneo, predominando las explotaciones de tamaño pequeño-medio.

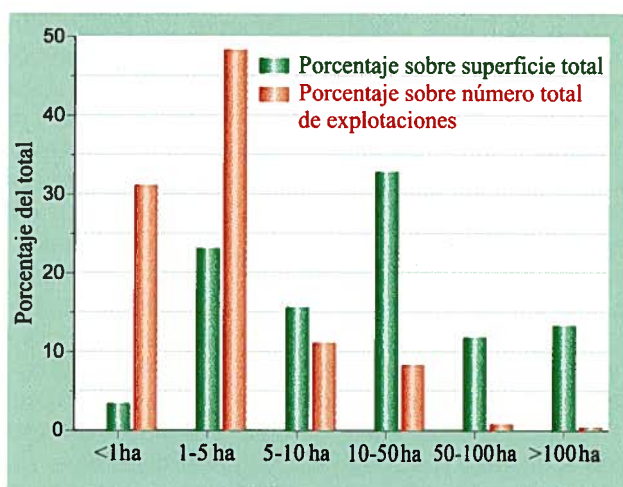


Figura 1: Distribución de las explotaciones olivereras en Andalucía de acuerdo a su extensión, por superficie y por número de explotaciones. Elaboración propia a partir de Consejería de Agricultura y Pesca (2003)

Esas características de pendientes, suelos, y estructura de la propiedad, han conducido a graves problemas de erosión durante los meses lluviosos. Un manejo de suelo adecuado, como por ejemplo efectuar únicamente las labores estrictamente necesarias o permitir el crecimiento controlado de vegetación en las calles entre los árboles para proteger el suelo, puede hacer que ese problema de erosión desaparezca o se reduzca en gran medida. El aprovechamiento óptimo del agua de lluvia, el único aporte de agua del 82.5% de los olivares andaluces por superficie [Consejería de Agricultura y Pesca, 2003], es fundamental para la producción en olivar, y en ello el manejo adecuado del suelo es también crítico. En ocasiones el manejo más adecuado desde el punto de vista de conservación

de suelo es difícil de compatibilizar con el aprovechamiento del agua de lluvia para la producción. Esto ocurre con el caso de cubiertas vegetales antes mencionados en los que parte del agua de lluvia es transpirada por la cubierta para permitirles crecer, siendo necesario poner a punto su manejo de manera que se obtenga un adecuado control de la erosión sin perjudicar a producción, o al menos siendo consciente de qué riesgo se está asumiendo con cada manejo. Por todo ello el disponer de criterios y orientaciones acerca de cómo enfocar el manejo de suelo en olivar sería de gran ayuda para un mejor aprovechamiento del agua y control de la erosión en olivar.

Para entender el olivar andaluz es necesario considerar que se trata de un conjunto heterogéneo, en el que existe una gran diversidad de explotaciones que difieren en muchos aspectos como, por ejemplo, topografía, tamaño, grado de intensificación, etc.... Cualquier recomendación dirigida a un conjunto tan amplio y heterogéneo debe basarse en una serie de criterios generales, explicando claramente a qué obedecen los mismos y cómo interpretarlos. Su aplicación a condiciones particulares, una finca determinada, requerirá siempre del criterio y del conocimiento específico del técnico y del agricultor encargado de la toma de decisiones.

El objetivo de esta publicación es doble. Uno, ofrecer una panorámica de los sistemas de manejo de más usados en el sector olivarero, fundamentalmente el andaluz. Otro, explicar el grado de entendimiento de que se dispone a la hora de predecir su impacto sobre la escorrentía y riesgo de erosión hídrica indicando la información elemental disponible para calcular dicho impacto. Van dirigidas a personas involucradas en el sector con cierta formación técnica pero no especializada en el área de conservación de suelo y agua, por lo que se pretende sean de utilidad a técnicos de diferente procedencia, agricultores ilustrados y estudiantes de agricultura interesados en la materia.

2. CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA.

Escorrentía y erosión hídrica son dos conceptos interrelacionados, ya que en general en sistemas naturales un aumento de la escorrentía lleva aparejado un aumento de la erosión hídrica, siendo la reducción de la escorrentía uno de los sistemas más eficaces para reducir la erosión [Hudson, 1988]. De hecho numerosos expertos han considerado más apropiado centrar los esfuerzos en conservación de agua, ya que este es el factor que más interesa al agricultor asumiendo que la conservación de suelos vendrá con ella [Sanders, 1988]. Esto es cierto especialmente cuando los efectos de la pérdida de suelo pueden diferirse durante décadas o enmascararse debido a mejoras tecnológicas introducidas durante ese periodo como puede ser el riego o la fertilización. En los próximos apartados se explican básicamente cómo afectan a la erosión y la escorrentía los diferentes sistemas de manejo de suelo existentes en olivar.

3. SISTEMAS DE MANEJO DE SUELO MÁS UTILIZADOS EN OLIVAR.

El agua es el limitante agronómico fundamental en sistemas agrícolas mediterráneos. Para adaptar la producción de olivar a condiciones de secano se han usado tradicionalmente marcos de plantación amplios (10x10-m o mayores) y volúmenes de copa reducidos. Esto ha dado lugar a que el olivar tradicional de secano presente la mayor parte del suelo desnudo. Complementariamente, el control de las malas hierbas en olivar es crítico a fin de minimizar la competencia por agua con el árbol. Hasta no hace muchas décadas el único sistema disponible para el control de la mala hierba en olivar era el laboreo, o en las zonas con ganadería el pastoreo. Antes de la extensión del tractor agrícola a partir de la década de los cincuenta esa labor era efectuada con animales y poseía una periodicidad y una intensidad mucho menor. El laboreo sigue siendo hoy el sistema de manejo más extendido aunque su impacto sobre la conservación de suelos ha sido negativo en comparación con el laboreo con animales. Se labra más veces, con aperos que desmenuzan y/o voltean más y mejor el suelo y a mayor profundidad. Con ello no sólo se controla mejor la mala hierba, dejando el suelo desnudo durante un mayor periodo de tiempo, sino que también se degrada más la estructura del mismo. Todos esos factores contribuyen a hacerlos más frágiles frente al impacto de las gotas de lluvia y a la escorrentía superficial, en ocasiones (Figura 2) se observan zonas del olivar donde ha desaparecido todo el suelo fértil.



Figura 2:Olivar labrado apreciándose como todo el suelo fértil ha desaparecido arrastrado por el agua



Figura 3:Parcela en no laboreo con suelo desnudo en Santaella, Córdoba.

En respuesta a ese problema se ha venido investigando desde la década de los sesenta en sistemas de manejo de suelo alternativos al laboreo convencional, LC. Uno de ellos es el no laboreo con suelo desnudo, NLD (Figura 3), en el que el control de malas hierbas se efectúa mediante aplicaciones de herbicida. Existen numerosas combinaciones de ambos sistemas como el laboreo mínimo, LM, consistente en una labor superficial anual; o laboreo reducido, LR, consistente en labrar la calles y aplicar herbicida bajo las

copas, con el número de labores en LC variando enormemente en función de la explotación y de la climatología del año. En cuanto al apero utilizado para las labores existe una tendencia generalizada al uso del cultivador y una reducción al uso de la grada de discos, que en muchas zonas está prácticamente en desuso.

Otra alternativa ya comentada en la introducción consiste en el uso de cubiertas vegetales, CC, que protegen el suelo de la erosión hídrica. La clave de este sistema en las condiciones del olivar de secano consiste en el manejo adecuado de las fechas de siembra y siega de la cubierta para que crezca durante el otoño-invierno que son meses en los que la precipitación supera a la evapotranspiración, segándola (químicamente con herbicida o mecánicamente con desbrozadora) a principios de primavera para que los residuos secos sigan protegiendo el suelo, idealmente, hasta que vuelva a rebrotar la campaña siguiente. Esta siega se efectúa después de que la cubierta haya semillado a fin de que se resiembre para el año siguiente, o dejando una banda muy estrecha sin segar con el mismo objetivo. Un manejo muy extendido en zonas de sierra es el aprovechamiento por ganado de la cubierta vegetal, siendo esta la manera de controlar un excesivo desarrollo de la cubierta. Se han ensayado distintos tipos de cubiertas, desde siembras anuales de cereales, leguminosas como la veza mostrada en la Figura 4, o cubiertas autóctonas a partir de semilla seleccionada, o bien dejando que evolucione la mala hierba presente en la explotación, como la mostrada en la Figura 5, controlando su evolución en función del manejo que se haga de los herbicidas o del desbrozado.

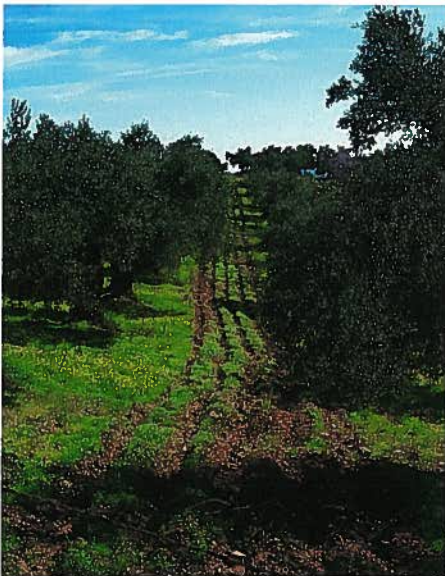


Figura 4: Cubierta de veza en un olivar del Valle de los Pedroches, Córdoba



Figura 5: Cubierta de malas hierbas en un olivar cercano a Alcaudete. Jaén

Así un desbrozado mecánico tiende a favorecer a las especies rastreras, y los herbicidas usados determinarán la evolución hacia un tipo u otro de flora. Desde el punto de vista de conservación de suelo y agua el aspecto más importante es la cantidad de biomasa y cobertura de suelo alcanzado. Existe cierta discrepancia acerca del impacto sobre la producción debido a la posible reducción del agua disponible al árbol, que se debe posiblemente a la dificultad del manejo de dichas fechas de siembra y siega y a su interacción con numerosos factores como son la climatología de la zona, marco y tamaño de los árboles, tipo de cubierta, etc....

Estos son sintéticamente los sistemas de manejo de suelo más extendidos en olivar, y los que se va a considerar a continuación. Existen numerosas combinaciones y modificaciones parciales de estos sistemas. En Pastor y col. [2001] se puede encontrar una clasificación sistemática y detallada de los mismos.

4. TÉCNICAS DE CONTROL DE EROSIÓN EN OLIVAR COMPLEMENTARIAS AL SISTEMA DE MANEJO.

Existen diversas técnicas de control de la erosión complementarias o sustitutivas a las de manejo del suelo. Entre ellas destaca el aterrazamiento. El aterrazamiento sistemático de las pendientes, como el mostrado en la Figura 6, no está muy extendido en los olivares andaluces, aunque existen ejemplos, muchos de los cuales datan de los años 60-70. Los motivos de extensión o no de terrazas dependen más de motivos económicos y sociológicos que técnicos.



Figura 6: Olivar en terrazas en Benacazón, Sevilla

Una variante más extendida que el aterrazamiento sistemático, aunque tampoco mayoritaria, consiste en la construcción de pequeños bancales aprovechando la pendiente del terreno y materiales locales, como por ejemplo piedras. Muchas de estos bancales datan en Andalucía de antes de la década de los 50 en los que el coste y la disponibilidad de mano de obra para su construcción y mantenimiento no era prohibitivo. La Figura 7 muestra una imagen de uno de estos bancales y la compara con las terrazas construidas mediante movimiento de tierras cuya vista aérea aparece en la Figura 6. Una variante utilizada en algunas explotaciones es la plantación siguiendo las curvas de nivel, y el tránsito de manera perpendicular a la línea de máxima pendiente. De esta manera se acaba obteniendo una situación que asemeja al aterrazamiento aunque su eficacia y funcionamiento hidrológico no es exactamente igual.

En otras ocasiones se construyen pequeñas pozas al pie de los olivos con el objetivo de almacenar la escorrentía superficial. Estas pozas se suelen encadenar unas con otras de manera que el exceso de agua de una pasa a las que está aguas abajo. En zonas con baja precipitación, en general por debajo de 300 mm/año se recurre a técnicas de recolección de agua en las que se concentran la escorrentía de una superficie más o menos extensa en la zona donde se cultivan los olivos. Estos sistemas están extendidos en algunas regiones del norte de África como en Túnez.



Figura 7: Vista de olivar en bancales, izquierda cerca de Obejo en Córdoba, y en terrazas construidas mediante movimiento de tierras, Benacazón en Sevilla



Figura 8: Cárcava de tamaño medio formada en la zona de drenaje superficial de la ladera, cerca de Castro del Río



Figura 9: Protección de cárcava

También se suele efectuar algún tipo de actuación sobre los cauces y las zonas de drenaje debido a la erosión producida en dichos cauces o a la formación de cárcavas como la mostrada en la Figura 8. Básicamente consisten en reforzar el fondo y laterales de los cauces y cárcavas con diversos materiales, desde piedras y ramas o restos de poda a hormigón. Una estrategia alternativa o complementaria es permitir el desarrollo de vegetación en estos cursos de agua de manera que proteja los taludes, como se observa en la Figura 9, donde complementan a



Figura 10: Obstáculos para retener sedimentos arrastrados por la escorrentía



Figura 11: Suelo aportado de otras zonas, más oscuro

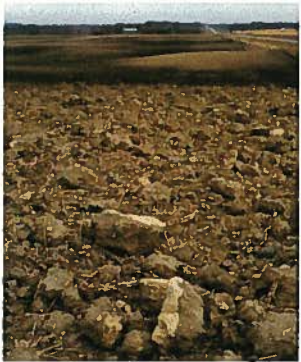


Figura 12: Suelo rugoso recién labrado. Foto cortesía de la U. de Manitoba

la obra de fábrica. Otra técnica empleada es la construcción de obstáculos dentro del cauce para que actúe de trampa de sedimento y permita el relleno del mismo con el suelo que la corriente ha arrastrado hasta allí desde otras partes de la finca evitando la pérdida de suelo, como se ve en la Figura 10.

En ocasiones, la erosión ha sido tan grande que ha comprometido la estabilidad de los árboles y el tránsito dentro de la explotación. En este caso la solución inmediata ha sido el aporte de suelo de otras zonas, generalmente de zonas bajas de la finca donde se acumula. En ocasiones, como en la finca mostrada en la Figura 10, cerca de Lucena (Córdoba), en la cual el agua de escorrentía desemboca en un pequeño embalse de materiales sueltos, esto se ha convertido en una tarea que se efectúa de manera periódica.

Todas las medidas comentadas en esta apartado son medidas complementarias y van en paralelo a la mejora del sistema de manejo de suelo. Siempre son recomendables y en ocasiones, como por ejemplo en pendientes muy elevadas o laderas muy largas que recogen mucho agua, imprescindibles, por lo que también se darán criterios generales en un apartado posterior acerca de su diseño y utilización.

5. ESCORRENTÍA.

5.1. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL AL MODIFICAR LA INFILTRACIÓN.

Una manera de conservar el agua de lluvia es reducir la escorrentía superficial. La escorrentía superficial se produce cuando el suelo ya no es capaz de almacenar más agua de lluvia. Eso puede ocurrir bien porque esté completamente saturado o bien porque la intensidad de la lluvia sea mayor que la velocidad a la que el suelo puede infiltrar dicha agua (velocidad de infiltración). Antes de que el agua empiece a escurrir el suelo es capaz de almacenar en las irregularidades de su superficie una cantidad de agua que en ocasiones es importante como ocurre en suelos labrados dejando terrones muy grandes, Figura 12

La velocidad de infiltración de un suelo viene determinada por diferentes factores, los más importantes de los cuales se comentan a continuación.

5.1.1. Textura

La velocidad de infiltración depende en primer lugar de la textura del suelo, esto es de la proporción de limo, arena y arcilla que lo constituyen. Existe una tendencia a una mayor velocidad de infiltración cuanto más arena, el constituyente de mayor tamaño, tenga un suelo, disminuyendo dicha velocidad cuanto más contenido de arcilla, el constituyente de menor tamaño, posea el suelo [Rawls y Brakensiek, 1989]. Esta es una variable, la textura, que no es posible modificar con el manejo del suelo o mediante enmiendas.

5.1.2. Densidad aparente

La velocidad de infiltración viene condicionada en segundo lugar por la densidad aparente del suelo, que es el peso de suelo seco que tiene una unidad de volumen de suelo determinada. Densidad aparente y porosidad son términos complementarios, y a mayor densidad aparente menor porosidad del suelo y viceversa. Así, cuanto mayor sea la densidad aparente de un suelo menor será su porosidad y al quedar menos espacio para que pase el agua menor será su velocidad de infiltración [Rawls y Brakensiek, 1989]. La densidad aparente es una variable que es fácilmente modificable por el manejo del suelo, tanto reduciéndola, como ocurre al labrar, como aumentándola, como ocurre en las zonas compactadas por el tránsito (maquinaria, ganado, etc...).

5.1.3. Humedad del suelo.

La velocidad de infiltración de un suelo se ve afectada también por la humedad del suelo. Cualquiera puede observar que un suelo húmedo infiltra menos agua que uno seco. Eso es así porque el agua en el suelo se mueve debido a dos tipos de fuerzas. Una es la fuerza de la gravedad que atrae al agua hacia el interior del suelo, y ésta es independiente del contenido de humedad del suelo. La otra fuerza es la succión que hace el suelo sobre el agua, aunque no es exactamente igual es algo parecido a cuando se moja la esquina de un terrón de azúcar en agua y vemos como el agua penetra en él. Esta segunda fuerza pierde importancia en suelos húmedos a medida que ya no existe suelo seco que succione el agua o éste suelo seco está tan lejos de la superficie del suelo que contribuye poco a la infiltración del agua [Geeves y col., 2001], En los suelos que poseen arcillas expansible, y que se agrietan al secarse, como el vertisol mostrado en la Figura 13, el efecto de la humedad inicial es más



Figura 13: Grietas en un Vertisol.
Foto cortesía del USDA.

importante aún, porque además cuando están secos presentan grietas por donde el agua se infiltra con mucha facilidad. Estos suelos al humedecerse se expanden cerrando esas grietas y reduciendo la velocidad de infiltración.

La humedad del suelo es también importante porque determinará que zona del perfil del suelo afectará a la infiltración de agua en el mismo. El movimiento de agua en el suelo se puede imaginar como una columna de agua que va avanzando hacia el subsuelo llenando el espacio poroso disponible desde arriba hacia abajo. La parte inicial de esa columna de agua se denomina frente de humedad, Figura 14. A la infiltración le afecta la parte del perfil del suelo hasta donde ha llegado el frente de humedad, por ejemplo en la Figura 14 desde la superficie hasta la zona señalada por el dedo. Cuando llueve sobre suelo seco el frente de humedad llega a menos profundidad que cuando lo hace sobre suelo húmedo porque hay más espacio poroso libre de agua para rellenar. Así puede ocurrir que horizontes del suelo donde hay una limitación a la infiltración, como podría ser una suela de labor a varios centímetros de profundidad con mayor densidad aparente, sólo afecten a la infiltración en condiciones de suelo húmedo, cuando el frente de humedad avanza más lejos para una misma cantidad de agua infiltrada, en comparación con el mismo suelo pero más seco.



Figura 14: Ejemplo de frente de humedecimiento. Foto cortesía de la U. del Estado de Pensilvania.

5.1.4. Macroporosidad

Otro factor que afecta a la infiltración es no solo la porosidad total del suelo, que como vimos era complementario a la densidad aparente, sino también la distribución de este espacio poroso. En otras palabras, si el agua se transmite a través de muchos poros pequeños o a través de unos pocos grandes y bien conectados con las zonas más profundas del suelo. Es mucho más efectivo, en términos de velocidad de infiltración, transmitir el agua en poros de mayor tamaño, denominados macroporos. Esto explica que dos suelos con la misma densidad aparente, lo cual implica la misma porosidad promedio, infiltren de manera muy diferente, debido a cómo sean sus poros. La vegetación tiende a aumentar la porosidad y también a formar poros de mayor tamaño, que además están abiertos a la superfi-



Figura 15: Macroporo formado por una lombriz. Foto cortesía del NRCS.

cie de manera que el agua circula con mayor facilidad, aumentando la infiltración. La microfauna del suelo, como las lombrices, tiene el mismo efecto formando poros que son muy buenos conductores de agua, cómo el de la Figura 15. En comparación con la vegetación y microfauna, el laboreo tiende a formar poros de menor tamaño, menos estables y además muchos de los que forma de gran tamaño no están conectados entre sí o con la superficie. Por eso es que las medidas de manejo de suelo que tienden a dejar crecer vegetación o a aumentar la microfauna del suelo son más eficaces que el laboreo en reducir la escorrentía. El efecto de la macroporosidad es mayor en suelos arcillosos en comparación con suelos arenosos, ya que ellos la velocidad de infiltración es baja y hay que aprovechar bien las posibilidades de conducir agua, y su importancia disminuye en suelos con alta densidad aparente, muy compactados donde hay tan poco espacio poroso que importa relativamente poco como se organice [Rawls y Brakensiek, 1989]

5.1.5. Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica también influye sobre la infiltración de agua en el suelo. En primer lugar porque afecta a la densidad del suelo, reduciéndola y por lo tanto aumentando su porosidad. Esto ocurre porque la materia orgánica aumenta la capacidad del suelo de formar agregados de suelo estables, lo que acaban dándole estructura al suelo, cómo la estructura granular mostrada en la Figura 16 en comparación con la masiva de la Figura 17.

Además, estos suelos estructurados son más resistentes a la compactación, lo cual acaba teniendo un efecto positivo sobre la infiltración. También son más resistentes al impacto de la gota de lluvia lo que dificulta su disgregación y los hace menos sensibles al sellado superficial del cual hablaremos un poco más tarde.

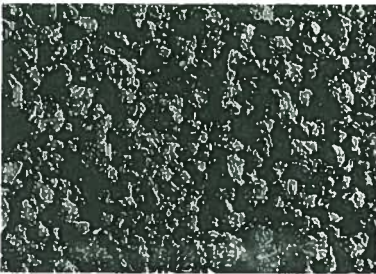


Figura 16: Ejemplo de suelo con estructura granular.
Foto cortesía de NASA-GSFC



Figura 17: Ejemplo de suelo sin estructura y masivo.
Foto cortesía de NASA-GSFC

5.1.6. Cobertura de suelo.

Ya veremos en el apartado de sellado superficial como la cobertura de suelo, debida a la vegetación verde o a sus residuos, reduce el sellado superficial. Esto es

así porque protege físicamente la superficie del suelo de su disgregación debido al impacto de las gotas de lluvia y del arrastre del mismo por la escorrentía. La cobertura del suelo es siempre beneficiosa en términos de aumento de la infiltración, porque además de proteger la estructura del suelo, aumenta la rugosidad del mismo. Este aumento de la rugosidad lo que permite aumentar la cantidad del agua retenida en superficie en microdepresiones formadas por los restos vegetales, de una manera similar a lo que hacia la rugosidad del suelo mostrada anteriormente en la Figura 12. El aumento de la rugosidad también hace que la escorrentía circule más lentamente, comparado con el mismo suelo desnudo, lo que permite que se infiltre más agua.

5.1.7. Limitaciones a la infiltración.

5.1.7.1. Suela de labor.

Hemos hablado de limitaciones a la infiltración. Una bastante común en zonas labradas es la denominada suela de labor, que es una zona de mayor densidad aparente (y por tanto con menor velocidad de infiltración) existente a cierta profundidad en el subsuelo (entre 15-30 cm., aproximadamente). Se sitúa por debajo de la zona labrada, ya que ahí se ha compactado el suelo debido al tránsito de máquinas y aperos, pero no se reducido dicha compactación por la labor al no llegar hasta dicha profundidad, quedando permanentemente compactada, un efecto que puede ser acumulativo año tras año y que en ocasiones es muy evidente como en el ejemplo de la Figura 18. Esa suela de labor puede permanecer varios años después de dejar de labrar el suelo. La magnitud de la reducción en infiltración es muy variable dependiendo de factores como el tipo y propiedades de suelo, la intensidad de tráfico y el momento del mismo, y el sistema de laboreo. La Figura 19 muestra como en esta zona susceptible de desarrollar suela de labor no siempre



Figura 18: Ejemplo de suelo de labor donde no pueden penetrar las raíces.
Foto cortesía de la U. del Estado de Michigan

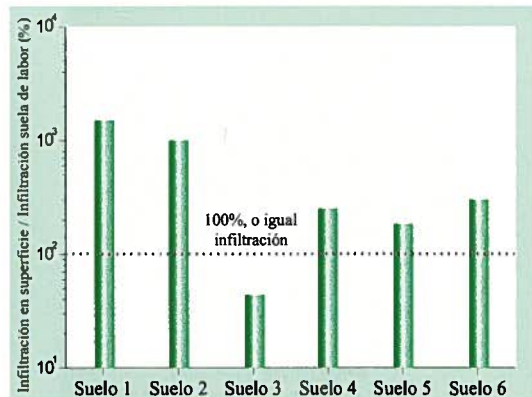


Figura 19: Variación en la infiltración en la suela de labor con respecto a la superficie

tiene porque existir y cuando existe su efecto sobre la velocidad de infiltración es variable. Existen mecanismos en el suelo que la mitigan o eliminan como son los ciclos de expansión en los suelos vérticos.

5.1.7.2. Sellado superficial.

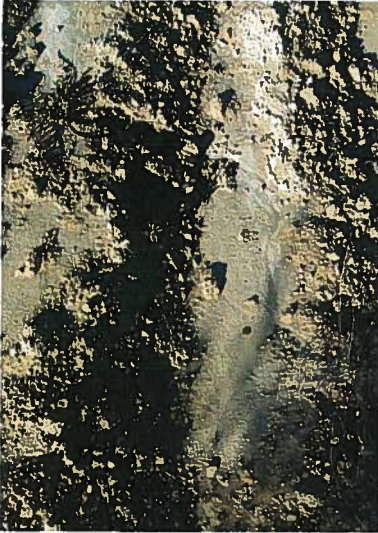


Figura 20: Costra superficial



Figura 21: Material parental con baja velocidad de infiltración asomando bajo una capa somera de suelo arable

Otra limitación es lo que se denomina sellado superficial. Se debe a una capa muy densa de unos pocos milímetros de espesor de materiales finos, limos y arcilla, situados sobre la superficie del suelo formando una costra que reduce mucho la velocidad de infiltración del suelo. Su origen puede ser el depósito de materiales finos arrastrados por la escorrentía, como se ve en las depresiones que aparecen en la Figura 20, o incrustados dentro de los poros del suelo en sus primeros milímetros del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia: Esta costra se desarrolla con rapidez, alcanzando un valor estable tras 50-100 mm de lluvia intensa [Rawls y Brakensiek, 1989; Gómez y col. 1999]. Este sellado superficial es más importante en suelos con contenidos altos de arcilla y limos, superficies muy poco rugosas y suelos desnudos sin ninguna protección al impacto de la lluvia [Rawls y Brakensiek, 1989]. Este proceso ocurre en los suelos agrícolas labrados, y es uno de los motivos por los que el efecto de la labor sobre la infiltración desaparece con el tiempo. El efecto de la rugosidad sobre el sellado superficial explica que el mismo suelo cuando es labrado con aperos que dejen la superficie muy rugosa, que hagan grandes terrones, tarda más en ver declinar su velocidad de infiltración.

5.1.7.3. Horizontes subsuperficiales limitantes.

La tercera limitación a la infiltración más difícil de observar a simple vista es la existencia de horizontes limitantes de la infiltración situados a varios centímetros por debajo de la superficie del suelo. Un ejemplo es la suela de labor que por su importancia ha sido tratada a parte. Otras veces puede ser simplemente que el contenido en materiales finos, arcillas y limos, sean mucho mayores en ese

horizonte subsuperficial y se reduzca la infiltración. Otras veces puede ocurrir, como en el caso de la Figura 21, que la profundidad de suelo agrícola sea muy poca y enseguida se llegue al material parental del la cual se forma el suelo, mucho menos evolucionado y con menos capacidad de infiltrar agua. Esta situación de suelos someros se puede observar con relativa facilidad en las sierras donde los suelos son generalmente menos profundos.

Existen otros aspectos que pueden afectar a la infiltración como es la presencia de partículas orgánicas (que pueden aumentarla o disminuirla), microorganismos, etc.... Pero los anteriormente citados son los más relevantes en nuestro caso, y con ellos se puede entender como afectan los diferentes sistemas de manejo a la infiltración en olivar. Estos factores interactúan entre sí potenciando o anulando el efecto de unos y otros. La Figura 22 ofrece un esquema de los factores anteriormente citados y de su interacción. En ella el signo "+" indica que ese factor aumenta la velocidad de infiltración o el factor al que apunta en el caso de flechas de trazo más fino, y "-" la reduce. Así, la materia orgánica aumenta la velocidad de infiltración directamente y también indirectamente mediante la reducción de la densidad aparente, compactación en el caso de la suela de labor y sellado superficial.

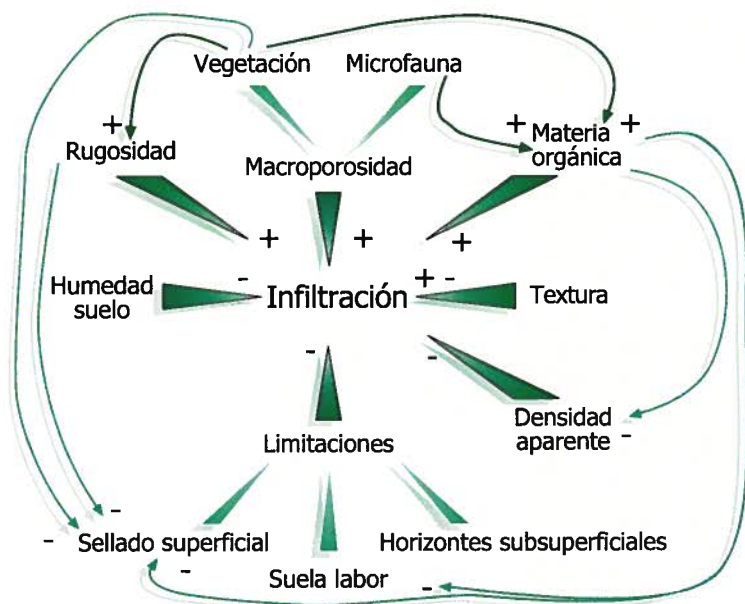


Figura 22: Esquema de factores que afectan a la infiltración. El signo "+" (realimentación positiva) indica que un incremento de ese factor incrementa la velocidad de infiltración o el factor al que apunta si se trata de una flecha de trazo fino, y "-" (realimentación negativa) indica que la reduce.

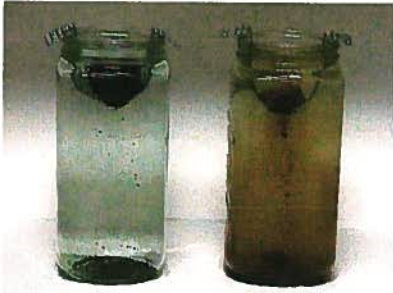


Figura 23: Diferencias en estabilidad de agregados debido a diferencias en materia orgánica.
Foto cortesía del NRCS.

5.2. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO SOBRE LA ESCORRENTÍA.

5.2.1. Laboreo tradicional.

Comencemos analizando el efecto del laboreo tradicional sobre la escorrentía. El laboreo aumenta la porosidad y la capacidad de almacenar agua en superficie y por lo tanto aumenta la infiltración. Su efecto no es permanente, y además del sellado superficial, el suelo se consolida debido al tránsito, al impacto de la lluvia y por su propio peso con el tiempo. Por ello es necesario labrar varias veces durante

la campaña si se quiere mantener una alta tasa de infiltración. Estas labores contribuyen a compactar el subsuelo debajo de las zonas labrada, recuérdese las Figuras 18 y 19, y a reducir la estabilidad de los agregados del suelo. El laboreo reduce a su vez el contenido de la materia orgánica, M.O. del suelo, lo cual a su vez contribuye a disminuir aún más la estabilidad de los agregados, como se ve en la Figura 23, acelerando la consolidación del suelo y favoreciendo el sellado superficial. Si se labra periódicamente es un sistema bastante eficiente para reducir la escorrentía, aunque al precio de incrementar el riesgo de erosión al reducir la estabilidad del suelo antes mencionada. Los suelos labrados son especialmente vulnerables con tormentas que ocurren cuando el efecto de la labor ya ha desaparecido, o cuando estas son tan intensas que su efecto desaparece durante la tormenta, bien por encostramiento de la superficie como pasa en el suelo de la Figura 24, o bien por saturación del perfil hasta llegar a una capa menos permeable. Al



Figura 24: Superficie recién labrada y tras 200 mm de lluvia

labrar además hacemos el suelo más rugoso y se puede almacenar más agua en superficie antes de escurrir. Este efecto es también efímero, pero hasta que hay una tormenta lo suficientemente importante para alisar el suelo el agua almacenada en superficie es una cantidad importante que dependiendo de la labor puede oscilar entre 0.2 y 14 litros por m² (Mohamoud y col. 1990)

5.2.2. No laboreo con suelo desnudo.



Figura 25: Contraste entre laboreo y no laboreo mostrando la mayor compactación y menos rugosidad de la parcela no labrada

Una de las propuestas al laboreo tradicional es el no laboreo con suelo desnudo. Desde el punto de vista físico lo que ocurre es una compactación del suelo, véase la Figura 25, y normalmente también la formación de una costra superficial. Recordemos que esta compactación será más intensa cuanto mayor y más pesado sea el tráfico que haya en el olivar. Este puede ser muy importante en olivares mecanizados como los de las zonas olivareras de Jaén o Córdoba. Además, mucho de éste tránsito ocurre durante la recolección en la que el suelo suele estar húmedo, lo que acentúa la compactación. Otro de los factores que afectarán a esa compactación es la textura de los suelos. Los suelos con una textura que incorpore diferentes tamaños

(como por ejemplo franco-arenoso) serán más susceptibles a la compactación que suelos con una textura muy específica (por ejemplo arenoso), también tenderán más a la compactación cuanto más fina sea su textura. Su contenido en materia orgánica (generalmente bajo en olivar) también afecta a su susceptibilidad a la compactación al condicionar su estabilidad. Mucha de la compactación ocurre en las calles donde se concentra el tráfico, existiendo mucha menos compactación debajo de las copas. Al evitar el desarrollo de vegetación y no existir aportes importantes de materia orgánica, no existe ningún mecanismo para contrarrestar esa compactación en NLD. Los estudios más completos estudiando el impacto del NLD sobre la escorrentía muestran un aumento importante de la escorrentía en comparación con el laboreo [Francia y col., 2000; Gómez y col., 1999] incluso en suelos en los que su carácter vértico haría pensar que la compactación podría mitigarse durante los ciclos de secado y humedecimiento, como el suelo del ensayo mostrado en la Figura 26 elaborada a partir de Gómez y col.a [2003]. Eso no quiere decir que para una tormenta específica una parcela en laboreo convencional con éste degradado no pueda generar tanta escorrentía como el NLD, o más si actúa una suela de labor muy limitante, pero esa es una situación ocurrirá en pocas ocasiones, si ocurre, ya que han de coincidir régimen

de lluvia y labores, y a largo plazo su peso en el balance global se mitiga, como muestra la Figura 26, y los ensayos antes citados.

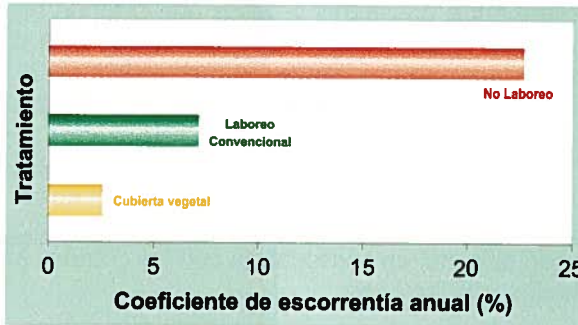


Figura 26: Coeficiente de escorrentía promedio al cabo de tres años de ensayos en un suelo vértico cercano a Córdoba capital

5.2.3. Sistemas mixtos de laboreo.

La disminución de la intensidad del laboreo mediante una serie de sistemas mixtos, bien en extensión, labrando únicamente en el centro de las calles denominado laboreo reducido, o bien en número de labores, denominado laboreo mínimo, supone un intento de establecer un balance entre el aumento de la infiltración y el incremento del riesgo de erosión debido al laboreo. El principal objetivo del laboreo es controlar las malas hierbas, y estos sistemas mixtos se basan en limitar el laboreo al momento y lugar en que es estrictamente necesario. Estos sistemas suelen ir complementados con aplicación de herbicidas, bien residuales o de contacto. En general la zona bajo la copa se compacta mucho menos y en ella el efecto de la labor perdura más, como muestra la Figura 27 [Adaptada de Gómez y col. 1999], por lo que el laboreo reducido a únicamente las calles se justifica de acuerdo a la información experimental disponible. No

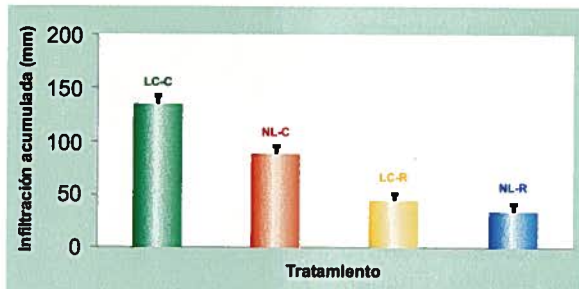


Figura 27: Infiltración acumulada promedio medida tras degradarse la labor en calle, LC-R, y bajo copa; LC-C, comparado con no laboreo en calle, NL-R y bajo copa, NL-C. Las barras indican la desviación estándar.

existen criterios generales en cuanto al número mínimo de labores para que el laboreo reducido sea efectivo. Dependerá de la susceptibilidad a la compactación del suelo, de la climatología del año y de la dinámica de malas hierbas en nuestra parcela, y oscilará entre una y tres veces al año estando concentradas a los momentos en que la mala hierba puede competir con el olivo. Ese es el tipo de decisión que debe tomarse en función de las características de la explotación y que es muy difícil de estandarizar en publicaciones técnicas. Lo que si queda claro, es que dado su efector negativo sobre la estructura del suelo, si parece conveniente reducir las labores al número mínimo necesario para cumplir su función (aumentar infiltración y control de malas hierbas). En el sur de España existe una tendencia hacia una reducción del número de labores, y a utilizar aperos menos agresivos con el suelo, en consonancia con los criterios antes citados que está dando resultados satisfactorios.

5.2.4. Cubiertas vegetales.

Se puede dejar de labrar pero mantener el suelo cubierto mediante una cubierta vegetal. Esta se puede implantar cada año sembrando en otoño y segando (química o mecánicamente) en primavera, o bien manejando las malas hierbas presentes en la explotación con herbicida o desbrozadora, como la mostrada en la Figura 28. El efecto de esta cubierta sobre la infiltración será positivo porque como ya vimos protege del encostramiento superficial y además mejora la infiltración al aumentar la macroporosidad y contribuir al aumento de la materia orgánica. El único proceso que opera a favor de reducir la infiltración con cubiertas es la compactación del suelo que tenderá a aumentar al desaparecer el laboreo. La tendencia combinada de ambos procesos es hacia un aumento de la infiltración y una reducción de la escorrentía en suelos con baja tendencia a la compactación o en fincas con poco tránsito. Cuando el tránsito es muy importante o el suelo es muy sensible a ésta compactación puede llegar a ser excesivo



Figura 28: Desbrozadora de cadenas para manejo de la cubierta vegetal de malas hierbas



Figura 29: Crecimiento de la cubierta limitado por la compactación en una finca cercana a Al-bendin, Jaén

va, limitando el desarrollo de la cubierta y reduciendo la infiltración de manera muy importante, como en el suelo mostrado en la Figura 29. En este caso hemos de considerar la posibilidad de limitar el tránsito a unas zonas determinadas, transitar con el suelo lo más seco posible y/o labrar periódicamente

Otros efectos adicionales de la cubierta vegetal y sus restos son reducir la evaporación desde el suelo, aunque en una zona labrada al cabo de unos días la capa superficial seca tiene un efecto de aislamiento similar y las tasas de evaporación son también reducidas [Ritchie, 1972]. Su efecto sobre la infiltración a través de la mejora de la estructura del suelo mediante un aumento de la materia orgánica parece limitarse a los primeros centímetros del mismo, [Muñoz, 1998]. En el caso de que se utilicen cubiertas inertes, como por ejemplo los restos de poda picados mostrados en la Figura 30, su función es similar siendo su efecto más importante la protección del suelo del impacto de la gota de lluvia. Una cubierta de piedras es otro tipo de cubierta inerte, un ejemplo de la misma aparece en la Figura 31, y tiene un efecto similar ya que debajo de las piedras la porosidad es mayor [Rawls y Brakensiek, 1989].



Figura 30: Picado de restos de poda



Figura 31: Cubierta de piedras cerca de Iznalloz (Granada)

5.2.5. Técnicas de control complementarias al sistema de manejo del suelo.

En otras ocasiones se añaden en combinación con alguno de los manejos anteriores enmiendas a la superficie como son lodos de depuradora o residuos de almazara compostados con el objetivo de aumentar la materia orgánica e indirectamente su estabilidad estructural. Los resultados sobre el contenido de materia orgánica de los primeros centímetros del suelo no son concluyentes [Aguilar, 2001] a las cantidades legalmente permitidas. En general hay un aumento de la estabilidad de agregados aunque el efecto sobre las tasas de infiltración en comparación con un suelo labrado no es significativo en muchas ocasiones [Aguilar 2001]. No obstante este es un área en el que existen diferentes proyectos de investigación en curso que podrán aportar más información en los próximos años.

Otras técnicas adicionales de control de agua y suelos también afectan a la infiltración. El aterrazamiento al reducir la pendiente contribuye a aumentar la infiltración y la capacidad de almacenamiento en superficie. En general cuando más horizontal una superficie más agua puede almacenar una concavidad del terreno, piense en una copa y empiece a inclinarla verá cómo cuanto menos inclinada está la copa más agua almacena. El laboreo en curvas de nivel, como en el ejemplo mostrado en la Figura 32, se beneficia del mismo efecto, aunque si el surco se rompe existe una zona de concentración de escorrentía donde la erosión es mayor. Con esto ocurre como con el laboreo, si esa rotura de surco ocurre raras veces, una vez cada varios años, el efecto global es beneficioso. A medida que la pendiente aumenta llega un momento en el que el laboreo paralelo a las curvas de nivel deja de ser efectivo porque los surcos están muy inclinados y se desbordan fácilmente, y porque como no son perfectamente horizontales cualquier desviación se traduce en pendientes importantes que hace que el agua circule con velocidad y lo socave. Como en el caso del laboreo el efecto es también efímero y los surcos han de rehacerse con el tiempo. En algunas zonas se hace un surco grande en la calle paralelo a las curvas de nivel a fin de aumentar la infiltración, como el que sale en la Figura, 33. Funciona de manera similar al laboreo en surcos paralelos a las curvas de nivel aunque es menos efectivo al almacenar menos agua y es también efímero. El laboreo en curvas de nivel es efectivo cuando se efectúa sobre pendientes y longitudes de ladera moderadas.



Figura 32: Surcos paralelos a las curvas de nivel. Foto cortesía del NRCS.



Figura 33: Surco único paralelo a curvas de nivel

Pendiente %	Máxima longitud de adera (m)
1-2	122
3-5	92
6-8	61
9-12	37
13-16	25
17-20	18
21-25	16

Tabla 1: Tamaño máximo de ladera recomendado para laboreo paralelo a las curvas de nivel.

La Tabla 1, tomada de Troeh y col. [1991], da idea de los límites a partir del cual el laboreo en paralelo a las curvas de nivel deja de ser recomendable porque puede contribuir a la formación de cárcavas.

Las pozas al pie de los olivos son otra manera de aumentar la infiltración aumentando el almacenamiento en superficie. En este sentido los beneficios y riesgos son los de un surco pero de mucho mayor tamaño. Almacena mucho más agua, pero si se rompen el destrozo es mucho mayor. Existe información algo más detallada sobre este sistema y su dimensionamiento en Morales y Pastor [1991]. La idea básica es que pueden dar buen resultado cuando están bien diseñadas para recoger la escorrentía previsible o evacuarlas ladera debajo de manera controlada cuando esta sea muy grande. Hay que rehacerlas periódicamente para rehacer sus bordes y si es posible conviene romper periódicamente la costra que se forma en el fondo de las mismas debido al depósito de los materiales finos que arrastra el agua.

En el caso de sistemas de recolección de escorrentía se trata de aumentar la capacidad de almacenamiento superficial e infiltración en la zona de cultivo, y aumentar la escorrentía superficial en la zona de captación. Como estos sistemas se aplican en zonas con pluviometría menor a la de las zonas olivereras andaluzas, sólo se comentan a modo de anécdota. El resto de medidas de control basadas en el reforzamiento de los cauces tienen un efecto muy pequeño sobre la escorrentía total que sale de la zona explorable por las raíces de los árboles, y no serán abordadas.

5.3. ESTIMACIÓN DE LA ESCORRENTÍA DIARIA PARA UN SISTEMA DE MANEJO DETERMINADO.

En las líneas anteriores hemos visto que se puede determinar cualitativamente cual será la evolución de la escorrentía de acuerdo al sistema de manejo utilizado. Esto no es suficiente, y en numerosas ocasiones necesitamos cuantificarlo y además con una información limitada. Un método que se recomienda aquí a falta de otros métodos fiables es el del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos del los EEUU [USDA-SCS, 1972]. Este método está pensado para calcular la escorrentía diaria a partir de la precipitación diaria en base a una ecuación con un único parámetro, el número de curva a partir de aquí denominado CN, que puede ser estimado a partir de las características básicas del suelo y de la explotación de manera relativamente simple.

Este método se basa en que experimentalmente se comprobó que la escorrentía diaria, y por la tanto el número de curva necesario para calcularla, depende del tipo de suelo, de su contenido de humedad, de su condición hidrológica y del manejo o uso del suelo. Estos números de curva están tabulados y aparecen en diferentes publicaciones [por ejemplo ASCE, 1996; Villalobos y col. 2002]. El Anexo 1 recoge los valores sugeridos por el SCS.

Una vez determinado el CN correspondiente se calcula la retención máxima, $0.2 S$, que es la cantidad de lluvia que el terreno puede absorber o retener en su superficie antes de que empiece a escurrir. S se determina de acuerdo a la Ecuación 1, donde las unidades de S son mm:

Ecuación 1

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

Si la lluvia diaria, P (mm), es menor que $0.2 S$ se considera que la escorrentía superficial es cero. Si es mayor, la escorrentía diaria, R (mm), se calcula de acuerdo a:

Ecuación 2

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

Para usar este método es necesario conocer la lluvia diaria, y a continuación determinar el número de curva correspondiente a la situación de interés para aplicar las ecuaciones 1 y 2. Para ello primero debemos primero clasificar el suelo de acuerdo a una de las cuatro categorías que establece el SCS:

Grupo A: Suelos con alta velocidad de infiltración cuando están saturados. Son generalmente suelos profundos, bien drenados y de textura arenosa o franco-arenosa. Su velocidad de infiltración en saturación es superior a 7.72 mm h^{-1} .

Grupo B: Suelos con velocidad de infiltración moderada en saturación. Son generalmente suelos de profundidad media, bien drenados y de textura franca o franco-limosa. Su velocidad de infiltración en saturación está comprendida entre 3.81 y 7.72 mm h^{-1} .

Grupo C: Suelos con baja velocidad de infiltración en saturación. Son generalmente suelos con una capa que limita el flujo de agua y de texturas finas. Su velocidad de infiltración en saturación está comprendida entre 1.27 y 3.81 mm h^{-1} .

Grupo D: Suelos muy baja velocidad de infiltración. Son generalmente suelos arcillosos de carácter expansible, suelos con una limitación a la infiltración muy cercana a la superficie o muy poco profundos y sobre un material parental muy poco permeable. Son normalmente suelos de texturas finas. Su velocidad de infiltración en saturación es inferior a 1.27 mm h^{-1} .

En segundo lugar es necesario conocer el estado de humedad del suelo en el momento de la lluvia. El método del SCS considera tres estados: seco I, CN_I , promedio II, CN_{II} , y húmedo III, CN_{III} . El método más simple de determinar este es-

tado es de acuerdo a la lluvia caída en los cinco días anteriores. Cuando no hay vegetación, o ésta está en un estado durmiente el suelo se encontrará en estado I si la lluvia caída ha sido inferior a 13 mm, en estado III si ha sido superior a 28 mm y en II si ha sido intermedia. Si la vegetación está en una época en la que la transpiración de la misma es importante, para considerar que está en el estado I la precipitación ha de ser inferior a 36 mm, y para estar en estado III superior a 53 mm. Salvo que se indique lo contrario, los CN que vienen en las tablas corresponden siempre a la condición II. CN_{III} y CN_I pueden calcularse a partir de la relación entre CN_{II} , CN_I y CN_{III} que aparece en el Anexo 1.

En tercer lugar es necesario saber el tipo de uso y manejo del suelo. El método original no propone CN específicos para el olivar. Lo que se puede hacer es buscar en sus tablas aquello más parecido a nuestra situación o utilizar CN desarrollados específicamente para el olivar en base a ensayos experimentales y análisis con modelos de simulación como veremos más adelante.

En cuarto y último lugar es necesario incorporar el efecto de la pendiente, ya que a mayor pendiente la escorrentía superficial será mayor. Los números tabulados del Anexo 1 corresponden a una pendiente del 5%. Para pendientes diferentes el CNII se pueden corregir de acuerdo a la Ecuación 3 donde la pendiente, S , está expresada en porcentaje.

Ecuación 3

$$CN_{II S} = \frac{1}{3}(CN_{III} - CN_{II})[1 - 2e^{-0.1386S}] + CN_{II}$$

EJEMPLO 1 Cálculo de la escorrentía en un olivar.

Calcularemos cual será la escorrentía para una parcela concreta de olivar, y determinaremos la misma para diferentes sistemas de manejo de suelo, ilustrando cómo afectan estos sistemas a la generación de escorrentía. Para nuestros cálculos utilizaremos los números de curva recogidos en la Tabla 2, desarrollados específicamente para olivar a partir de un modelo de simulación de escorrentía con base física. Este modelo es capaz de calcular la infiltración teniendo en cuenta diferencias en propiedades de suelo, pendiente, marco de plantación y efecto del manejo sobre la infiltración habiendo sido validado para olivar [Gómez y col.b, 2002]. A partir de él se determinó la relación entre precipitación y escorrentía para diferentes manejos, suelos y condiciones antecedentes de humedad de suelo, y con estos valores de precipitación y escorrentía para cada manejo se ajustaron los números de curva correspondientes. Los valores de dicha Tabla constituyen un método razonado para cuantificar las diferencias en escorrentía para diferentes manejos de suelo en olivar. En nuestro ejemplo se trata de una parcela de olivar con una pendiente del 5%, con un suelo franco arcilloso, clase C, con olivar a 8x8-m con copas de 4.5-m de diámetro.

		Suelo C					
		6% suelo cubierto por la copa			25% suelo cubierto por la copa		
		CN _I	CN _{II}	CN _{III}	CN _I	CN _{II}	CN _{III}
NL	No Laboreo	91	92.5	94	90	92	94
LC _{Deg-SL}	Laboreo, degradado, suela de labor	89	91	93	88	90	92
LC _{Deg}	Laboreo, degradado	89	91	93	85	88	91
CC2 _{pobre}	Cubierta 2m, mal imp.	88	90	91	83	87	90
CC4 _{pobre}	Cubierta 4m, mal imp.	85	88	90	80	84	89
LC _{Rec-SL}	Laboreo reciente, suela labor	85	87	88	78	82	86
LC _{Rec}	Laboreo reciente.	85	86	87	78	82	85
CC2 _{bueno}	Cubierta 2m, bien imp.	84	87	90	78	84	89
CC4 _{bueno}	Cubierta 4m, bien imp.	79	84	89	74	81	88

Tabla 2 Valores sugeridos para el CN para un suelo C en olivar

Supondremos una lluvia de 45 mm en un día que cae tras tres días en los que se recogieron 40 mm y también calcularemos la escorrentía para la misma lluvia cayendo tras una semana sin caer ni una gota de lluvia. Los resultados se resumen en la Figura 34

Como puede apreciarse en la Figura 34 el manejo induce diferencias muy importantes en la escorrentía generada. El laboreo es bastante eficiente en reducir la escorrentía cuando no está degradado, y la cubierta también, especialmente cuando cubre una superficie importante de la parcela y está bien implantada. También se ve como el no laboreo con suelo desnudo genera la mayor escorrentía. Estas diferencias repetidas para cada una de las lluvias de la campaña acaban representando diferencias significativas en escorrentía entre manejos, tal y como se mostró en la Figura 26.

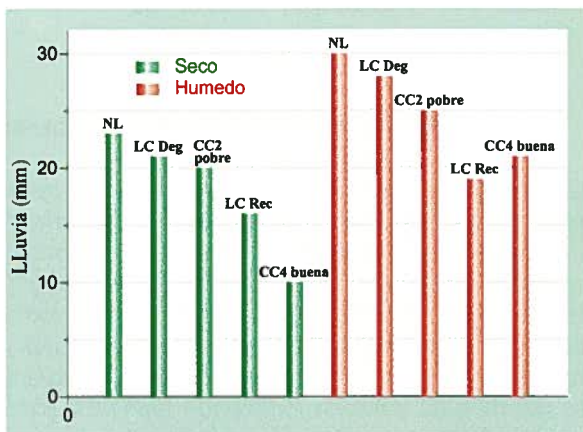


Figura 34: Escorrentía calculada de acuerdo al CN para diferentes manejos y humedad inicial para la lluvia de 40 mm

5.4. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE ESCORRENTÍA MÁXIMO.

En numerosas ocasiones lo que nos interesa no es únicamente la escorrentía total, sino también el caudal máximo que generará un área determinada. Este valor es necesario cuando queramos diseñar estructuras para evacuar el exceso de escorrentía como son zanjas o canales de evacuación, o aliviaderos, que deben construirse pensando en que sean capaces de transportar sin deteriorarse o desbordarse el agua que previsiblemente pueda pasar por ellos. Un método que podemos utilizar es el método racional [Hudson, 1981], que se recomienda para cuencas de hasta 80 Ha. De acuerdo a este método el caudal punta vendrá dado por la Ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4} \quad q_p = 0.0028 C I A$$

Donde q_p es el caudal máximo en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, C el coeficiente de escorrentía mm mm^{-1} , A el área de cuenca en ha; e I la intensidad de lluvia, mm h^{-1} , para el periodo de retorno escogido y por una duración igual a la del tiempo de concentración de la cuenca. Los valores de C han sido tabulados para diferentes tipos de suelo y manejo por diferentes autores. Una de esas tabulaciones aparece en el Anexo 2.

En hidrología se entiende por periodo de retorno de T años de una variable aquel valor de esa variable que en promedio es superado cada T años. Así una lluvia diaria con periodo de retorno de 5 años es aquella que en promedio se supera cada 5 años. Periodos de retorno cada vez mayores implican valores más grandes de la magnitud en cuestión. La selección de éste periodo de retorno depende de la función y coste de la estructura diseñada de acuerdo a criterios coste-beneficio, ya que a mayor periodo de retorno corresponden tamaños mayores de la estructura. Por tiempo de concentración de una cuenca se entiende el tiempo necesario para que una gota de agua que va con la escorrentía superficial fluya desde el punto más alejado de la cuenca hasta su salida, una vez que toda la cuenca está generando escorrentía. Puede determinarse de acuerdo a la Ecuación 5 del SCS [USDA-SCS, 1972].

$$\text{Ecuación 5} \quad T_c = 0.00526 \left(\frac{L}{0.305} \right)^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7} S^{-0.5}$$

Donde T_c es el tiempo de concentración en minutos, CN el número de curva de la cuenca, S es la pendiente media de la cuenca en m m^{-1} , y L es la distancia recorrida por la escorrentía superficial desde el punto más alejado de la cuenca en m.

EJEMPLO 2: Cálculo del caudal punta en un olivar.

Utilizaremos el mismo olivar usado en el ejemplo anterior, epígrafe 5.3.1. Además de los datos que allí aparecen es necesario saber que el olivar tiene una extensión de 60 ha, que son drenadas por un único arroyo y que la distancia máxima desde el punto más alejado hasta la desembocadura de este cauce son 1600 m. En el queremos construir un desagüe para un paso que se inunde con una frecuencia menor de una vez cada 5 años. Nos interesa conocer el caudal punta para dos manejos de suelo diferente, no laboreo con suelo desnudo y cubierta extensa de 4 metros de ancho.

Los tiempos de concentración calculados para NLD y $CC4_{buena}$ usando un CNIII de la Tabla 1 son 31 y 40 minutos. Para Córdoba eso se traduce en valores de I de 38.1 y 33 mm h⁻¹ para NLD y $CC4_{buena}$ respectivamente para un periodo de retorno de 5 años. Ya que no existen hasta la fecha valores de C desarrollados para el olivar, escogemos del Anexo 2 aquellos que se asemejan lo más posible a nuestras condiciones. Para NLD el valor de C escogido es 0.7 ya que es el sistema que más escorrentía genera (véase la Figura 35) y para $CC4_{buena}$ el valor escogido fue 0.4, un valor similar a la escorrentía observada en el ejercicio de la Figura 35. Con esos valores los caudales punta calculados a partir de la Ecuación 4 son 4.48 y 2.5 m³ s⁻¹ respectivamente para NLD y $CC4_{buena}$ es relativamente grande, e indica como un cambio en el manejo de suelo, NLD, puede dejar obsoletas estructuras de desagüe o manejo de la escorrentía que funcionaron eficientemente bajo las condiciones previas. Coma habría sido el caso en nuestro ejemplo si por algún motivo pasásemos de $CC4_{buena}$ a NLD.

6. IMPACTO DEL MANEJO DE SUELO SOBRE EL USO DE AGUA EN OLIVAR.

6.1. EVAPORACIÓN.

La modificación del manejo de suelo afecta no sólo a la entrada de agua en el suelo, por infiltración, sino también en la salida de agua del mismo, a través de la evaporación del agua desde la superficie del suelo y la transpiración de la cubierta vegetal. Para entender como afecta el manejo de suelo al uso de agua en el olivar es útil comenzar conociendo cómo funciona el proceso de evaporación de agua desde el suelo. Según Ritchie [1972] la evaporación desde un suelo desnudo ocurre en dos fases. La primera, Fase I, depende de la energía disponible para evaporar agua, que aporta la atmósfera, y no de las propiedades del suelo. Una medida de esa energía disponible es la evaporación potencial, que es una medida de la cantidad de agua que para unas condiciones atmosféricas determinadas de radiación, viento y temperatura, puede evaporar un suelo que está siempre húmedo. Durante esta Fase I el agua evapora libremente desde la superficie del suelo a una velocidad que es la evaporación potencial, estando en

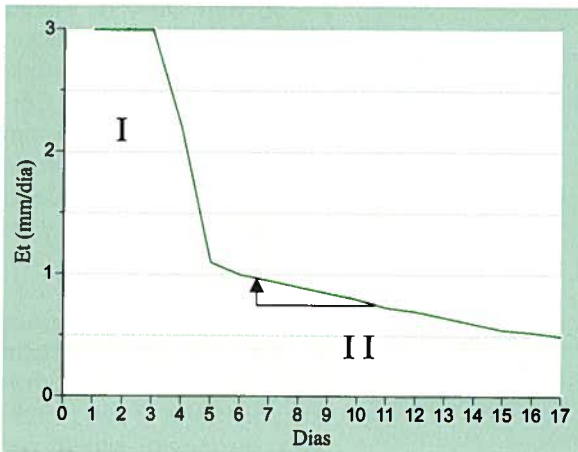


Figura 35: Modelo de evaporación en dos fases, una constante I y otra decreciente con el tiempo II. La flecha demuestra el aumento en la tasa de evaporación al labrar y volver al contenido de humedad en superficie que había algunos días antes.

esta Fase I mientras el suelo está por encima aproximadamente de la capacidad de campo. Después de esta fase, entramos en la Fase II en la que la tasa de evaporación se reduce proporcionalmente al cuadrado del tiempo transcurrido desde que se abandonó la Fase I. La Figura 35 muestra gráficamente la evolución de la evaporación desde un suelo tras una lluvia. Matemáticamente, la Fase II se describe de acuerdo a la Ecuación 6.

Ecuación 6
$$\sum E_s = \alpha t^{-0.5}$$

Donde t es el tiempo desde que abandona Fase I, comenzando a contar desde un valor t_i despejado a partir de α y de U, cantidad que se evapora en Fase I, Ecuación 7. La duración de la Fase I dependerá de la evaporación potencial que determinará cuanto se tarda en agotar la cantidad U antes de llegar a Fase II.

Ecuación 7
$$t_i = \left(\frac{U}{\alpha}\right)^2$$

Como vemos los dos únicos parámetros de este modelo son α y U, y ambos dependen de la textura del suelo y de su densidad aparente. Con este modelo no es difícil estimar la variación de la humedad en el perfil asumiendo que la evaporación seca sólo la capa superior del perfil. Generalmente se considera en los cálculos que el agua disponible para evaporación desde el suelo es la de los primeros 10-15 cm del perfil [Allen y col., 1998]. Este modelo se puede utilizar para entender las diferencias en evaporación entre laboreo y no laboreo. Los parámetros α y U se pueden calcular a partir de la textura y densidad aparente a través de su relación con la conductividad hidráulica subsaturada a -0.1 bares [Ritchie, 1972]. Para un suelo arcilloso y labrado los valores de U y α son 9.4 mm y 4.2 mm día⁻¹, y para el mismo suelo no labrado los valores de U y α son 9. mm

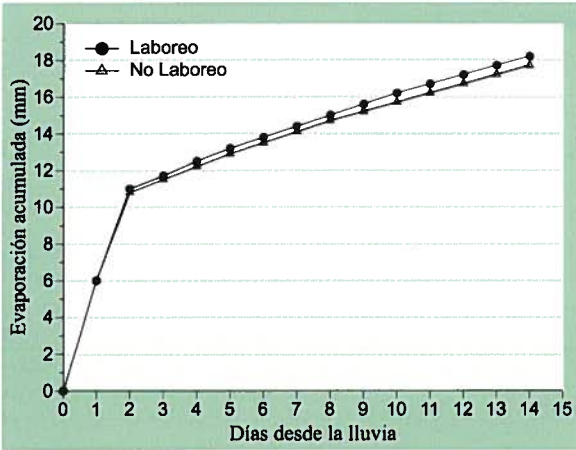


Figura 36: Evaporación calculada para el mes de Junio en Córdoba desde un suelo arcilloso desnudo labrado y sin labrar, mostrando diferencias muy pequeñas

labrado y uno no labrado [Mwendera y Feyen, 1997] En cualquier caso todo apunta a que las diferencias son pequeñas ya que lo que ocurre al secarse el suelo bajo ambos sistemas es que la capa superior ya seca hace de aislante a la evaporación del agua que queda por debajo de ellas.

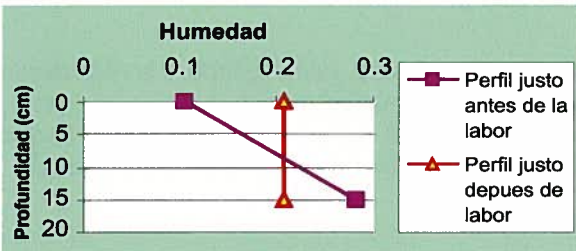


Figura 37: Homogeneización de la humedad del perfil

se han ido secando, con capas inferiores más húmedas con lo que nos desplazamos hacia atrás en la curva de evaporación (miren la flecha de la Figura 35 y piensen en que al labrar volvemos a tener en superficie la humedad que había hace algunos días, que será lo que determine la tasa de evaporación) permitiendo que se evapore más agua.

Para el ejemplo de la Figura 38, una labor en el octavo día supone homogeneizar la humedad en los primeros 15-cm, Figura 37. Eso supone romper la capa aislante en superficie y volver al estado que existía cuando el suelo había alcanzado en su superficie esa humedad, en nuestro ejemplo al 4º día. El resultado es

y 4.05 mm día⁻¹. La Figura 36 muestra la evaporación acumulada para un periodo de 14 días de Junio en Córdoba, con una ETO de 6-mm día⁻¹ después de una lluvia abundante que humedeció los primeros 15 centímetros del perfil del suelo. Como vemos la diferencia al cabo de 10 días es pequeña, unos 0.5-mm. Ese valor no está lejos de los 2-mm mostrados por Pastor y col. [1999] para un suelo similar en Junio. Ensayos en laboratorio han mostrado también diferencias pequeñas en evaporación entre un suelo

Una situación diferente ocurre cuando se labra un suelo con un contenido apreciable de humedad (lo que suele ocurrir cuando se dan labores a la salida del invierno o en primavera). En este caso lo que ocurre es que labrando se homogeneiza la humedad de los primeros centímetros, Figura 37, que ya

que se vuelve a acelerar la evaporación desde el suelo, aumentando las diferencias entre sistemas. Eso se ve gráficamente en la Figura 38 donde se representa el efecto de una labor a los 8 días de una lluvia que humedeció los primeros 15 cm del perfil en Marzo en Córdoba (ETo 3 mm día). Al cabo de 15 días la diferencia entre el suelo labrado y el que no lo fue son 6.0-mm. Esta diferencia es aproximadamente la misma que se puede calcular a partir de la Figura 8.11 de Pastor y col. [1999] cuando consideramos las diferencias a partir de la humedad de los primeros 15-cm que es la capa de suelo fundamentalmente afectada por la evaporación [Allen y col., 1998].

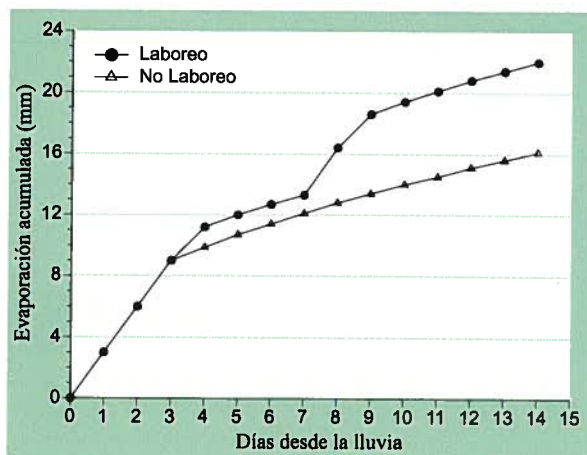


Figura 38: Comparación de la evaporación desde un suelo arcilloso labrado al 8º día y no labrado, en Córdoba durante Marzo

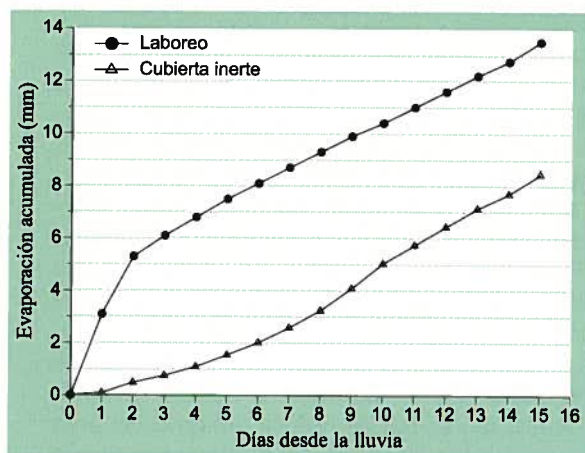


Figura 39: Evaporación calculada desde un suelo arcilloso desnudo o cubierto con residuos para el mes de Marzo en Córdoba

Disponer de una capa de residuos sobre la superficie reduce la evaporación en comparación con el suelo desnudo los primeros días y la aumenta ligeramente al cabo de varios días después de la lluvia, ya que el suelo bajo la cubierta está más húmedo. La evaporación de un suelo cubierto por residuos se puede estimar a partir de los datos de Chung y Horton [1987], con los que se ajustó la Ecuación 8:

Ecuación 8

$$E_r = 0.1524 D - 0.1238$$

Donde E_r es la relación entre la evaporación desde el suelo bajo la cubierta de residuos dividido por la evaporación desde el suelo desnudo, y D es el número de días desde la lluvia. A partir de $D=10$, E_r es igual a 1.4.

Con ella se puede calcular las diferencias entre un suelo con un 100% de cobertura de residuos y un suelo labrado para condiciones similares a las de la Figura 38 en no laboreo. El resultado aparece en la Figura 39, donde se ve cómo las diferencias con el laboreo son importantes.

6.2. TRANSPIRACIÓN DE LA CUBIERTA.

El poseer una cubierta vegetal tiene un coste en términos de consumo de agua, ya que ésta necesita transpirar para crecer. Para que la estrategia sea exitosa en nuestras condiciones se trata de hacerla crecer en invierno cuando el balance entre precipitación y evapotranspiración es positivo, eso es hay más precipitación que evapotranspiración, y se-

garla cuando comienza la primavera y la transpiración de la cubierta se aumenta y supera a la precipitación disponible. El problema en un clima mediterráneo es que con la elevada variabilidad de las precipitaciones entre años este momento de siega óptimo varía de año en año [Villalobos y col., 2002]. Determinar la transpiración de la cubierta en la calle no es fácil ya que existen una serie de condicionantes como el sombreo de los árboles y fenómenos micro-

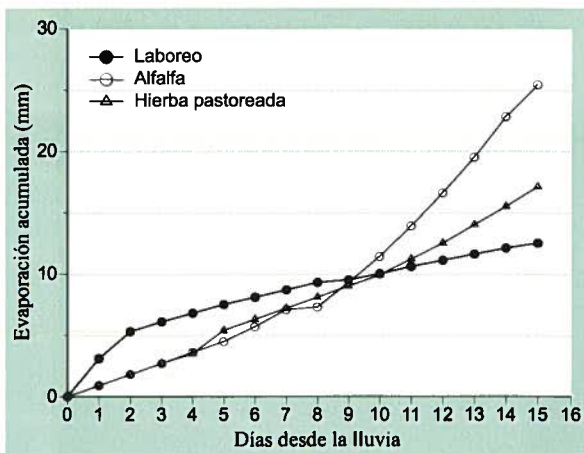


Figura 40: Evapotranspiración calculada desde un suelo arcilloso en Córdoba en laboreo y con dos tipos de cubiertas

los complican con respecto al de una cubierta homogénea. De hecho existen diversos proyectos de investigación en curso que persiguen conocer mejor el consumo de la cubierta entre árboles. Para ilustrar las diferencias en la humedad del suelo que puede inducir una siega mal llevada a cabo, bien porque la aplicación de herbicida fue inadecuada o porque debido a las condiciones ambientales la cubierta rebrotó se presenta la Figura 40 para dar idea del orden de magnitud de las diferencias. La evapotranspiración de la cubierta, ET_c , se calculó de acuerdo al método de los coeficientes de cultivo [Allen y col., 1998]. Para incorporar la incertidumbre debido a los fenómenos antes comentados se consideró dos extremos: que la cubierta transpiraba como una alfalfa (que sería la máxima transpiración esperable) o como una cubierta extensiva pastoreada (que sería el mínimo esperable). Como se ve en la Figura 43 las diferencias con respecto al suelo labrado comienzan a ser importantes en pocos días, y justifica la práctica de numerosas explotaciones en las que siegan más de una vez en primavera en función del rebrote de la cubierta. Los resultados presentados en este ejercicio se refieren a litros de agua evapotranspirado por m^2 de cubierta. Obviamente la transpiración de la cubierta en una plantación se puede reducir limitando el área ocupada por la misma, disponiéndola en bandas de diferente anchura. Esa puede ser la estrategia más conservadora, junto con fechas de siega temprana, cuando se comience a manejar un olivar con cubierta vegetal, aumentando la super-

ficie, o retrasando la fecha de siega en función de la lluvia caída a medida que nuestra experiencia en su manejo aumente.

Esta competencia por el agua de suelo entre la cubierta de las calles y el árbol puede limitar significativamente la transpiración del árbol al reducir el agua disponible para la misma y consecuentemente la producción. La Figura 41 (Mark Battany, comunicación personal, para marco de 8x8-m 25% de cobertura de suelo por la copa en Córdoba y cubierta de 4-m de anchura) muestra como varía la transpiración del olivo (calculada a través de un modelo de simulación) con el uso de una cubierta vegetal. Va desde un aumento al haber más agua disponible debido a una mayor infiltración y una siega en fecha adecuada hasta una reducción en el caso de una siega muy tardía, y como esas diferencias son mayores en años promedio o húmedos.

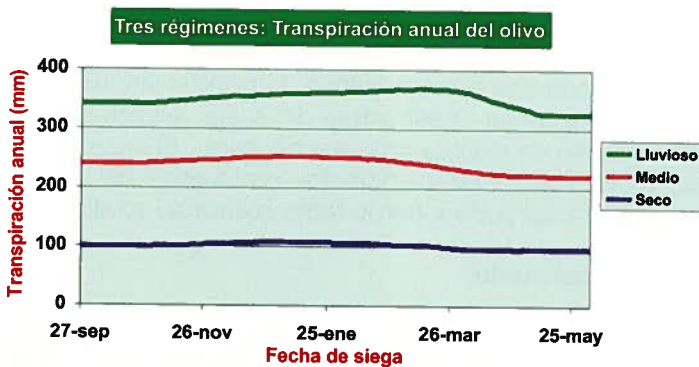


Figura 41: Transpiración anual del olivo calculada para Córdoba capital en función de la fecha de siega de la cubierta y del régimen pluviométrico del año

La sensibilidad de una plantación a la competencia de la cubierta vendrá dada no solo por las condiciones climáticas de la zona y el manejo de la cubierta, si no también por el marco de plantación y los volúmenes de copa, siendo en general menos sensibles a medida que el marco es mayor y los volúmenes más pequeños.

7. EROSIÓN HÍDRICA.

7.1. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA.

Como ya se comentó, la escorrentía y la erosión están íntimamente relacionados, y una de los métodos más eficaces de reducir la pérdida de suelo es reduciendo la escorrentía. Por lo tanto todos los aspectos comentados en el apartado 5 que afectaban a la escorrentía afectan de manera más o menos directa a la erosión hídrica.

7.1.1. Textura.

Además de afectar a la infiltración, algunas variables mencionadas en el apartado 5 tienen un impacto directo sobre la erosión, como es el caso de la textura. La erodibilidad de un suelo, entendida como la susceptibilidad de ese suelo a ser erosionado por el agua de escorrentía y la lluvia de acuerdo a Wischmeier y Smith [1978], viene determinada fundamentalmente por la textura del suelo, además de la estructura, contenido de materia orgánica y velocidad de infiltración. Cuanto mayor sea su contenido de limo y arena fina mayor será su erodibilidad. Como comentamos la textura es una variable que no se puede modificar de manera significativa mediante el manejo, por lo que para reducir la erodibilidad de un suelo hemos de recurrir a modificar alguno de los otros factores que la afectan.

7.1.2. Contenido de materia orgánica y estructura.

A medida que un suelo desarrolla agregados con mayor estabilidad estructural, aumenta su resistencia a la erosión hídrica. El laboreo intensivo y la compactación contribuyen a degradar la estructura del suelo, así como las prácticas que reducen el contenido en materia orgánica del suelo. El incremento de la materia orgánica, especialmente en los primeros centímetros del suelo contribuye a mejorar la estructura del suelo y por lo tanto reducir su erodibilidad.

7.1.3. Humedad del suelo.

La erosión hídrica también se ve afectada por el grado de saturación del suelo siendo mayor, a igualdad de los otros factores, a medida que el suelo está más saturado. En nuestras condiciones las zonas de acumulación de humedad suelen ser las zonas bajas donde la pendiente es menor y ese efecto puede quedar enmascarado. Pero el efecto de la humedad es bien claro en las lluvias intensas sobre un perfil recién labrado donde existe una limitación en profundidad a la infiltración, como una suela de labor o un material menos permeable como el mostrado en la Figura 42. También en zonas de vaguada. En todas estas situaciones ambas en las que el agua de escorrentía fluye sobre suelo completamente saturado en los primeros decímetros de profundidad, y es más fácil de arrastrar.



Figura 42: Suelo arrastrado por encima de la interfase con el material parental de menor tasa e infiltración

7.1.4. Cobertura de la superficie del suelo.

Una de las maneras más efectivas de reducir la erosión es cubriendo la superficie del suelo. Esto se puede conseguir de numerosas maneras bien con cubiertas vegetales y sus rastrojos, residuos de poda, compost, etc....En todos los casos se produce en primer lugar una protección del suelo frente al impacto de la lluvia lo cual evita la disgregación de los agregados y el arranque de partículas de suelo por impacto. En segundo lugar protege en suelo del arrastre por el agua que circula sobre él. Además, disponer de vegetación o de una cubierta de rastrojo o residuos sobre el suelo aumenta la rugosidad hidráulica de la superficie haciendo que el agua circule más despacio, lo cual reduce también la capacidad del agua de escorrentía de arrancar suelo y transportarlo. Como ya se comentó antes, esta protección del suelo se puede obtener también con materiales locales como piedras o artificiales y usarse en toda la parcela, como aparece en las Figuras 30 y 31, o si es muy difícil o caro de obtener únicamente en las zonas de acumulación de escorrentía donde hay mayores problemas de erosión.

7.2. TÉCNICAS DE CONTROL COMPLEMENTARIAS AL SISTEMA DE MANEJO DEL SUELO.

7.2.1. Terrazas.

Reducir la velocidad del agua de escorrentía es una de las vías de eliminar o reducir los daños debido a la erosión hídrica. El aterrazamiento en alguna de las modalidades comentadas anteriormente es uno de los mecanismos más efectivos de reducirla, al obligar a circular el agua sobre una pendiente muy pequeña aumentando la posibilidad de que esta infiltre y reduciendo su capacidad erosiva. Existen diferentes tipos de terrazas resumidas en la Tabla 3 adaptada de Morgan [1997].

En este tipo de medidas en las que se reconduce el agua de zonas que pueden ser muy amplias los caudales reconducidos pueden ser grandes, y se ha de tener especial cuidado en no hacerlas demasiado grandes para evitar que el agua recolectada llegue a poseer un poder erosivo excesivo. Igualmente se debe proteger las zonas de desagüe de dichas terrazas para que en ellas no se produzca erosión, como ocurrió en la cuneta de la Figura 43. Esta protección debe ser mayor cuanto mayor sea el área de la terraza. La Tabla 4 [Hudson, 1981] da idea del tamaño máximo recomendada para terrazas. El espaciamiento entre terrazas se puede abordar siguiendo diferentes fórmulas, algunas de las cuales se recogen en el Anexo 3.

TIPO	DESCRIPCIÓN
Terraza de drenaje	Interceptan agua de la parte superior de las laderas y la canalizan hacia la salida adecuada. Tienen una ligera pendiente en relación con las curvas de nivel.
Tipo Magnun	Formadas tomando tierra de ambos lados del lomo.
Tipo Nychols	Formadas tomando tierra sólo de la parte superior del lomo.
Tipo anchas	Lomo y canal ocupan una anchura de 15-m.
Tipo estrechas	Lomo y canal ocupan una anchura de 3-4 m.
Terrazas de absorción	Son terrazas en suelo a nivel utilizadas para almacenar agua sobre la ladera.
Bancales	Series alternativas de plataformas y taludes para cultivar en laderas abruptas. Los taludes se refuerzan, a menudo, con piedras u hormigón. Diferentes diseños para mejorar el almacenamiento de agua o acomodar los cultivos herbáceos o leñosos.
Terrazas <i>fanja ju</i>	Terrazas formadas excavando una zanja a nivel y echando la tierra hacia la parte superior de la pendiente para formar un terraplén.

Tabla 3: Clasificación de terrazas.

Longitud máxima	
Normal	250-m (suelos arenosos) a 400-m (suelos arcillosos).
Absoluta	400-m (suelos arenosos) a 450-m (suelos arcillosos)
Pendiente máxima	
Primeros 100-m	1:1000
Segundos 100-m	1:500
Terceros 100-m	1:330
Cuartos 100-m	1:250
Pendiente constante	1:250
Pendiente del terreno	
Terrazas de drenaje	Recomendados para pendientes de hasta 12%.
Terrazas de absorción	Recomendados para pendientes de hasta 8%
Bancales	Recomendados para pendientes entre 12 y 58%.

Tabla 4: Límites de tamaño y pendiente del terreno para terrazas.

7.2.2. Laboreo en curvas de nivel.

Si se opta por el laboreo en curvas de nivel se ha de ser consciente de que cuando el surco se rompe, por socavamiento debido al agua que circula a través de él, o se desborda se produce un incremento de la erosión debido al pulso súbi-



Figura 43: Socavamiento inducido por la acumulación de escorrentía debida a la cuneta de un carril



Figura 44: Sedimentación en una barrera construida con malla metálica



Figura 45: Bancal en olivar de sierra

to de agua que pasa por la zona de rotura. Esto ocurre en lluvias muy intensas, que pueden ocurrir muy esporádicamente, o bien regularmente porque el surco sea muy largo y conduzca mucha agua. Esto impone límites a las zonas donde este laboreo en curvas de nivel es efectivo, como ya se comentó en el epígrafe 5.2.5. en la Tabla 1. Los surcos tampoco pueden ser demasiado largos. De acuerdo a los criterios de National Resources Conservation Service [2000] la longitud máxima del surco para pendiente media del terreno menor del 2% es 240-m, mientras que para pendientes entre 8 y 12% es de 41 m.

Al reducir la velocidad del agua se reduce también su capacidad de transportar sedimento, esto es claramente observable en las zonas donde la pendiente se reduce al pie de las laderas. Cuando se instalan barreras en los cauces con este fin, como en el ejemplo mostrado en la Figura 44, se obtiene el efecto adicional de reducir la pendiente del cauce al sedimentarse en él parte del suelo perdido en otras zonas de la finca. Lo mismo ocurre con bancales que recogen el agua de zonas en pendiente aguas arriba, Figura 45. Las pozas funcionan conceptualmente como el laboreo en surcos paralelos a las curvas de nivel, en especial si están encañadas, almacenando agua y sedimentos de zonas aguas arriba a la vez que incrementando el riesgo de erosión si se rompen.

7.2.3. Concentración del agua de escorrentía.

Las zonas de concentración de agua, al aumentar la velocidad de la misma, son zonas de riesgo desde el punto de vista



Figura 46: Reguero formado a partir de una pequeña depresión del terreno

de la erosión. Todas las zonas donde se concentre la escorrentía como son las depresiones del terreno, como en la Figura 46, las rodadas de maquinaria, como en la Figura 47, las vaguadas o los canales de desagüe son zonas especialmente sensibles a las que habrá que prestar atención especial. En ellas es de esperar que cuando haya escorrentía y sin medidas adecuadas el agua las erosione. Lo que ocurre en estos casos es que al erosionarse y bajar el nivel del suelo los problemas se magnifican, porque esa zona drenará cada vez un área mayor y además puede empezar a tener deslizamientos de las paredes de la cárcava formada aumentando más aún su tamaño.

La Figura 48 resume la influencia de los diferentes factores antes comentados sobre la erosión hídrica, así como la interacción entre algunos de ellos.



Figura 47: Reguero en rodadas de tractor

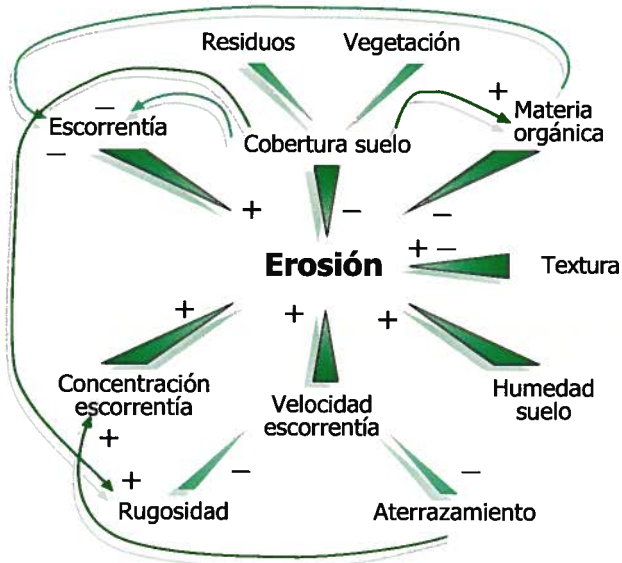


Figura 48: Esquema de factores que afectan a la erosión hídrica. El signo "+" indica que un incremento de ese factor incrementa la erosión o el factor al que apunta si se trata de una flecha de trazo fino, y el signo "-" indica que la reduce.

7.3. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DE SUELO SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA.

7.3.1. Laboreo tradicional.

Comencemos por analizar el laboreo tradicional. El suelo recién labrado reduce enormemente la escorrentía al aumentar la infiltración y la capacidad de almacenamiento, a la vez que reduce la velocidad del agua. Desde ese punto de vista es muy efectivo para lluvias pequeñas o moderadas, siempre que no se produzca escorrentía. Pero si se produce escorrentía, lo cual ocurrirá con seguridad cuando el laboreo esté degradado o cuando la lluvia sea intensa, el suelo estará desnudo, con una densidad aparente baja y generalmente una estructura pobre (especialmente si se labra de manera intensiva), por lo que la erosión tenderá a ser alta. Además, si existe una suela de labor, puede que la capa labrada se encuentre completamente saturada y sea fácilmente arrastrada por el agua. Como vemos la erosión dependerá de la interacción del estado del suelo con respecto a la última labor además de la intensidad y magnitud de la tormenta. En nuestro clima de precipitaciones de intensidades variables e irregulares esto implica que son necesarios varios años para comparar los resultados del laboreo sobre la erosión. Los resultados obtenidos hasta ahora es que en años húmedos o eventos de lluvia intensos las pérdidas de suelo están más allá de lo tolerable [Francia y col., 2000].

7.3.2. No laboreo con suelo desnudo.

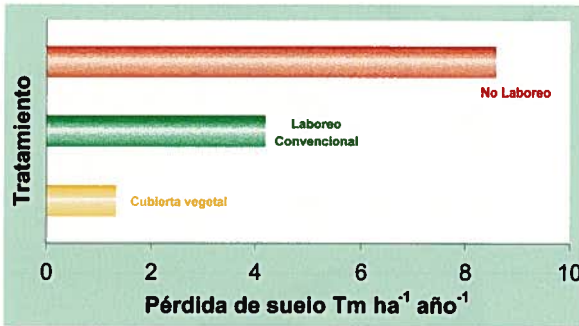


Figura 49: Pérdida de suelo en parcelas cerradas, promedio de tres años

Como alternativa al laboreo tradicional el no laboreo con suelo desnudo presenta pocas mejoras en los procesos que conducen a la erosión hídrica. Su tasa de infiltración es menor (y por lo tanto su escorrentía es mayor) y la velocidad del agua es mayor al ser menos rugoso, además de que la protección del suelo es también pequeña [Gómez y col., 2003]. Todo ello hace

que el riesgo erosivo sea mayor como se ha demostrado en las ocasiones que se ha medido en parcelas experimentales [Francia y col. 2000; Gómez y col., 2003b]. Un ejemplo de los resultados obtenidos en estos ensayos aparece en la Figura 49 tomada de Gómez y col. [2003b]. Los análisis del riesgo de erosión con modelos de simulación, como el mostrado en la Figura 50 adaptada de Gómez y col. [2003a], también sugieren un mayor riesgo de erosión en no laboreo en comparación con el laboreo convencional.

7.3.3. Sistemas mixtos de laboreo

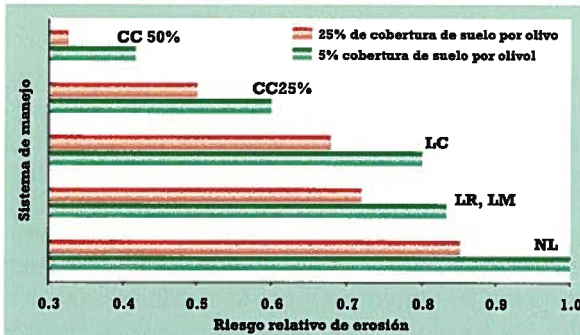


Figura 50: Riesgo relativo de erosión en función del tipo de manejo de suelo. Cubierta vegetal, CC. cubriendo el 50 o el 25% de la superficie; laboreo convencional, LC; no laboreo con suelo desnudo, NL; y laboreo reducido, LR, y mínimo, LM.

En cuanto al laboreo reducido y al laboreo mínimo no existen evidencias experimentales para determinar con fiabilidad su efecto sobre la pérdida de suelo. Dada la interacción con el régimen de lluvia resulta muy difícil responder en general a esta pregunta. Los análisis con modelos sugieren que no hay diferencias significativas con un laboreo convencional moderado (4 labores al año), tal y como se muestra en la Figura 50. No obstante, ajustar el número de labores al mínimo necesario y en las épocas en que son de verdad relevantes puede suponer una reducción significativa del riesgo de erosión, aun-

no obstante, ajustar el número de labores al mínimo necesario y en las épocas en que son de verdad relevantes puede suponer una reducción significativa del riesgo de erosión, aun-

que ese tipo de decisión debe tomarse en función de las características de la explotación.

7.3.4. Cubiertas vegetales.

El uso de cubiertas vegetales entre las calles debería tener un impacto dramático sobre la erosión, ya que proporciona una cobertura de suelo, reduce la velocidad del agua, tiende a aumentar la infiltración y aumenta ligeramente el contenido de materia orgánica en superficie mejorando la estructura del suelo. Esto ha sido comprobado experimentalmente [Francia y col. 2000; Gómez y col., 2003a] y también en análisis con modelos [Gómez y col., 2003a], véase por ejemplo la Figura 50 anteriormente citada. Su impacto dependerá por un lado de la extensión de superficie cubierta, y por otro de su grado de implantación, ya que en zonas muy degradadas es imposible conseguir una cobertura importante, como en la zona mostrada en la Figura 51. En general aun cuando las fincas manejadas con cubiertas soporten un tráfico importante que pudiese reducir la infiltración,

el efecto de las cubiertas sobre la erosión hídrica es muy importante reduciéndola con respecto a otros sistemas como el laboreo convencional o el no laboreo, excepto en el caso extremo de que la degradación sea tal que impida el crecimiento de la cubierta. El uso de cubiertas inertes es también muy efectivo, aunque a menos que se disponga de materiales locales, como la cobertura de piedras mostrada en la Figura 31, los restos de poda no son suficientes para proporcionar una cobertura total. En el caso de fincas manejadas con ganado hay que tener especial cuidado en manejar el ganado a fin de evitar el sobrepastoreo y la compactación del suelo bien en toda la finca o en zonas determinadas de la misma. Cuando este sobrepastoreo ocurre, el sistema acaba pareciéndose más a un laboreo muy degradado o a un no laboreo con suelo desnudo: compactado y con el suelo desnudo y por lo tanto con un elevado riesgo de erosión.



Figura 51: Zona degradada mostrando poca cubierta vegetal

7.3.5. Modificación de la pendiente.

El aterrazamiento reduce en gran manera la erosión hídrica, especialmente si es realizado de forma sistemática y controlando la evacuación del exceso de escurrimiento. El laboreo en curvas de nivel tiene su mayor efecto en pendientes entre el 2 y el 8%, y deja de ser efectivo para pendientes muy largas o muy inclinadas, Tabla 1, o cuando el relieve sea tan irregular que sea imposible trazar los surcos de manera que sean efectivamente paralelos a las curvas de nivel. El ate-

terrazamiento parcial inducido por el tránsito siguiendo las calles en árboles plantados según las curvas de nivel tiene su impacto aunque no es tan efectivo como el aterrazamiento sistemático, reduciéndolo del orden de un 25% con respecto a la misma ladera labrada en la dirección de arriba hacia abajo para pendientes del 20% [Gómez y col., 2003a].

Análisis con modelos [Gómez y col., 2003a], la opinión de autores trabajando el climas mediterráneos [Chisci, 1994], y la observación de lo ocurrido en campo sugiere que para pendientes moderadas el manejo de suelo puede llegar a controlar la erosión por debajo de límites tolerable. En los olivares situados en pendientes elevadas resulta aparente que sólo el manejo no es suficiente y son necesarias medidas físicas como el aterrazamiento o el control de las zonas de desagüe para reducir la erosión a límites tolerables.

7.4. CÁLCULO DEL EFECTO SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA DE UN SISTEMA DE MANEJO DETERMINADO.

Una vez más recurriremos a un modelo relativamente simple desarrollado por el Departamento de Agricultura del los EEUU. Sus virtudes son que la información necesaria para utilizarlo es relativamente fácil de encontrar, que es fácil de usar, y que ha sido ampliamente utilizado. Entre sus limitaciones está que ha sido validado poco en olivar y en clima mediterráneo, aunque esto es extensible a todos los modelos, y en nuestro caso sus virtudes compensan esta limitación. Conviene aclarar que sólo es valido a escala de ladera ya que no calcula deposición del sedimento. Para utilizarlo en áreas más grandes es necesario combinarlo con el cálculo del porcentaje de transporte de sedimento SDR por sus siglas en inglés. Este modelo es especialmente útil para estimar las diferencias en el riesgo de erosión entre diferentes manejos de suelo para una situación determinada.

La ecuación universal de pérdida de suelo revisada [Renard y col. 1997], RUSLE según su acrónimo en inglés, es un modelo empírico desarrollado para determinar el promedio anual de pérdida de suelo en parcelas en pendiente de acuerdo a seis parámetros

Ecuación 9 $A = R K L S C P$

Donde A ($Tm\ ha^{-1}\ año^{-1}$) es la pérdida de suelo promedio anual, R ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ año^{-1}$) es la erosividad de la lluvia y es una medida de la energía de la lluvia disponible para erosionar el suelo, K ($Tm\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$) es la erodibilidad del suelo del que ya hablamos en el epígrafe 7.1.1, L (adimensional) es el factor de longitud de ladera, S (adimensional) es el factor de inclinación de la ladera, C (adimensional) es un factor que engloba la cobertura y manejo de suelo, y P (adimensional) es el factor que considera las técnicas de conservación como el laboreo en curvas de nivel.

A continuación se describe una manera rápida de calcular A para una situación determinada con el mínimo de cálculos. Para una explicación detallada de los mismos puede consultarse [Renard y col. 1997; Gómez y col., 2003].

El factor R puede consultarse, para España, en una publicación del ICONA [1988] donde se puede obtener para numerosas localidades o interpolar para la más cercana. La única precaución es convertir sus unidades de $J m^{-2} cm h^{-1} año^{-1}$ a $MJ mm ha^{-1} h^{-1} año^{-1}$ multiplicando por 10. Para el caso de localidades fuera de España donde no se disponga de valores de R existe una buena revisión de fórmulas aproximadas a partir de la precipitación mensual o anual, así como valores estimados para algunos lugares de la cuenca mediterránea en Bergsma [1981].

El factor K, $Tm ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}$, de erodibilidad del suelo puede calcularse a partir de la descripción del perfil del suelo y de su composición textural mediante la ecuación 10 [Wischmeier y Smith, 1978, de acuerdo a Renard y col., 1997]

$$\text{Ecuación 10} \quad K = \frac{1}{759} \left[2.1 \cdot 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25 (s - 2) + 2.5 (p - 3) \right]$$

donde OM es material orgánica (%), s es la clase de acuerdo a la estructura del suelo, p es la clase de acuerdo a la permeabilidad del suelo, ver Tabla 5, y M se determina de acuerdo a la Ecuación 11 donde las tres variables están en porcentaje. Arena muy fina es la de tamaño comprendido entre 0.05-0.2 mm de diámetro.

$$\text{Ecuación 11} \quad M = (\text{limo} + \text{arena muy fina}) (100 - \text{arcilla})$$

Clase de acuerdo a la tasa de infiltración		Clase de acuerdo a la estructura	
p	mm h ⁻¹	s	
1	Rápida	> 127	1 Granular muy fina
2	Moderada a rápida	63.5-127	2 Granular fina
3	Moderada	20.3-63.5	3 Granular gruesa o media
4	Lenta a moderada	5.1-20.3	4 En bloques, laminar o masiva
5	Baja	1.3-5.1	
6	Muy baja	< 1.27	

Tabla 5: Clases para la ecuación de erodibilidad, K

El factor S se calcula para laderas mayores de 5 metros a partir de las Ecuaciones 12 y 13 [Renard y col. 1997], siendo θ el ángulo de inclinación de la pendiente en ángulos sexagesimales.

Ecuación 12 $S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \quad \theta < 5.1^\circ$

Ecuación 13 $S = 16.8 \sin \theta - 0.50 \quad \theta \geq 5.1^\circ$

El factor L se calcula a partir de la Ecuación 14 (Renard y col., 1997 convertida al sistema internacional de unidades)

Ecuación 14 $L = (\lambda / 22.07)^m$

Donde λ (m) es la proyección horizontal de la ladera y m se calcula a partir de las Ecuaciones 15 y 16 donde θ ya ha sido definida

Ecuación 15 $m = \beta / (1 + \beta)$

Ecuación 16 $\beta = (\sin \theta / 0.0896) / (3.0 (\sin \theta)^{0.8} + 0.56)$

Por último, los factores C y P dependen de una serie de variables entre las que figuran el grado de cobertura en función del árbol, vegetación herbácea y residuos y su evolución anual, el número de labores y el grado de rugosidad del terreno y su evolución temporal, etc....Su cálculo aunque conceptualmente simple requiere numerosas operaciones. El Anexo 4 recoge algunos de los valores publicados para los parámetros C y P bajo diferentes cultivos, aunque ninguno de ellos es específico para olivar. Para hacer práctico el uso de la RUSLE se acompaña en este apartado las Tablas 6 y 7 recogiendo valores del producto C x P desarrollados específicamente para los distintos manejos del suelo en olivar tomados de Gómez y col. 2003a].

Manejo	C x P	
	6% Cobertura suelo por árbol	25% cobertura suelo por árbol
No Laboreo	0.50	0.42
Laboreo convencional, disco 4 veces al año	0.40	0.34
Cubierta de 2-m de ancho, siembra octubre siega 20 Marzo	0.30	0.25
Cubierta de 4-m de ancho, siembra octubre siega 20 Marzo	0.21	0.16
Cobertura completa, siembra octubre siega 30 Mayo	0.09	0.06

Tabla 6: Valores de CxP para diferentes manejos

Manejo	C x P
No Laboreo	0.42
Laboreo mínimo, cultivador una vez al año	0.36
Laboreo reducido, calles con disco 4 veces al año	0.36
Laboreo convencional, disco 4 veces al año	0.34
Laboreo convencional siguiendo curvas de nivel, 20% de pendiente	0.34
Laboreo convencional siguiendo curvas de nivel, 5% de pendiente media.	0.25
No Laboreo, 30% de la superficie "Aterrazada" por el tránsito en curvas de nivel. Pendiente 5%	0.34
No Laboreo con 30% de la superficie "Aterrazada" por el tránsito en curvas de nivel. Pendiente 20%	0.33
Cubierta de 2-m de ancho, siembra octubre siega 20 Marzo	0.25
Cubierta de 4-m de ancho, siembra octubre siega 20 Marzo	0.16
Cobertura completa, siembra octubre siega 30 Mayo	0.06

Tabla 7: Valores de CxP para diferentes manejos con 25% de cobertura del suelo por el árbol

Si queremos determinar la pérdida de suelo absoluto a escala mayor que la ladera es necesario calcular un porcentaje de transporte de sedimento, SDR. Existen numerosas ecuaciones para determinarlo sin existir consenso acerca de cual es la mejor ya que dichas ecuaciones son empíricas y dependen en gran medida de las cuencas a partir de las cuales han sido desarrolladas. Williams [1977] propuso la Ecuación 17 a partir de un estudio de diferentes cuencas en Tejas. Su fórmula considera el efecto del tamaño de la cuenca, A en km²; el número de curva promedio de la cuenca CN, y la relación entre relieve y tamaño de la cuenca ZL en m km⁻¹, calculado a partir del ratio entre la diferencia de elevación entre la altura promedio de los límites de la cuenca con la altura de su desembocadura, y la máxima longitud recorrida por la escorrentía superficial en la cuenca.

Ecuación 17

$$SDR = 1.366 \cdot 10^{-11} \cdot A^{-0.0998} \cdot ZL^{0.3629} \cdot CN^{5.444}$$

EJEMPLO 3.

Cálculo de las pérdidas de suelo en un olivar.

Como ejercicio pensemos en dos situaciones. La primera es una plantación de unos 12 años en la que los árboles tienen unos 2.8-m de radio de copa y están plantados a un marco de 10x10-m en Santaella, Córdoba. Es un olivar de secano, el suelo se clasifica como rojo fersialítico y su horizonte superior tiene un 1.95% de materia orgánica, una permeabilidad moderadamente buena y una estructura granular fina, siendo su composición textural: 8% de limo, 49% de arcilla y 26% de arena fina. La plantación es de unas 18 Ha. Las pendientes no

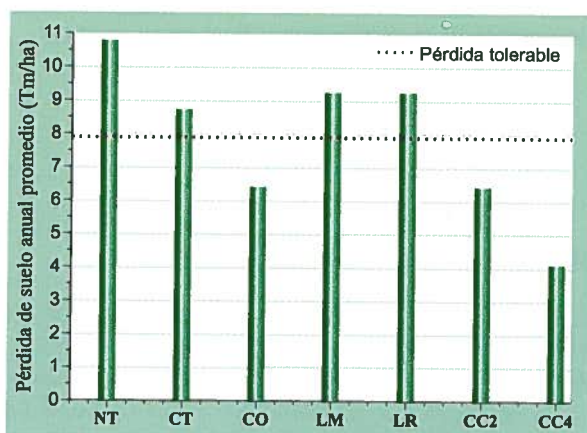
son demasiado grandes, con la máxima pendiente, del 7%, en una ladera de 200-m de longitud. La tasa de pérdida de suelo tolerable se ha estimado en 7.9 Tm ha año por Moreira [1991].

En ICONA [1988] buscamos el factor R de la localidad más cercana, que es en este caso Écija. Su valor es de $119 \text{ J m}^2 \text{ cm h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que convertidos a $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ son 1190.

El factor S es 0.78 y el L es 2.75 a partir de las ecuaciones del apartado anterior.

El factor K, calculado a partir de las ecuaciones del apartado anterior, resulta ser $0.01 \text{ Tm ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Los sistemas que nos planteamos evaluar frente a un laboreo en la dirección de la pendiente, CT, que es el usado hasta ahora son no laboreo con suelo desnudo, NT, laboreo en curvas de nivel CO, laboreo mínimo LM y reducido LR, y cubierta natural controlada con herbicida que emerge en octubre y se siega a mediados de Marzo no teniendo claro si se dejará una banda de 2 ó 4 metros de anchura entre los árboles, CC2 y CC4. Cogiendo los valores C y P de la Tabla 7 asumiendo para el laboreo en curvas de nivel una pendiente del 5%, se obtienen las estimaciones de pérdida de suelo que aparecen en la Figura 52.

En dicha Figura 52 se comprueba como labrando de manera paralela a las curvas de nivel CO, o dejando crecer cubiertas en las calles, CC2 y CC4, reduciría las pérdidas de suelo a límites tolerable, en comparación con lo que ocurre hasta ahora. Como nos preocupa la competencia por agua al tener árboles con volúmenes de copa bastante grandes para ser un olivar de secano se podría sugerir cambiar el sentido de las labores como mejora para reducir la erosión. Si por algún motivo este sistema



no funcionase, quedaría la opción de dejar crecer una banda de dos metros de ancho segando con herbicida. No parece necesario optar por la de 4 metros de anchura porque nuestros cálculos indican que no es necesario aumentar el riesgo de competencia por agua ya que la de dos metros de anchura parece que se mostraría efectiva.

Figura 52: Pérdida de suelo estimadas para el ejemplo del olivar de Santaella, Córdoba

EJEMPLO 4.**Cálculo de las pérdidas de suelo en un olivar en pendiente.**

El segundo caso es un olivar en la sierra de Montoro, Córdoba. Es básicamente un cerro en el que la ladera promedio tiene una longitud de 150-m y una pendiente media del 15%. Son árboles de 2-m de radio de copa a un marco de 14x14. Tiene problemas graves de erosión y se le forman bastantes cárcavas que se cubren con pases de grada de disco. Aparentemente se pierde bastante suelo porque las cárcavas continúan y a veces cortan el carril que va al pie del olivar hasta llegar al cortijo.

Miramos en ICONA [1988] y vemos que el factor R para Montoro es $1010 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El suelo posee un 1.41% de materia orgánica, con una permeabilidad moderada-buena y una estructura granular fina. Su contenido de arcilla es del 19%, con un 0.5% de limo y un 53% de arena muy fina.

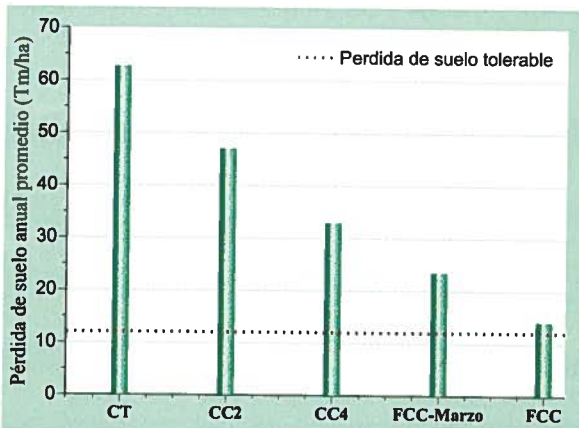


Figura 52: Pérdida de suelo estimadas para el ejemplo del olivar de Santaella, Córdoba

Los factores L y S son 2.38 y 1.63 respectivamente, y el K es $0.04 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. El porcentaje de suelo cubierto por el árbol es del 6% por lo que los factores CxP se toman de la columna 5% en la Tabla 6. Se consideran dos alternativas. Una consiste en dejar bandas de vegetación natural de 2 y 4 metros de ancho segadas a mediados de Marzo, como no se tiene muy claro si eso será suficiente se considera una segunda opción consistente en una cubierta completa

segada a primeros de Mayo (si antes no se ha agostado) y esa misma cubierta completa de malas hierbas segada a mediados de marzo. Como en la Tabla 6 no viene para esta última, se estima su CxP como el intermedio de CC4 y FCC en dicha Tabla. Como se observa en la Figura 53 la opción de ir dejando bandas de vegetación de 4-m de anchura reduce casi a la mitad la erosión aunque esta seguiría siendo elevada debido a la pendiente y a la alta erodibilidad del suelo. Tratándose de árboles muy espaciados y relativamente pequeños es posible que el impacto sobre el balance de agua sea pequeño también. Este podría ser el primer paso. Si aún sigue teniendo problemas debería dejar cubiertas cada vez más anchas y segadas cada vez más tarde, aunque ahí ya es posible que empiecen a competir por agua. No obstante empezar a manejar bandas relativamente estrechas ayudará al aprendizaje del manejo de la cubierta minimizando los riesgos

de competencia por agua. Todas las medidas evaluadas, excepto la cubierta completa segada muy tarde, seguirían produciendo pérdidas de suelo por encima de lo tolerable. Por eso, en adición al sistema de manejo de suelo, se sugiere que se empiece a transitar y a efectuar todas las operaciones siempre en paralelo a las curvas de nivel de manera que con los años acabará atenuando la pendiente de algunas zonas y reducirá de manera muy importante la erosión. La Tabla 8, tomada de Dissmeyer y Foster [1984] da una idea de cuanto puede reducir la erosión este tipo de aterrazamiento inducido por el tránsito. Para calcularlo basta con multiplicar el número obtenido de la Tabla 8 por el resultado obtenido de la Ecuación 9, calculando el porcentaje de zona aterrazada partir del área de tránsito de las máquinas dividido por el marco de plantación. Cuando hacemos eso vemos como los valores de pérdida de suelo para FCC y CC4 se situarán por debajo de la pérdida de suelo tolerable. Si se implementa esta medida de transitar paralelo a las curvas de nivel, será necesario un carril que vaya en la dirección de la pendiente para moverse cerro arriba y abajo de su ladera. Éste carril hará de colector del agua que escurra por sus calles y que deberá protegerlo contra la erosión de manera especial. Para empezar puede dejar restos de residuos picado en ese carril y colocar obstáculos al agua en su parte final.

Pendiente%	Porcentaje de superficie aterrazada por tránsito			
	20%	30%	40%	50%
5	0.99	0.98	0.97	0.96
6	0.94	0.92	0.89	0.86
7	0.92	0.88	0.84	0.80
8	0.90	0.85	0.80	0.75
9	0.89	0.83	0.77	0.71
10	0.87	0.81	0.75	0.68
12	0.85	0.78	0.71	0.63
15	0.84	0.75	0.67	0.59
20	0.82	0.74	0.65	0.56
30+	0.81	0.72	0.63	0.53

Tabla 8: Coeficiente reductor debido al aterrazamiento debido al tránsito.

8. CÁLCULO DE LAS PROTECCIONES NECESARIAS EN LAS ZONAS DE DESAGÜE.

Las estructuras de estabilización juegan un papel muy importante en la rehabilitación y control de cárcavas. En general será siempre más barato prevenirlas que restaurarlas [Hudson, 1981], pero cuando esto no sea posible se pueden emplear pequeñas represas (generalmente entre 0.4 y 2 metros de altura) construidas

con materiales locales como tierra, tabloneros o piedras que se disponen transversalmente para capturar sedimentos y así reducir con el tiempo la profundidad y pendiente de la cárcava. Aunque sean estructuras temporales deben diseñarse con cuidado, espaciándose y colocándose en los puntos apropiados y proveyéndolas de un aliviadero de manera que el agua que rebose de las mismas no cree nuevos problemas de erosión. El espaciamiento de las represas se puede calcular a partir de la fórmula de Heede [1976], Ecuación 18.

$$\text{Ecuación 18} \quad E = \frac{HE}{K \operatorname{tg} \theta \cos \theta}$$

Donde E es el espaciamiento (m) y HE la altura de la represa (m), θ el ángulo de la pendiente longitudinal de la cárcava, y K un valor que es 0.3 para $\operatorname{tg} \theta \leq 0.2$, y 0.5 para $\operatorname{tg} \theta > 0.2$. Morgan [1997] indica que las profundidades de las cárcavas para las que se sugieren represas de piedra son inferiores a 1.2-m, a 1.5-m en el caso de empalizadas simples de madera y 2.1-m para empalizadas dobles de madera. Morgan [1997] también indica que estas represas deben considerar un aliviadero diseñado para un caudal máximo con periodo de retorno de unos 25 años. Este aliviadero se recomienda de sección trapecial y de una anchura igual la anchura del fondo de la cárcava, L, estando la zona donde cae el agua del aliviadero reforzada para evitar socavamientos. La altura del aliviadero, D en m, vendrá dada por la Ecuación 19, donde Q es el caudal máximo en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ y L la anchura de la base del aliviadero en m

$$\text{Ecuación 19} \quad D = \left(\frac{Q}{1.65L} \right)^{2/3}$$

En las zonas de desagüe o de concentración de la escorrentía también es necesario comprobar que la velocidad del agua no supera los límites permisibles por encima de los cuales el suelo es arrastrado. Esta velocidad dependerá del tipo de suelo y de su cobertura, véase la Tabla 9 tomada de Morgan [1997].

Material	Desnudo	Cubierta 50%	Cubierta muy densa
Limo-arenoso	0.3	0.75	1.5
Arena ligera suelta	0.5	0.9	1.5
Arena gruesa suelta	0.75	1.25	1.7
Arenoso	0.75	1.5	2.0
Franco arcilloso estable	1.0	1.7	2.3
Arcilloso o grava estable	1.5	1.8	2.5
Gravas gruesas	1.5	1.8	*
Rocas blandas	1.8	2.1	*
Conglomerados cementados	2.5	*	*

Tabla 9: Velocidad de seguridad máxima admisible, m s^{-1} según la vegetación y suelo

La velocidad para una zona de desagüe se puede determinar conocidas las dimensiones y el caudal a evacuar de acuerdo a la fórmula de Manning, Ecuación 20.

$$\text{Ecuación 20} \quad v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde n es el la rugosidad hidráulica, ver Tabla 10, v la velocidad media de la corriente en $m\ s^{-1}$, R el radio hidráulico en metros y S la pendiente de la solera en m^{-1} . El radio hidráulico se define como el área mojada partido por el perímetro mojado.

Descripción	n
Vegetación alta, más de 60 cm, y densa	0.06-0.2
Vegetación alta, 25-50 cm	0.04-0.15
Vegetación media, 15-25 cm	0.03-0.08
Vegetación baja, 5-15 cm	0.03-0.06
Vegetación muy baja, menos de 5 cm	0.02-0.04

Tabla 10: Valores de la rugosidad de Manning, n , para diferentes tipos de vegetación

El diseño de una zona de drenaje debe considerar que es capaz de evacuar el caudal deseado a una velocidad igual o inferior a la máxima admisible. Para ello en primer lugar se determina el radio hidráulico usando la Ecuación 19, y a continuación se determina la geometría y dimensiones del canal adecuadas.

9. RESUMEN Y RECOMENDACIONES FINALES.

Para resumir las ideas fundamentales comentadas a lo largo de esta publicación, se dan a continuación unas pautas a considerar cuando se analice y se aplique la información a cada finca en particular.

Uso y Conservación del Agua

- 1- No cabe esperar grandes diferencias en evaporación desde el suelo entre los sistemas de no laboreo con suelo desnudo y el de laboreo convencional. Como excepción, si se labra volteando en suelo a los pocos días de una lluvia, podrían perderse unos 5-10 mm adicionales.
- 2- La cubierta inerte reduce significativamente la evaporación con respecto a la de un suelo desnudo, por lo que es muy deseable su mantenimiento desde el punto de vista de la conservación del agua.
- 3- Una cubierta viva compite con el olivo y puede reducir significativamente la transpiración del árbol si su vida se prolonga después del invierno, por lo que

éste es el momento crítico en el manejo de la cubierta, conviniendo ser conservadores en su manejo.

- 4- La determinación de la ET del sistema olivar-cubierta es compleja y aún no existen buenas estimaciones de su magnitud bajo distintas situaciones, anchura de la cubierta, especies utilizadas, etc..Se está trabajando para determinar las fechas óptimas de eliminación de la cubierta que compatibilice la protección del suelo y el mantenimiento de la producción del olivo, incluso en los años más secos.

Escorrentía

- 1- El laboreo convencional es muy eficaz en reducir la escorrentía superficial anual promedio en las condiciones del sur de España. En ocasiones concretas, cuando el efecto de la labor ha desaparecido, los coeficientes de escorrentía pueden ser muy altos.
- 2- Las cubiertas vivas son un método muy eficaz de aumentar la tasa de infiltración. Su efecto varía en función de la superficie cubierta y el desarrollo de la misma. Es posible que en explotaciones o zonas con mucho tráfico y en suelos con tendencia a la compactación la cubierta tenga problemas de implantación, mejorando poco o nada la tasa de infiltración.
- 3- El no laboreo con suelo desnudo incrementa la escorrentía en comparación con el laboreo convencional o con sistemas de manejo que usan cubiertas.
- 4- Es posible estimar con expresiones sencillas el efecto de los diferentes sistemas de manejo de suelo sobre la escorrentía y el caudal punta, aunque su precisión es moderada.

Erosión

- 1- Las cubiertas vegetales vivas suponen uno de los métodos más efectivos de reducir el riesgo de erosión.
- 2- El no laboreo con suelo desnudo presenta el riesgo de erosión más elevado, seguido del laboreo convencional.
- 3- No siempre el sistema de manejo de suelo por si sólo es capaz de reducir el riesgo de erosión a límites tolerables.
- 4- El aterrazamiento o algún tipo de manejo de suelo que conduzca a ello (por ejemplo, un laboreo sistemático siguiendo las curvas de nivel) es muy efectivo en reducir el riesgo de erosión.

- 5- En los casos en los que no es posible controlar la erosión dentro de los límites tolerables mediante el manejo del suelo, se hace necesaria la realización de obras y estructuras de control, en particular en las zonas de concentración de escorrentía como cauces o arroyos, así como en zonas de tránsito y caminos.

10. REFERENCIAS

- Aguilar, M.A. 2001. Efectos agronómicos de la aplicación de lodos de depuradoras compostados en suelos de olivar. Tesis doctoral. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba.
- Aguilar, J., Fernández, J, Fernández, E., De Haro, S., Rodríguez, T., 1995. El olivar jiennense. Servicio de publicaciones de la Universidad de Jaén.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Roma.
- American Society of Civil Engineers, 1996. Hydrology handbook, 2nd Edition. American Society of Civil Engineers.
- Bergsma, E. 1981. Indices of rain erosivity. ITC Journal 1981, vol. 4, 460-484.
- Castro, J. 1993. Control de la erosión en cultivos leñosos con cubiertas vegetales vivas. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.
- Chisci, G. 1994. Perspectives on soil protection measures in Europe. En: Conserving soil resources: European perspectives. Editor R.J. Rickson . CABI, Cambridge.
- Chung, S. y Horton, R. 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. Water Resources Research 23: 2175-2186.
- Civantos, L. 1999, La olivicultura en el mundo y en España. En " El cultivo del olivo", 3ª Ed.. Editores: D. Barranco, R. Fernández-Escobar y L. Rallo. Mundi-prensa. Madrid.
- Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía, 2003. El olivar andaluz. Servicio de Publicaciones y Divulgación, Sevilla.
- Consejería de Economía y Hacienda. Junta de Andalucía, 2002. Informe económico de Andalucía 2001. Servicio de Asesoría Técnica y Publicaciones, Sevilla.

Dissmeyer, G.E., y Foster, G.R. 1984. A guide for predicting sheet and rill erosion on forest land. Technical Publication R8-TP 6. USDA-Forest Service. Atlanta, Georgia.

Francia, J.R., Martínez Raya, A. y Ruíz Gutiérrez, S. 2000. Erosión en suelos de olivar en fuertes pendientes. Comportamiento de distintos manejos de suelo. *Edafología* 7: 147-155.

Geeves, G.W., Craze, B. y Hamilton, G.J., 2001. Soil physical properties. En "Soils: their properties and management". Editores P.E.V. Charman y B.W. Murphy. Oxford University Press, Melbourne.

Gómez, J.A., Giráldez, J.V., Pastor, M. y Fereres, E. 1999. Effects of tillage methods on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil and Tillage Research* 52: 167-175.

Gómez, J.A., Giráldez, J.V., Fereres, E. 2002a. Medida y predicción de la erosión y escorrentía en olivar con diferentes sistemas de manejo de suelo. Jornadas de investigación y transferencia de tecnología al sector oleícola. Córdoba, 20-21 de Noviembre de 2002.

Gómez, J.A., Orgaz, F., Villalobos, F.J., Fereres, E. 2002b. Analysis of the effect of soil management on runoff generation in olive orchards using a physically based model. *Soil Use and Management* 18: 191-198.

Gómez, J.A., Battany, M., Renschler, C.S. y Fereres, E. 2003a. Evaluation of the impact of different soil management on soil losses in olive orchards in Southern Spain using RUSLE. *Soil Use and Management* 19: 127-134.

Gómez, J.A., Giráldez, J.V., Fereres, E. 2003b. Impact on runoff and soil erosion of soil management in olive orchards in Southern Spain. In proceedings of "25 years of assessment of soil erosion". September 22-26, 2003. Ghent, Belgium.

Hamblin, A.P. y Tennant, D. 1981. The influence of tillage on soil water behavior. *Soil Science* 132: 233-239.

Heede, B.H. 1976. Gully development and control: the status of our knowledge. USDA-Forest Service Research Paper RM-169. Fort-Collins. CO. Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station.

Hudson, N.W. 1981. Soil conservation. Batsford, London.

Hudson, N.W., 1988. Conservation practices and runoff water disposal on steep lands. En "Conservation farming on steep lands". Editores: W.C. Moldenhauer y N.W. Hudson. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.

ICONA 1988. Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo. MAPA, Madrid.

Lal, R., 1988. Soil erosion research on steep lands. En "Conservation farming on steep lands". Editores: W.C. Moldenhauer y N.W. Hudson. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.

Mohamoud, Y.M., Ewing, L.K., Boast, C.W., 1990. Small plot hydrology: I. Rainfall infiltration and depresión storage determination. Transactions of ASAE 33:1121-1131.

Morales, J. y Pastor, M. 1991. Mejora de la infiltración y captación de escorrentía en olivar en no-laboreo. III Simposio sobre el agua en Andalucía. Córdoba. Vol. II: 171-182.

Moreira Madueño J., 1991. Capacidad de uso y erosión de suelos: Una aproximación a la evaluación de tierras en Andalucía. Agencia de Medio Ambiente. Sevilla.

Morgan, R.P.C., 1997. Erosión y conservación de suelos, edición española. MundiPrensa. Madrid.

Muñoz, J. 1998. Influencia de los sistemas de cultivo sobre el olivar y sobre algunas propiedades físicas y químicas del suelo. Tesis de Master. Universidad de Córdoba.

Mwendera, E.J. y Feyen, J. 1997. Tillage and evaporativity effects on the drying characteristics of a silty loam: evaporation prediction models. Soil and Tillage Research 41: 127-104.

Nacional Resources Conservation Service. 2000. Contour Farming. Field Office Technical Guide. Section IV. Nacional Resources Conservation Service. Mississippi.

Pastor, M., Castro, J., Vega, V. y Humanes, M., 1999, Sistemas de manejo del suelo. En " El cultivo del olivo", 3ª Ed.. Editores: D. Barranco, R. Fernández-Escobar y L. Rallo. Mundiprensa. Madrid.

Rawls WJ y Brakensiek DL 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. En: "Unsaturated flow in hydrology: theory and practice". Editor H.J. Morel-Seytoux. NATO ASI series, Kluwer Academic Publishers Dordrechts pp. 275-300.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. y Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). U.S. Dep. Agric., Agric. Handb. No. 703. Washington D.C.

Ritchie, J., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8: 1204-1213.

Sánchez Jiménez, S. 2002. El cultivo del olivar desde una perspectiva de gestión. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Jaén. Jaén.

Sanders, D.W., 1988. Soil erosion and water conservation on steep lands: A summary of workshop conclusions. En "Conservation farming on steep lands". Editores: W.C. Moldenhauer y N.W. Hudson. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.

Troeh, F.R., Hobbs, J.A. y Donahue, R.L., 1991. Soil and Water Conservation. Prentice Hall. Englewoods Cliffs, N.J.

U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook: Section 4, Hydrology. Washington, D.C.

Villalobos, F.J., Mateos, L., Orgaz, F. y Fereres, E., 2002. Fitotecnía. Bases y tecnologías de la producción agraria. Mundi-Prensa. Madrid.

Williams, J.R., and H.D.Berndt. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. ASAE* 20: 1100-1104.

Wischmeier W y Smith D 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. U.S. Dep. Agric., Agric. Handb. No. 537. Washington D.C.



ANEXOS



**ANEXO 1:
VALORES TABULADOS DEL NÚMERO DE CURVA, CN.**

Cobertura			Grupo hidrológico			
Uso del suelo	Manejo del suelo	Condición hidrológica	A	B	C	D
Barbecho	Cultivado en la dirección de la pendiente	---	77	86	91	94
Cultivos anuales	Cultivado en la dirección de la pendiente	Pobre	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Cultivado paralelo a la pendiente	Pobre	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Aterrazado	Pobre	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
Cereales de porte bajo	Cultivado en la dirección de la pendiente	Pobre	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Cultivado paralelo a la pendiente	Pobre	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Aterrazado	Pobre	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
Leguminosas o cultivos de alta densidad	Cultivado en la dirección de la pendiente	Pobre	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Cultivado paralelo a la pendiente	Pobre	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Aterrazado	Pobre	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80
Zonas de pastos	Natural	Pobre	68	79	86	89
		Aceptable	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Cultivado paralelo a la pendiente.	Pobre	47	67	81	88
		Aceptable	25	59	75	83
		Buena	6	35	70	79
Praderas	Natural	Buena	30	58	71	78
Bosques	Natural	Pobre	45	66	77	83
		Aceptable	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Casas rurales	---	---	59	74	82	86
Carreteras	Tierra	---	72	82	87	89
	Asfalto	---	74	84	90	92

Tabla 1: Valores del CN publicados por la American Society of Civil Engineers [1996] para el estado de humedad antecedente II y pendiente 5%

Esos números son válidos para la condición de humedad antecedente II. Para la condición I y la condición III la correspondencia se puede establecer a partir de las ecuaciones 1 y 2 donde CNII es el de la Tabla 1, ó interpolar a partir de la Tabla 2.

$$CN_{III} = CN_{II} e^{[0.00673(100 - CN_{II})]}$$

$$CN_I = CN_{II} - \frac{20(100 - CN_{II})}{100 - CN_{II} + e^{[0.00673(100 - CN_{II})]}}$$

CN _{II}	CN _I	CN _{III}
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	22
5	2	13

Tabla 2: Correspondencia deCNII con CNI y CNIII

**ANEXO 2:
VALORES DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA, C,
PARA EL MÉTODO RACIONAL.**

Uso de suelo y manejo	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
CULTIVADO				
Cultivos anuales, sin laboreo de conservación	.55	.65	.70	.75
Cultivos anuales, con laboreo de conservación	.50	.55	.65	.70
Cereales de porte bajo, sin laboreo de conservación	.35	.40	.45	.50
Cereales de porte bajo, sin laboreo de conservación	.20	.22	.25	.30
Pradera	.30	.35	.40	.45
PASTOS, permanentes con pastoreo moderado	.10	.20	.25	.30
BOSQUES, adultos y sin pastoreo	.06	.13	.16	.20
Zona residencial				
30% de suelo impermeable	.30	.40	.45	.50
70% de suelo impermeable	.50	.60	.70	.80

Tabla 3: Valores del coeficiente de escorrentía, C, para el método racional [Engels, comunicación personal]. El grupo hidrológico corresponde a la clasificación del SCS para el método del número de curva.

ANEXO 3: ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE TERRAZAS.

Las ecuaciones siguientes, adaptado de Morgan [1997], son algunas ecuaciones empíricas utilizadas para el diseño de terrazas en diferentes países. VI es la diferencia de altura entre dos terrazas sucesivas, y se denomina intervalo vertical, va en metros. S es la pendiente en porcentaje.

Argelia:

$$VI (m) = \frac{S}{10} + 2$$

Kenia:

$$VI (m) = \frac{0.3 (S + 2)}{10}$$

Argelia/Marruecos:

$$VI (m) = (260 S)^{-0.3} \quad \text{pendientes entre el 10 y 25\%}$$

$$VI (m) = (64 S)^{-0.5} \quad \text{pendientes mayores de 25\%}$$

India:

$$VI (m) = 2 (D - 0.15)$$

Donde D es la profundidad del suelo productivo en m.

Israel:

$$VI (m) = X S + Y$$

Donde X oscila entre 0.25 y 0.3 en función de la lluvia, e Y varía de 1.5 a 2.0 en función de la erodibilidad del suelo.

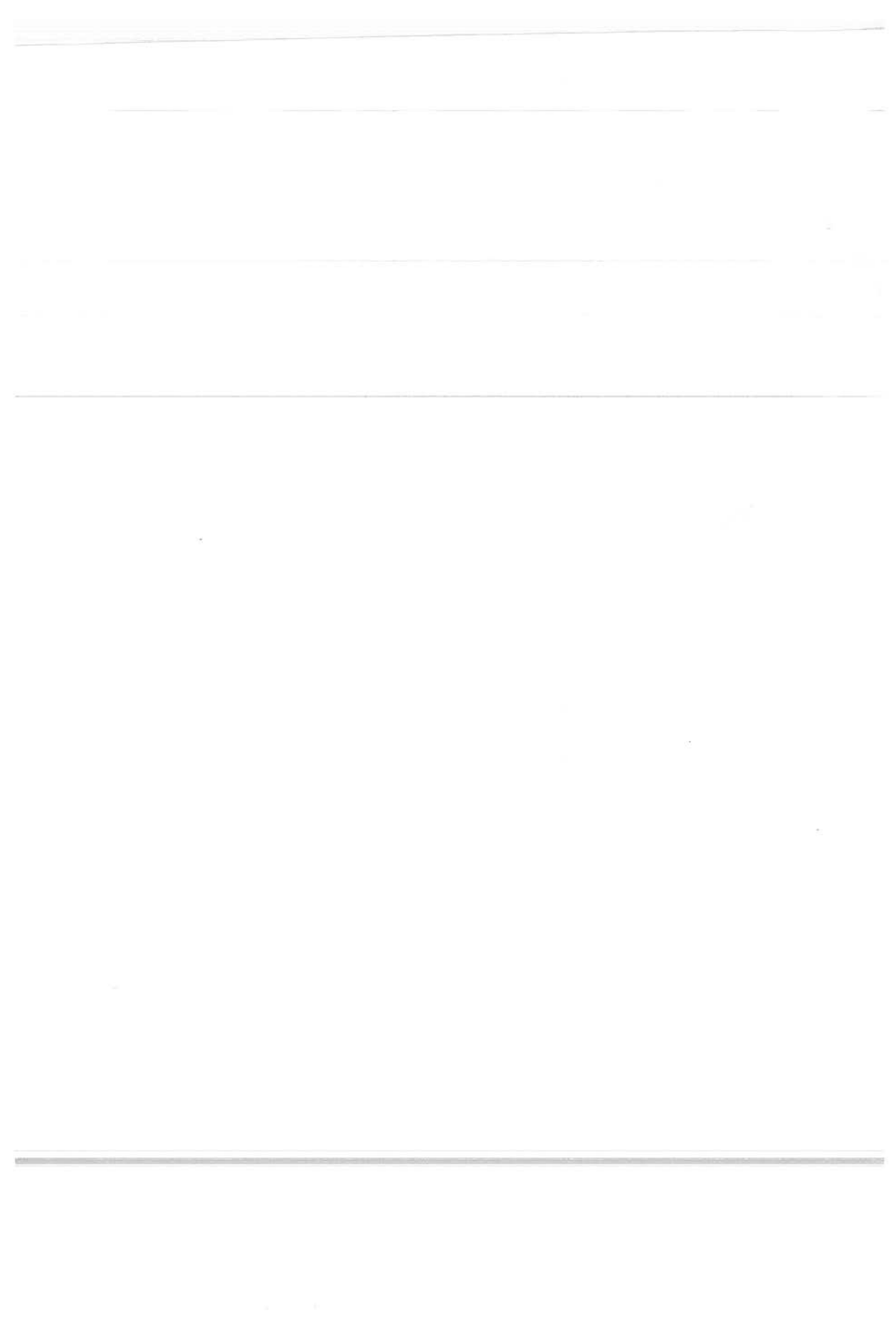
**ANEXO 4:
VALORES DE P Y C PARA RUSLE.**

Factor C	
Cultivo	C
Maiz grano	0.40
Maiz forrajero, colza	0.50
Cereales	0.35
Hortícola	0.50
Frutales	0.10
Praderas	0.02

Tabla 4: Valores del factor C para los principales cultivo [Wischmeier y Smith, 1978]

Factor P	
Práctica de manejo	P
Laboreo en la dirección de la pendiente	1.0
Labero con angulo con respecto a la dirección de la pendiente	0.75
Laboreo perpendicular a la dirección de la pendiente	0.50
Bandas de cubierta con ángulo con respecto a la pendiente	0.37
Bandas de cubiertas perpendicular es a la pendiente	0.25

Tabla 5: Valores del factor P para las principales técnicas [Wischmeier y Smith, 1978]



AGRICULTURA



GANADERÍA



PESCA Y ACUICULTURA



POLÍTICA, ECONOMÍA Y SOCIOLOGÍA AGRARIA



FORMACIÓN AGRARIA



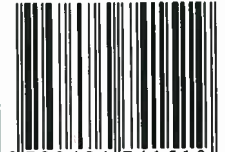
CONGRESOS Y JORNADAS



R.A.E.A.



ISBN 84-8474-151-6



9 798484 741519

P.V.P.: 10€



JUNTA DE ANDALUCÍA

Consejería de Agricultura y Pesca