

MEJORA DE SUELOS SALINOS Y CONTROL DE LA EROSIÓN EN ZONAS ÁRIDAS

Alberto Solé Benet
Yolanda Cantón Castilla

La salinidad y la erosión en suelos de zonas áridas son dos conjuntos de problemas que preocupan por las grandes pérdidas económicas que originan y en los que la sociedad a través de sus organismos de ciencia y la tecnología, invierte una gran cantidad de recursos humanos y económicos. Cientos de proyectos de investigación, decenas de congresos nacionales e internacionales, decenas de libros publicados, se dedican cada año a resolver ambos problemas. En este artículo se proporcionan los conceptos esenciales que puedan ser aplicados al ámbito de Parques y Jardines.

1.- Introducción

La *salinización*, en sentido amplio, y la *erosión* son procesos de degradación de suelos que se producen con relativa facilidad en las zonas áridas. Veamos primero qué entendemos por dichos tipos de degradación y luego su particular incidencia en las zonas áridas.

La degradación del suelo es un conjunto de procesos complejos que conduce a una pérdida de su valor real o potencial para producir cualitativa o cuantitativamente bienes o servicios (FAO, 1979).

Si bien los procesos de degradación del suelo suelen producirse interactivamente, para estudiarlos conviene agruparlos y clasificarlos en dos grandes grupos:

a) procesos que conducen a una pérdida de fertilidad a causa de cambios químicos, físicos o biológicos (*degradación química, degradación física, degradación biológica y degradación por exceso de sales ó salinización s.l.*).

b) procesos de erosión por causa del agua y del viento (*erosión hídrica y erosión eólica*).

La *salinización*, en sentido amplio, se produce por la presencia de sales en el suelo, que, por falta de lavado, se van acumulando progresivamente en la capa superficial. En realidad conviene hablar de dos procesos distintos: *salinización* en sentido estricto y *sodificación* o *alcalinización*. La principal consecuencia del primer proceso es la dificultad de las plantas en hidratarse convenientemente debido al aumento de la presión osmótica en el suelo o sustrato. La principal consecuencia de la *sodificación* es la pérdida de calidad en la estructura del suelo por dispersión de sus *coloides* (arcillas y compuestos húmicos), causando compactación y falta de aireación en el suelo o sustrato. En la *salinización*, en sentido amplio, interviene no solo el suelo sino también la calidad del agua (lluvia, riego), por lo que ambos factores deben estudiarse con detalle.

La *erosión* se produce cuando la fuerza de los determinados agentes externos, como el agua o el viento, es superior a las fuerzas de cohesión que unen las partículas del suelo en agregados o terrones, los cuales son disgregados y transportados por dichos agentes u otros, produciéndose la desaparición parcial o total del horizonte superficial o incluso de todo el suelo o sustrato. También en la erosión deben estudiarse con detalle los factores *suelo* y *agentes externos* (en especial lluvia y viento).

Independientemente de que en los procesos de *salinización* y de la *erosión* predominen mecanismos de tipo químico y de tipo físico respectivamente, en ambos procesos intervienen tanto agentes externos (agua de lluvia o de riego, sales, viento), como internos (carbono orgánico del suelo, arcillas, óxidos e hidróxidos de hierro, carbonatos, etc.).

Determinadas características del suelo, como su textura, mineralogía, estructura, materia orgánica, son en gran medida responsables de cómo este suelo resistirá y en qué grado los procesos de *salinización* y/o *erosión*. La identificación de los componentes del suelo que forman los agregados y la comprensión de los mecanismos que favorecen la agregación son la base indispensable para el manejo adecuado de la estructura que permitirá mitigar o corregir los efectos de la salinidad y de la erosión.

Asimismo la comprensión de los procesos externos (lluvias torrenciales, escorrentía, riego con aguas salinas) permite adoptar las medidas correctoras para impedir o al menos limitar su acción.

Las *zonas áridas* (UNESCO, 1979), que incluyen las *hiperáridas*, las *áridas s.s.*, las *semiáridas* y las *subhúmedas*, se caracterizan por un balance P/ETP inferior a 0,75, es decir que la evapotranspiración potencial (ETP) es siempre superior a la precipitación (P) por lo que se produce un déficit anual que, en el caso de las zonas mediterráneas ibéricas, se acentúa en período estival. En el Mediterráneo peninsular hay incluso zonas en el límite entre el árido y el semiárido (P/ETP = 0,2), con un balance hídrico claramente deficitario y además con temperaturas veraniegas elevadas. Las bajas precipitaciones y las elevadas evaporaciones impiden el lavado de las sales que se aportan al suelo con la lluvia, el riego y la meteorización de la roca madre. Sin lavado, hay acumulación de sales. Por otro lado, se conoce bien que cuanto menor es la precipitación anual en un lugar, más elevada es su variabilidad interanual (en el municipio de Almería, con una P promedio de 216 mm en los últimos 70 años se han registrado extremos anuales de 110 mm y 550 mm, según GHCN, 2005) y también el carácter extremo de sus precipitaciones (250 mm en 24 h en Tíjola, 209 en Cuevas del Almanzora). Las intensidades horarias de las precipitaciones en las regiones mediterráneas semiáridas pueden ser particularmente elevadas (Fig 1).

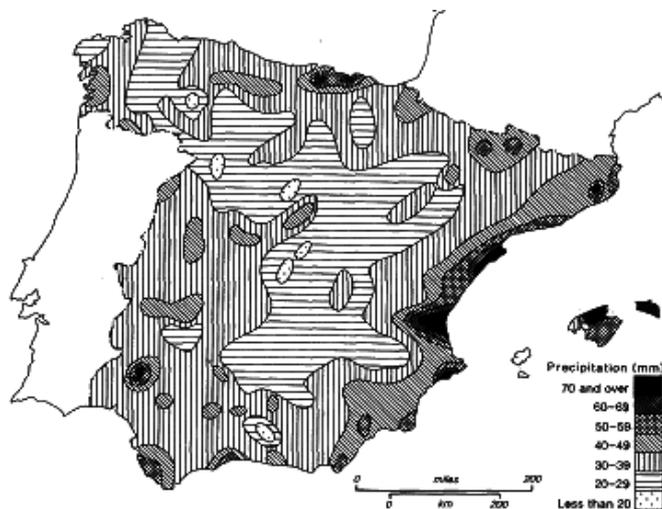


Fig 1.- Precipitaciones máximas en España en 1h (según Elias Castillo y Ruiz Beltrán, 1978) para un período de retorno de 5 años.

En este artículo se presentan los elementos esenciales para comprender la importancia de la *estructura* del suelo en la buena salud del mismo y como su degradación puede conducir a su pérdida por erosión. Para entender como se produce esta pérdida se deben analizar los factores lluvia y viento y los mecanismos de la erosión de suelos, es decir la disgregación y arranque de material, el transporte y la sedimentación. También se deben examinar los procesos que causan la salinidad del suelo, especialmente los derivados del riego con aguas salinas o de baja calidad, como afectan a la estructura, y cuales son las consecuencias para la vegetación.

Todos los conceptos relativos a la estructura del suelo, al impacto de las gotas de lluvia, a la fuerza del viento y a la calidad de la aguas salinas son fundamentales para explicar los procesos de salinización y erosión y son necesarios para poder abordar en la última parte de este artículo los métodos idóneos para su mitigación o control.

2.- La estructura del suelo

La estructura es la propiedad más importante del suelo y se define como la manera de asociarse los granos individuales en partículas secundarias o *agregados* junto con los espacios huecos, o *porosidad*, que llevan asociados. La estructura es el resultado de un conjunto de interacciones: mecánicas (pisoteo, penetración de raíces y animales), físico-químicas (entre determinados minerales y la materia orgánica), químicas (cementaciones diversas por parte de sales

más o menos solubles) y biológicas (entre las arcillas y los microorganismos del suelo como bacterias y hongos).

La estructura a su vez controla una gran parte de propiedades y comportamientos del suelo:

- **Porosidad:** espacio ocupado por los huecos que hay en un suelo. Es un espacio esencial para el movimiento del agua y de los gases del suelo y fenómenos de intercambio asociados. También es el espacio por el que pueden crecer las raíces.
- **Densidad aparente, D_a :** se define como la masa por unidad de volumen que ocupa una muestra de suelo no perturbada (como si estuviera en el campo). La D_a nos informa sobre el grado de compactación de cada horizonte. Está directamente relacionada con la porosidad total, P , del suelo, según la fórmula: $P = (D_r - D_a) / D_r$, siendo D_r la densidad real del suelo (se considera como aproximación el valor $2,65 \text{ kg L}^{-1}$ que es la D_r promedio de la mayor parte de los silicatos del suelo).
- **Infiltración:** proceso de entrada del agua y sustancias disueltas y en suspensión en el suelo, en general vertical, atravesando su superficie. Cuando aumenta la infiltración aumentan las reservas hídricas del suelo y disminuye la escorrentía y con ello el riesgo de erosión. La infiltración se ve dificultada por el *sellado* y las *costras*, por las piedras *dentro* de la superficie (Fig 9), y por los compuestos hidrofóbicos. Pero la infiltración se ve favorecida por la rugosidad superficial, las piedras *sobre* la superficie (Fig 9), el mantillo, la vegetación en general.
- **Permeabilidad:** proceso de movimiento del agua dentro del suelo, tanto en su componente horizontal como vertical (o *conductividad hidráulica* K). La compactación y las estructuras deficientes dan lugar a una disminución de K .
- **Penetrabilidad:** carácter penetrable por las raíces de las plantas, que pueden explorar un mayor volumen de suelo. Un suelo *compacto* es poco penetrable por las raíces.
- **Aireación:** movimiento del aire y/o gases dentro del suelo y entre éste y la atmósfera.
- **Fertilidad:** los suelos bien estructurados facilitan el acceso del aire, del agua y de los nutrientes a las raíces por lo que son más fértiles.

2.1.- Cómo se forman los agregados y factores que controlan su estabilidad

A simple vista percibimos los agregados del suelo como unidades más o menos discretas, de forma y tamaño diverso. En realidad estos agregados, o *macroagregados*, están formados por la unión de *microagregados* y otras partículas discretas, todos ellos de tamaños inferiores a $0,25 \text{ mm}$ ($250 \text{ }\mu\text{m}$). A su vez los *microagregados* están formados por la unión de partículas discretas de arcilla (partículas inferiores a $2 \text{ }\mu\text{m}$).

Los *macroagregados* ($> 250 \text{ }\mu\text{m}$) se mantienen gracias al poder aglutinante de componentes biológicos tales como las raíces de las plantas, las hifas de los hongos y a la acción cementante de sustancias inorgánicas tales como sesquióxidos, algunos silicatos y carbonatos. Las raicillas y las hifas de los hongos forman auténticas mallas vivientes que engloban a los *microagregados*. Cuanto mayor es la longitud de las raíces y de las hifas de los hongos por unidad de peso de suelo, mayor es la estabilidad de sus agregados. Aparte del efecto agregante de raíces e hifas, las propias raicillas y los microorganismos presentes en el suelo generan sustancias mucilaginosas (formadas por polisacáridos, poliurónidos y compuestos aminados) que tienen propiedades adherentes, lo que les permite unir partículas y/o *microagregados* entre sí.

Los *macroagregados* en estado seco se pueden disgregar por *estallido* o desmoronamiento cuando se humectan rápidamente a consecuencia de las presiones diferenciales que se producen dentro del agregado al quedar el aire aprisionado en poros ciegos, o bien debido al hinchamiento diferencial del material cuando el agua penetra rápidamente en los poros. La rotura de los *macroagregados* se conoce como *desagregación* o *disgregación* (en inglés *slaking*). La presencia y cantidad de elementos agregantes controla la resistencia a la disgregación.

Los *microagregados* arcillosos (inferiores a 250 micras) se mantienen unidos gracias a débiles fuerzas atractivas entre las superficies de las partículas que compensan a las fuerzas repulsivas entre las partículas causadas por la formación de *dobles capas difusas*. Las superficies en contacto casi adhesivo constituyen el principal factor que controla las fuerzas de atracción. En consecuencia, los distintos tipos de unión entre diferentes especies mineralógicas explican las distintas

resistencias de los *microagregados*. La destrucción de los *microagregados* se conoce como *dispersión*. El mecanismo inverso, generador de *microagregados*, se conoce como *floculación*.

Las fuerzas repulsivas entre las partículas arcillosas dependen de la *densidad de carga superficial*, de la *valencia* y del *radio iónico* de los cationes intercambiables del suelo y de la solución del suelo (agua en los poros). En la estabilidad de los microagregados intervienen: a) la capacidad de intercambio catiónico, CIC, de los distintos tipos de arcillas en el siguiente orden: *caolinita* < *illita* < *clorita* < *vermiculita* < *esmeclita*, y b) los cationes intercambiables en el siguiente orden: $Ca^{2+} >> Mg^{2+} > K^+ > Na^+$. Esto nos indica que un suelo con una gran cantidad de Ca intercambiable será muy estable, mientras que uno con una gran cantidad de Na intercambiable se dispersará fácilmente y será muy inestable. Pero una arcilla con baja CIC, como la *caolinita* o la *illita* requerirán de menos Na^+ para dispersarse que una arcilla con elevada CIC.

Además de los citados mecanismos de unión entre las partículas arcillosas, los *compuestos húmicos* también contribuyen significativamente a las uniones: los numerosos radicales carboxílicos y fenólicos de las macromoléculas húmicas (de peso molecular entre 100.000 y 400.000) se unen a las arcillas. También el Fe y el Al son excelentes floculantes. Se encuentran en el suelo como elementos parcialmente hidrolizados y polimerizados con cargas positivas y son fuertemente adsorbidos sobre las superficies de las arcillas pudiendo ocasionar cambios de signo, de negativo a positivo. Cuando la carga neta es cero se produce floculación.

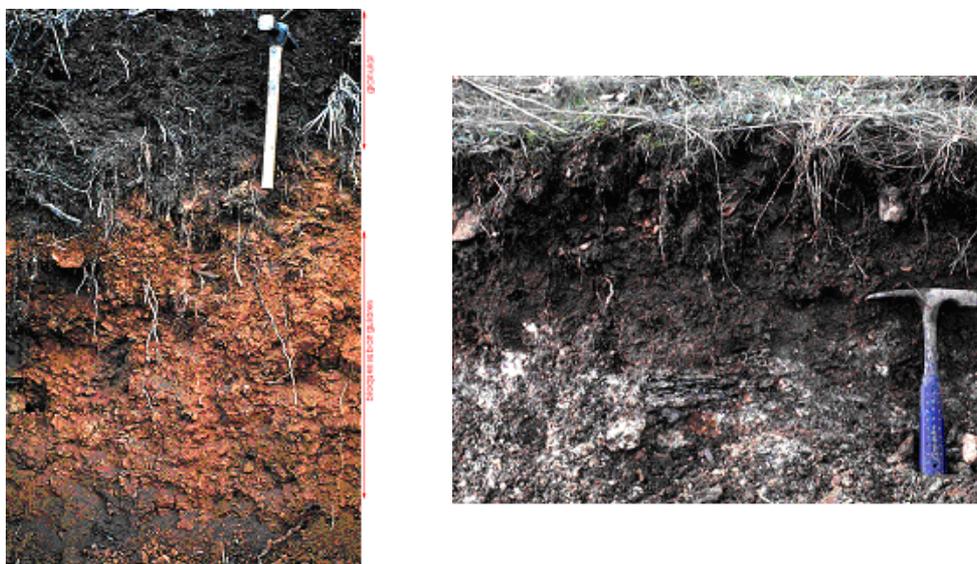


Fig 2.- Tres tipos de estructura muy comunes: granular y poliédrica subangular (foto izquierda, arriba y abajo, respectivamente) y grumosa (foto derecha). Fotos Depto. Edafología UGR (2004).

El porcentaje de agregados y su distribución por tamaños, juntamente con el grado de la estructura son también parámetros importantes que pueden indicarnos la estabilidad de la estructura y de ahí su nivel de resistencia a los agentes externos.

En los primeros milímetros del suelo a partir de la superficie, la estructura tiene una importancia fundamental de cara a comprender los mecanismos erosivos.

En el peor caso de degradación de la estructura (cuando se produce una combinación de disgregación y dispersión), las partículas discretas del suelo se colocan unas junto a otras sin dejar otra porosidad que la intergranular: se forma una costra y la infiltración del agua de lluvia se ve dificultada en estas condiciones, iniciándose rápidamente la escorrentía.

Los suelos con estructura altamente resistente a la disgregación y a la dispersión, tienen, por el contrario, una elevada capacidad de infiltración.

Aparte de los ya citados mecanismos de disgregación (física) y dispersión (físico-química), la estructura puede degradarse por compactación (pisoteo o paso de maquinaria excesivos) y por también por degradación biológica (pérdida neta de materia orgánica).

MICROAGREGADO = unida básica formada por componentes minerales, orgánicos y microporos; su estabilidad depende esencialmente de:

- tipo de arcilla
- presencia de agentes cementantes
- contenido en humus
- química del suelo

MACROAGREGADO = unidad de orden superior formada por microagregados; su estabilidad depende esencialmente de:

- cantidad de raíces
- hifas de hongos
- tipo de manejo del suelo
- actividad bacteriana (polisacáridos)

2.2. Estabilidad estructural y destrucción de la estructura

La *estabilidad estructural* es la resistencia que oponen los agregados del suelo a ser destruidos en presencia de agua. Se puede medir mediante varios métodos: n° de impactos de gotas de agua que consiguen destruir un agregado de cierto tamaño, por ej. 4 mm; tamizado de agregados en seco y en húmedo; test de Emerson (inmersión brusca de un agregado en agua y medida del tiempo que tarda en disgregarse), etc.

Cuanto más agregados estables haya en el suelo, más baja será su densidad aparente (mayor volumen del suelo ocupado por aire) y por consiguiente más elevada será su permeabilidad (mayor infiltración y mayor conductividad hidráulica). La micro y la meso fauna contribuyen también a una elevada macroporosidad.

Un suelo bien estructurado es aquel que al secarse se desmenuza fácilmente de forma esponjosa, cuando está relativamente seco puede labrarse con facilidad y cuando está húmedo no se adhiere a los aperos de labranza. Un agregado verdadero debe ser estable al agua, es decir, debe mantenerse después de haber sido humedecido lentamente.

Responsables de la estabilidad de los agregados: cationes tri y bivalentes, abundancia de arcillas de tipo 2:1, ácidos húmicos, humina, sesquióxidos de Fe, etc.

Responsables de la inestabilidad de los agregados: poca arcilla o arcilla de tipo 1:1, o saturadas con cationes monovalentes, ácidos fúlvicos,

2.2.1. Sellado y encostramiento.

A veces los términos sellado y encostramiento del suelo se usan como sinónimos. Sin embargo es mejor referirse al *sellado* como a la reordenación de las partículas de la superficie del suelo durante una lluvia intensa, mientras que la *costra* es el endurecimiento de la superficie sellada cuando el suelo se seca.

El sellado tiene unos pocos milímetros de espesor y no se agrieta (por estar todavía húmedo). Al secarse la capa sellada puede dar lugar a la formación de una costra superficial. Pero a veces la capa sellada superficial, a medida que se seca, presenta tal cantidad de grietas que ya no constituye una costra. La *costra* pueden definirse como la capa superficial de un suelo seco que tiene un espesor que oscila entre unos pocos milímetros hasta unos pocos centímetros, que es más densa, estructuralmente diferente o más cementada que el material inmediatamente por debajo de ella, y también más dura y quebradiza cuando más seca está.

Veamos los principales mecanismos de formación de las costras (Fig 3, según Romkens, 1990): *disgregación*, *dispersión*, *filtración* y *deposición*. Los dos primeros coinciden con los mecanismos de destrucción de la estructura explicados más arriba. La *filtración* es el movimiento vertical de las partículas o microagregados por entre los macroagregados, rellenando los macroporos y disminuyendo su capacidad conductora. La *deposición* es el mecanismo por el cual las partículas dispersas y/o los microagregados se van depositando en microdepresiones en la superficie del suelo, formando una estructura en capas muy finas que limitan la infiltración.

SELLADO Y ENCOSTRAMIENTO DEL SUELO

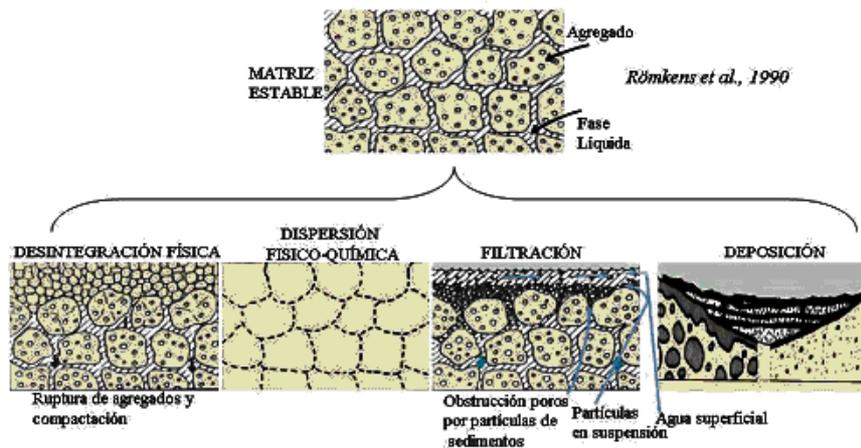


Fig 3.- Procesos de sellado y encostramiento del suelo (según Romkens, 1990).

Es importante mencionar los más importantes tipos de costras físicas. Costras *estructurales*: se forman por el impacto de las gotas de lluvia, suelen ser muy finas y se destruyen con mucha facilidad (agrietamiento, lluvia, fauna del suelo, plántulas). Costras *coalescentes*: se forman sobre todo por la disgregación y/o dispersión debido al agua de riego, son más gruesas y sólo se destruyen con la labranza. Costras *deposicionales*: resultan de la acumulación de partículas procedentes de la salpicadura y/o de la escorrentía; suelen ser espesas y difíciles de destruir. En los dos últimos tipos, habrá imposibilidad o dificultad en la nascencia de plántulas.

Veamos las etapas de formación de una costra *deposicional*, que incluyen la mayoría de mecanismo de formación de los otros tipos de costras:

- *Etapa 0*: suelo desnudo recién labrado, seco; empieza a llover.

- *Etapa 1*: comienza a sellarse la superficie como consecuencia del impacto de las gotas de lluvia y de la disgregación de los agregados, cuyos partículas individuales se reordenan, originándose una capa superficial con menor porosidad que la del suelo subyacente. En suelos fuertemente agregados, tras lluvias cortas puede no identificarse esta capa o que consista en una capa delgada de agregados más pequeños en las microdepresiones a modo de puente entre los más grandes. En los suelos débilmente agregados el *sellado* se forma rápidamente, se reorganizan los agregados y partículas y se rellenan los intersticios con la micromasa desprendida. La superficie del suelo se hace más lisa a medida que las microelevaciones son erosionadas.

- *Etapa 2*: En suelos fuertemente agregados, la capa superficial se desarrolla cada vez más, continúa la disgregación de agregados y el reordenamiento de los mismos en la superficie. Inmediatamente por debajo de dicha capa se puede producir la coalescencia de agregados, ampliándose el espesor de la capa superficial.

- *Etapa 3*: Representa el máximo desarrollo de la costra. La escorrentía es máxima debido a la baja permeabilidad de la capa superficial. Si la capacidad de transporte de la escorrentía es elevada, dicha capa superficial puede ser erosionada, contribuyendo a formar costras *deposicionales* aguas abajo, de mayor espesor.

2.3. Importancia de la porosidad

El volumen de las fases líquida y gaseosa, o el de esta última si el suelo está seco definen la porosidad. También la relación entre el volumen de huecos V_v y el volumen total.

La eficacia para la transferencia de fluidos lleva a distinguir *poros de transmisión* mayores de $50 \mu\text{m}$ (porosidad efectiva o comunicante), *poros de almacenamiento* entre $0,5$ y $50 \mu\text{m}$ y la *porosidad residual* formada por los poros muy finos y huecos ocluidos (Porta et al., 2003).

La distinción entre *macroporosidad* y *microporosidad* no tiene base física real si bien se utiliza para expresar la mayor o menor eficacia de un poro para participar en los procesos de transferencia. El límite entre ambas se suele fijar en un diámetro aparente de 30 a 60 μm .

Sin embargo, para el diseño de sistemas de drenaje, resulta de interés el valor de la macroporosidad, calculada como:

$$\text{macroporosidad} = \text{porosidad total} - \square_{.33} \text{ kPa}$$

La porosidad puede caracterizarse por la geometría de los poros y huecos, espacios irregulares no rígidos, y de sus interconexiones, todo lo cual controla el comportamiento del agua. La porosidad es un espacio vital para las raíces y está ligada a la estructura de cada horizonte del suelo, dependiendo por consiguiente de los mismos factores de control que ésta.

Un suelo demasiado compacto presenta poca *porosidad de transmisión*, por lo que el movimiento del agua quedará restringido. Además, una de las causas por las cuales una raíz puede detener su crecimiento es por una inadecuada geometría del espacio poroso en un horizonte determinado. Los procesos de compactación por la acción de fuerzas externas suelen estar ligados a la acción del hombre, sobre todo por el paso repetido de maquinaria. La consecuencia es una reducción de la porosidad y un aumento de la densidad aparente (Fig 4).

El suelo presenta una resistencia a la deformación física, tanto a la compresión volumétrica como a la deformación lineal. Para un contenido de humedad dado, por lo general, ambos tipos de resistencias a la deformación aumentan con la compactación y con la densidad aparente. Al aumentar el contenido de humedad de un suelo será más susceptible a la deformación, de ahí la mayor vulnerabilidad a la compresión en suelos húmedos.



Fig 4.- Esquema de la compactación de agregados mostrando la disminución de la porosidad y la reorientación de partículas y poros.

3.- Salinidad y/o sodicidad de suelos o substratos

La salinidad y la sodicidad son componentes naturales de muchos sistemas agrarios (Fig 5) áridos y de algunos ecosistemas naturales. El primer paso para poder evitar, mitigar o corregir la salinidad y/o la sodicidad de un suelo es su correcta identificación.

Un *suelo salino* se define como aquel que tiene una conductividad eléctrica superior a 4 dS/m (ó mmhos/cm). Es importante señalar que este es el límite inferior de un valor que depende también de la tolerancia de las plantas.

Un *suelo sódico* se define como aquel suelo no salino que contiene suficiente Na intercambiable como para afectar negativamente la producción vegetal y la estructura del suelo en la gran mayoría de condiciones de suelo y planta. La relación de Na absorbido o RAS del extracto de pasta saturada debe ser superior a 13. La *sodificación* no es solo el resultado de un aumento absoluto del Na^+ en la solución del suelo, sino sobre todo e la disminución drástica del contenido en iones Ca^{2+} y Mg^{2+} debido a la precipitación de las sales que los contienen.

Una salinidad elevada conduce a una sequía fisiológica de las plantas debido a que deben hacer frente a una presión osmótica demasiado elevada para extraer agua del medio (se impide una adecuada absorción de agua por las raíces). También conlleva problemas de toxicidad: algunos iones, como el cloro, el sodio y el boro, pueden afectar a procesos fisiológicos, alterando el correcto desarrollo de las plantas.

También en condiciones de elevada salinidad puede verse afectada la estructura del suelo: un exceso de sales sódicas favorece la degradación de la estructura y la aparición de costras (Fig 3) que ocasionan la asfixia radicular. Por otro lado, en condiciones de elevada sodicidad, el ión Na^+ ocasiona la dispersión de la materia orgánica y de las arcillas, con la consiguiente pérdida de estructura, por lo que los efectos de impermeabilización y formación de costras se acentúan.



Fig 5.- Salinidad y erosión en un campo agrícola en las Bardenas.

Tabla 1.- Clasificación de los suelos según su tipo de salinidad				
criterio	normal	salino	salino-sódico	sódico
CE (dS/m)	< 4	> 4	> 4	< 4
RAS	< 13	< 13	> 13	> 13
pH	< 8,5	< 8,5	> 8,5	> 8,5
estructura	no degradada	no degradada	no degradada	degradada
eflorescencias	no	cloruros	cloruros + sulfatos	humatos

El RAS, o relación de sodio adsorbido viene definido por la siguiente fórmula en la que participan las sales solubles del extracto de la pasta saturada del suelo.

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}, \text{ los cationes expresados en meq L}^{-1}.$$

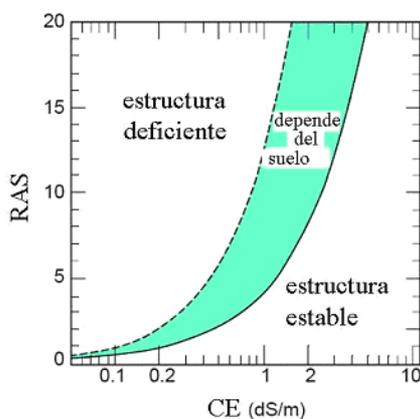


Fig 5.- Relación entre la CE y el RAS del agua de riego para predecir la estabilidad de la estructura del suelo (según De Hayr y Gordon, 2004).

Deben tomarse especiales precauciones para evitar la confusión entre los efectos causados por la baja fertilidad del suelo de aquellos causados por la salinidad. Las plantas poco desarrolladas, achaparradas, debidas a una baja fertilidad, son comúnmente verde-amarillentas, mientras que las achaparradas por efecto de la salinidad son verde-azuladas. Ese tono azulado es causado por una cubierta cerosa de grueso espesor, sobre la superficie de las hojas y el color más oscuro se debe a un aumento del contenido de clorofila por la superficie foliar. Este efecto azulado se observa con claridad en la remolacha, la alfalfa y en las crucíferas. De cualquier forma para asegurarse de las causas que provocan un deterioro del desarrollo vegetal, se deben realizar una serie de determinaciones analíticas, como las que se detallan a continuación.

Hay una serie de métodos de evaluación en aguas y suelos que son clave para identificar la salinidad y/o sodicidad de un suelo (Tabla 1) y/o sus riesgos de adquirirla a partir de aguas de riego:

- **pH:** Nos orienta sobre el tipo de salinidad. Medida directa con el pHmetro. Los valores de la tabla 1 sirven esencialmente para el suelo.
- **Conductividad eléctrica, CE:** aptitud del suelo o del agua para transmitir corriente eléctrica (es la inversa de la resistencia eléctrica). La concentración de sales es función de la proporción (suelo:agua) del extracto. Se ha de tener en cuenta que unas sales conducen más la electricidad que otras. Se mide mediante *conductivímetro* en el extracto de la pasta saturada o directamente en el agua de riego. Suele expresarse en dSm^{-1} (o mmhos cm^{-1}).
- **Sales:** Los distintos tipos de sales, y su cantidad, teniendo en cuenta que la concentración de aniones debe ser igual a la de cationes (en mol/L). Los aniones y cationes que normalmente se determinan en un suelo salino son: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , CO_3^{2-} y HCO_3^{2-} . Si al hacer el análisis nos salen más cationes que aniones, deberemos determinar también los nitratos del extracto de saturación.
- **Carbonatos y bicarbonatos:** Determinación de la alcalinidad del extracto del suelo con solución de ácido clorhídrico a los puntos sucesivos de equivalencia del anión carbonato (pH 8,3) y del anión bicarbonato (pH 4,0).
Carbonato: 10 ml de extracto y valoración con HCl 0,01N hasta viraje de la fenolftaleína.
Bicarbonato: En la misma solución del carbonato, continuar la valoración con HCl 0,01N hasta viraje del anaranjado de metilo.
- **Sulfatos:** Determinación como BaSO_4 . Medir la turbidez originada por BaSO_4 mediante nefelometría.
- **Nitratos:** Reducción de Nitratos a Nitritos con solución de sulfato de hidracina. Medición colorimétrica a 540 nm en presencia de sulfanilamida y naftil-etilendiamida.
- **Cloruros:** Determinación potenciométrica de los cloruros con electrodos de plata.
- **Cationes:** Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Medida directa por Espectroscopia de absorción atómica.
- **PSI:** Nos informa de la cantidad de sodio que se intercambia entre la disolución acuosa del suelo y el complejo arcillo-húmico del mismo, con respecto a otros cationes. Se calcula de la siguiente forma, tomando como unidades los meq/100g de cada ion:

$\text{PSI} = \text{Na}^+ / \text{Suma de cationes}$ (expresado como %).

Como hay una relación casi lineal entre el PSI y el RAS, suele utilizarse éste último por ser más fácil de medir.

4.- Causas externas de la salinización

Todas las aguas de riego tienen un contenido mayor o menor de sales solubles. Sin embargo, en las regiones áridas, precisamente las que más riego necesitan, esa salinidad es con frecuencia mucho mayor. Si nos atenemos a los criterios de Roades (1992) (Tabla 2), el riego con aguas con una CE inferior a 0,7 dS/m no debe acarrear ningún problema ya que las pérdidas por percolación profunda, en general superiores al 15% del agua aplicada son suficientes para mantener un contenido aceptable de sales en la solución del suelo (Pizarro, 1985). Cuando se riega con agua cuya salinidad está entre 0,7 y 3 dS/m o incluso mayor, se requieren lavados para mantener un contenido salino sostenible. Por ello deben calcularse los requerimientos adecuados de lavado (como se indican en el capítulo siguiente).

Aparte del riesgo de salinización del suelo, el agua puede contener ciertos iones que en determinadas concentraciones son tóxicos para ciertas plantas, o incluso para la mayoría. La tabla 3 contiene la clasificación de Ayers y Wescot (1975) que indica la susceptibilidad a la toxicidad del Cl^- , B^- y Na^+ .

Debe tenerse en cuenta que la topografía es un factor importante a la hora de considerar los riesgos de salinización. Un terreno llano aparentemente debería presentar homogeneidad en la repartición del agua y las sales, sin embargo, cuando hay caballones, la parte superior de éstos concentrará la mayor proporción de sales solubles que han ascendido por capilaridad, mientras que la parte inferior de los surcos tendrá menor contenido salino. En cambio, en un terreno

inclinado, son precisamente las partes inferiores en las que se acumulan mayor proporción de sales y por lo tanto el riesgo de salinización es mayor.

Tipo de agua	CE (dS/m)	TDS (g/L)	Clasificación
Consumo humano y riego	< 0,7	< 0,5	no salina
Riego	0,7 - 2,0	0,5 - 1,5	ligeramente salina
Drenaje 1º y agua subterránea	2,0 - 10,0	1,5 - 7	moderadamente salina
Drenaje 2º y agua subterránea	10 - 20	7 - 15	altamente salina
Agua subterránea muy salina	20 - 45	15 - 35	extremadamente salina
agua marina	> 45	> 35	salmuera

ion (meq/L)	inexistentes	crecientes	graves
Na	< 3	3 - 9	> 9
Cl	< 4	4 - 10	> 10
B	< 0,7	0,7 - 2,0	> 2

5.- Métodos de corrección y mitigación de la salinidad/sodicidad

La salinidad del suelo se maneja mediante una combinación de estrategias vegetativas y de ingeniería encaminada a disminuir la capa freática en las áreas afectadas por la salinidad. El resultado será: menor encharcamiento, menor evaporación, menor movilización y concentración de sales en la superficie del suelo.

5.1.- Manejo de la salinidad

Para disminuir la salinidad de un suelo salino hay que lavar las sales solubles del suelo. Para ello hay que aplicar dosis de riego por encima de las necesarias para el cultivo. El lavado tiene lugar mediante la percolación de los solutos del suelo (sales) en condiciones de saturación. En consecuencia los suelos salinos no requieren de ninguna enmienda para reducir la salinidad.

En los suelos salinos se recomienda hacer lavados abundantes, teniendo en cuenta que debe existir un adecuado drenaje, para que no se produzcan encharcamientos o escorrentías. Hay que tener en cuenta que en el invierno la solubilidad de las sales disminuye al bajar la temperatura y que en el verano, si la evapotranspiración es muy alta, pueden requerirse mayores lavados; además debe tenerse en cuenta la textura del suelo.

Otro factor a tener en cuenta es que según el tipo de sistema de riego, deberemos poner la plántula o la semilla en un lugar u otro. En riegos por surcos, como las sales se acumulan en la parte central más elevada (menos mojada), las plántulas o semillas se situarán en un punto distante de esta parte central, para no ser dañadas.

En riego por goteo, se acumulan las sales en la periferia del bulbo por lo que habrá que tenerlo en cuenta, para evitar problemas de asfixia radicular. En riegos por aspersión, el agua se mueve hacia abajo, se usa para cultivos poco sensibles y de raíces poco profundas. Hay que tener especial cuidado con la calidad del agua pues algunos iones como el Na⁺ y el Cl⁻ pueden dañar las hojas.

La cantidad de agua requerida para realizar el lavado de sales se determina mediante la siguiente fórmula, que nos determina la *fracción de lavado*, expresada en %, es decir la sobredosis de agua de riego necesaria para que no aumente la salinidad del suelo. Si se aporta menos agua, se salinizará el suelo y si se aporta más, el suelo perderá sales.

$$FLo = CE \text{ del agua de riego } (100) / CE \text{ máxima del agua de drenaje}$$

Las especies vegetales soportan la salinidad en mayor o menor grado, habiéndose calculado y publicado tablas que reflejan para cada cultivo la máxima conductividad que puede tener un agua de drenaje.

Si regamos un maíz con un agua cuya CE es 5 dS/m y consultamos la tabla de la CE máxima para este cultivo en el agua de drenaje que es 18, el FL será 27,7 %, lo que significa que las necesidades de evapotranspiración se deben incrementar en este porcentaje.

Conociendo el valor FLo y conociendo la necesidad de agua del cultivo, obtendremos FL .

$$FL = ET/(1-FLo)$$

Siendo ET la evapotranspiración del cultivo. Así por ejemplo, para el maíz deberemos multiplicar las necesidades de agua por 1,38.

En resumen, el valor que se obtiene multiplicado por la cantidad de riego previamente calculada para un cultivo determinado nos dará la cantidad de agua en exceso que debemos aplicar, teniendo en cuenta la conductividad eléctrica del agua de riego, la conductividad eléctrica máxima que puede tolerar cada planta antes de marchitarse y conociendo también sus necesidades de agua, relacionadas con la evapotranspiración (ET).

En la preparación del suelo, se debe conseguir que el movimiento del agua, tanto en profundidad como en superficie, sea lo más uniforme posible, facilitando el drenaje y el desagüe, con labores que eviten la compactación del suelo (suela de arado).

Con un riego de presiembra, capaz de lavar las sales precipitadas en la estación seca, se dispondrá de un suelo de partida menos salino. Se evitará la formación de costra superficial, frecuente en estos suelos de elevada concentración de sales y con efectos negativos sobre la nascencia de las plantas.

La práctica de la siembra directa disminuye o evita la formación de costra y conserva un cierto grado de humedad en la superficie del suelo. Con esta misma finalidad, se puede emplear cualquier material sobre el terreno, que tenga un efecto de mantener la humedad de los horizontes superficiales y los niveles de concentración de las sales, dentro de valores aceptables por las plantas seleccionadas. Tal sucede con los enarenados, que consiguen bajar los porcentajes de reducción de cosecha, que figuran en la bibliografía, para cultivos sensibles a determinados niveles de conductividades del extracto de saturación, o del agua empleada en el riego.

La siembra debe de realizarse de tal manera que se consiga una buena germinación y nascencia. Para ello la semilla debe estar localizada en zonas donde la concentración de sales sea lo más baja posible y disponga de la humedad suficiente. Si el riego se hace por surcos, el lugar recomendable de colocación de la semilla (o plantones) es en la mitad del lomo. La previsible disminución del porcentaje de germinación que ocasiona la concentración de sales, se puede paliar aumentando la dosis de siembra.

El riego afecta directamente a las condiciones salinas y no solamente por la calidad del agua. La técnica de riego empleada influye en la variación del potencial hídrico del suelo, encontrándose las fluctuaciones más amplias en los sistemas de gravedad (por inundación) y de aspersión y manteniéndose casi constante este potencial en los riegos de alta frecuencia (aspersión y goteo). Igualmente estos sistemas inciden en los contenidos de humedad del suelo y como consecuencia en la variación de la concentración de sales, de la solución del mismo. Los riegos de alta frecuencia y localizados, mantendrán esta concentración casi uniforme dentro de la zona mojada, pero será elevada en los límites de ésta. La distribución de sales será más uniforme en los de gravedad y aspersión, pero a medida que los intervalos entre riegos aumentan, las variaciones en el contenido de humedad lo harán también y como resultado la concentración de sales, encontrándose las conductividades menores, inmediatamente después del riego y las mayores al final de cada intervalo. El lavado de sales será mayor con los riegos de gravedad y aspersión y menor en los localizados.

La fertilización ha de realizarse adecuadamente, especialmente en cuanto a la selección y localización de los abonos. Han de aplicarse abonos que no eleven los contenidos iónicos causantes de la salinidad. Por el contrario, han de emplearse aquellos que puedan mejorar estos contenidos y faciliten el intercambio iónico desde el punto de vista de su lavado. Finalmente todos aquellos fertilizantes que mejoran las propiedades físicas del suelo facilitarán el movimiento de agua del perfil. La incorporación de materia orgánica actúa sobre estas propiedades e incrementa su fertilidad.

Cuando el horizonte subsuperficial del suelo en el que pretendemos lavar las sales no tiene una permeabilidad adecuada, se corre el riesgo de saturar el horizonte superficial y provocar condiciones hidromorfas tan nefastas para las plantas como la salinidad: asfixia radicular. Si

una labranza profunda o un subsolado no solucionan el problema de mejorar la estructura y permeabilidad del horizonte, debe instalarse un sistema de drenaje artificial. En terrenos agrícolas, suele hacerse mediante zanjas profundas o un sistema de tuberías drenantes enterradas que desaguan en algún canal situado aguas abajo. (García y Dorransoro, 2004).

Como síntesis podemos decir que la salinidad del suelo se combate con:

- mejora del drenaje externo e interno,
- manejo vegetal,
- manejo del riego,
- mejora de la estructura del suelo

5.2.- Manejo de la sodicidad

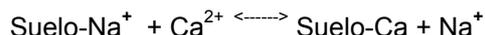
El manejo de los suelos sódicos requiere en general un doble proceso: a) substituir el Na^+ intercambiable por otro catión más favorable, como el Ca^{2+} o el Mg^{2+} y b) lavar el exceso de sodio del perfil. Para ello, se suele añadir una fuente de calcio relativamente soluble como el yeso (CaSO_4) o el azufre:

1. Aplicación de yeso sobre el suelo, un posterior enterramiento y realización de un lavado. Se puede aplicar con el agua de riego. Por cada meq de Na^+ intercambiable en 100 g de suelo que se elimine se aplicarán 1.910 kg de yeso/ha.



2. Aplicación de azufre: su efecto es más lento, ya que requiere la oxidación por parte de los microorganismos del azufre existente en el suelo. Posteriormente se transformará en ácido sulfúrico, que en presencia de calizas, las disolverá y dará yeso. Como vemos, es un efecto más lento y cuanto más fino sea el azufre, más rápida será su acción. Los lavados no deben hacerse hasta que el azufre esté bien oxidado, por lo que éste no se aplicará con el agua de riego. Por el poder acidificante del azufre se recomienda utilizarlo sólo en terrenos calcáreos. Por cada miliequivalente de Na^+ intercambiable por 100 g de suelo que se elimine se aplicarán 400 kg de azufre ha^{-1} (o 40 g m^{-2}).

La reacción que se produce en ambos tratamientos es el intercambio del sodio por el calcio que aportamos de una forma u otra; así el sodio pasa a la disolución del suelo y con el lavado es eliminado.



6.- La erosión del suelo

Se distingue entre erosión hídrica y eólica en función de que el agente responsable del proceso sea el agua o el viento. La erosión provocada por el agua es la más extendida en nuestro país si bien la eólica puntualmente puede ser muy importante.

La erosión hídrica se define como el desplazamiento horizontal o lateral de las capas superiores del suelo o de todo el suelo, junto con el transporte y posterior depósito de las partículas en otro lugar por acción del agua.

La erosión eólica es el proceso por el cual el viento recoge y transporta el material superficial suelto y las partículas arrastradas a su vez desgastan otros materiales (edificios, monumentos, etc.) por lo que su impacto es siempre negativo.

A escala mundial la erosión originada por la lluvia afecta a una mayor superficie que el resto de tipos de degradación del suelo y es más grave que la causada por el viento. Pero ello no significa que la erosión eólica sea menos importante en todas partes, pues hay regiones en las que sus consecuencias son tan calamitosas como la peor de las erosiones hídricas.

La erosión del suelo siempre ha existido e incluso en épocas geológicas pasadas hubo períodos de fuerte actividad. Pero gracias a la erosión de las montañas existen las llanuras aluviales y los deltas, como ejemplos de tierras buenas tierras agrícolas. En épocas históricas recientes también se han registrado tasas de erosión elevadas a causa de la puesta en cultivo de grandes superficies

y a talas masivas. Cuando la erosión se produce sin intervención del hombre se denomina *erosión geológica* o *natural*, y normalmente sus tasas son bajas. Cuando el hombre altera los procesos naturales se produce la *erosión acelerada* o *antrópica*, con tasas son mucho más elevadas. Este último término es el que está relacionado con la desertificación del territorio porque no es sostenible para el suelo y además altera y degrada la vegetación, los flujos hídricos, la fauna, y al ecosistema en su conjunto (Cerdà, 2001). La erosión en parques y jardines es un caso muy particular de erosión acelerada pero dado el contexto urbano o peri-urbano en el que se produce, sus daños pueden ser cuantiosos no sólo por las labores de reposición del suelo y las plantas afectadas, sino también por el impacto visual negativo que produce (sensación de descuido o abandono).

6.1.- Erosión hídrica

En la región mediterránea el proceso de erosión hídrica se ve exacerbado por una serie de características propias de esta región, entre las que se incluyen: a) las fuertes pendientes; b) la aparición frecuente de un sustrato litológico impermeable, muy erosionable sobre el que se desarrollan suelos pobres muy susceptibles a la erosión; c) las lluvias torrenciales y d) la escasa cubierta vegetal y su mal estado, especialmente durante las frecuentes sequías, que ofrece en conjunto un grado de protección del suelo muy bajo; y otros factores que influyen exclusivamente a los suelos agrícolas o los de monte.

Antes de pasar a describir los procesos de la erosión es conveniente distinguir entre dos conceptos muy distintos entre sí pero de nombres relativamente parecidos: *erosionabilidad* y *erosividad*. *Erosionabilidad* o *erosibilidad* es la susceptibilidad intrínseca de un suelo a erosionarse, independientemente de su posición topográfica. Los factores que intervienen en la *erosionabilidad* son los mismos que intervienen en la estructura, si bien de signo opuesto. Así, la *erosionabilidad* está inversamente relacionada con la estabilidad al agua de los agregados (cuanto más estables los agregados, menos erosionable el suelo).

En cambio la *erosividad* es la susceptibilidad de la lluvia de provocar erosión, es decir, su fuerza o energía erosiva. Las gotas de lluvia tienen una energía cinética proporcional a su tamaño. Pero como el tamaño de las gotas es difícil de medir, se utiliza su relación con la intensidad de la lluvia según la ecuación de Wischmeier y Smith (1958): $E = 118,9 + 87,3 \log I$, siendo I la intensidad de la lluvia en mm/h, y E la Energía cinética en 10^3 J ha^{-1} . En todo el levante peninsular y para un período de retorno de 10 años, se pueden esperar intensidades máximas en una hora superiores a los 50 mm, e incluso superiores a 100 mm en determinados puntos de la Comunidad Valenciana (Elías Castillo y Ruiz Beltrán, 1979) (Fig 1).

Cuando una gota de lluvia impacta sobre la superficie del suelo proporciona dos fuerzas: una de compactación del suelo y otra de cizalla. Se forma un cráter de impacto de unos pocos milímetros de diámetro. El material en la parte plana más profunda gana estabilidad debido a la compresión, y el material de las paredes de la concavidad se debilita por la fuerza de cizalla. La tensión compresiva vertical de la gota se transforma entonces en tensiones cortantes laterales de flujo radial de agua que sale a chorros del centro del cráter. Estos chorros laterales resultantes tienen una velocidad superior a la de impacto debido a la elevada presión inicial y al menor tamaño de las gotas salientes (Fig 6).

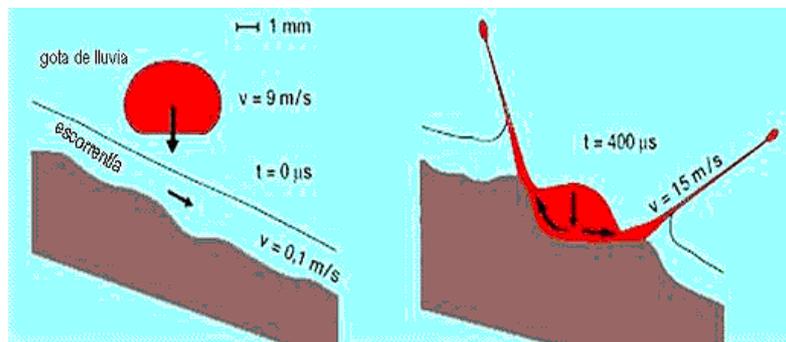


Fig 6.- Impacto de una gota de agua sobre suelo desnudo

El desprendimiento de las partículas de suelo está causado por la fuerza cortante de estos flujos radiales actuando sobre la base y los lados de la cavidad, que son un obstáculo a este flujo. La cantidad de material desprendido de los lados de la cavidad estará determinado por la magnitud de la deformación del suelo que tiene lugar en las primeras etapas del desarrollo de la cavidad y por las fuerzas cohesivas que resisten las tensiones cortantes.

Las gotitas que se generan después del impacto se proyectan hacia fuera desde el punto de impacto a la vez que engloban partículas de suelo y las transportan a distancias de varios centímetros y hasta varios decímetros, en donde se depositan (Fig 7).

Para impactos perpendiculares sobre una superficie horizontal la salpicadura produce un movimiento aleatorio de partículas. A veces se puede generar un transporte neto en una única dirección, en primer lugar por la influencia de la pendiente o del viento, y en segundo lugar por el movimiento preferencial de sólidos desde determinadas áreas.

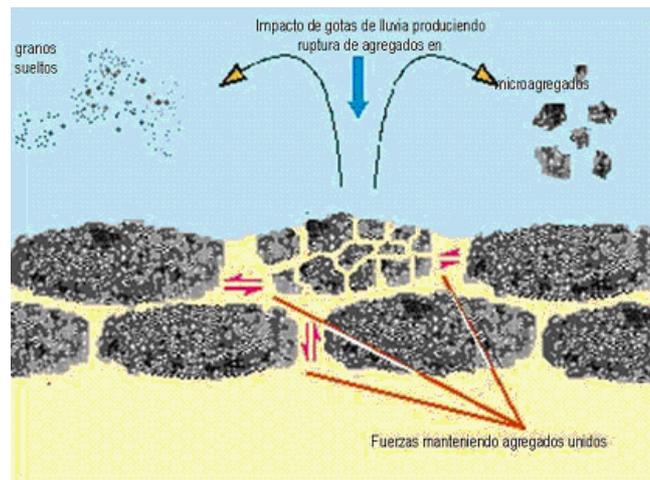


Fig 7.- Ruptura de agregados por impacto de gotas de lluvia, transporte y deposición.

Las principales causas externas de la erosión son la salpicadura, la meteorización, el hielo-deshielo, la escorrentía y la labranza. Como agentes pasivos intervienen la topografía y la cobertura del suelo. Los agentes de transporte son el agua (escorrentía, salpicadura de gotas de lluvia), hielo (glaciares), viento y el hombre (labranza).

6.2.- Tipos de la erosión por el agua.

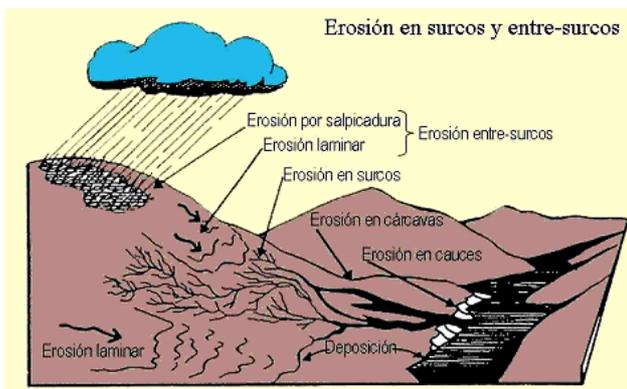


Fig 8.- Principales tipos de erosión por el agua.

Se suele distinguir entre áreas de la ladera dominadas por flujo laminar superficial y salpicadura (áreas entre-regueros) y aquellas donde el flujo se concentra en pequeños regueros (Fig 8). Este concepto es algo arbitrario porque implica una clara delimitación entre procesos dominantes en un área dada, cuando en realidad ocurren solapados. En la áreas "entre regueros" la erosión por salpicadura es el principal mecanismo de desprendimiento de partículas del suelo, ya que el desprendimiento por el flujo laminar superficial es despreciable, mientras que el transporte está dirigido principalmente por el flujo laminar. Por el contrario el desprendimiento de suelo en los regueros se debe principalmente a la escorrentía.

Las formas asociadas a estos tipos de erosión son:

- erosión por salpicadura: pináculos, pedestales, sellados, costras superficiales, pavimentos de piedras.
- erosión en surcos: surcos, regueros, acanaladura
- erosión en cárcavas: cárcavas, barrancos, barranqueras.

Además del impacto de las gotas de lluvia, otra causa importante de la erosión del suelo es la escorrentía, que es el agua de lluvia que no puede infiltrarse y circula libremente por la superficie (*escorrentía difusa*) o bien en regueros, surcos, canales, cárcavas, etc, (*escorrentía concentrada*). En general hay varias motivos por los que el agua no puede infiltrarse, siendo los más importantes los siguientes: a) porque la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo, b) porque el suelo se encuentra saturado de agua, después de haberse infiltrado la lluvia precedente y ya no admite más.

La escorrentía más aparente es la concentrada porque deja regueros, surcos, cárcavas, etc. donde antes no los había, o bien ensancha los canales ya existentes. Sin embargo, la erosión difusa puede ser mucho más importante al cabo de los años pues va arrastrando poco a poco el suelo aguas abajo y muchas veces no se nota hasta que ha desaparecido la mayor parte del horizonte A original, observándose un cambio de color.

6.3.- Importancia del estado de la superficie

La superficie del suelo es una parte fundamental del mismo porque es la interfase que permite la entrada de la lluvia y/o del riego y de los nutrientes, así como el intercambio de gases con la atmósfera y el movimiento de muchos seres vivos. Ni en los suelos naturales ni en los cultivados, el estado de la superficie es estático, sino que varía frecuentemente a consecuencia de fenómenos naturales (lluvia, nieve, viento, fauna) y antrópicos (tipos de cultivo y pasos de maquinaria para labrar, sembrar, cosechar, etc.).

Los elementos que constituyen la superficie y su estado tienen una considerable influencia en muchos procesos y comportamientos del suelo, como la infiltración, la aireación y los regímenes hídricos y térmicos del suelo.

En el apartado 2.2.1 ya hemos visto la importancia del sellado y del acostamiento. Los efectos hidrológicos de los tres tipos principales pueden resumirse en:

- Infiltración: *estructurales* > *coalescencia* > *deposicionales*
- Escorrentía: *deposicionales* > *coalescencia* > *estructurales*
- Pérdida humedad suelo: *coalescencia* > *deposicionales* > *estructurales*

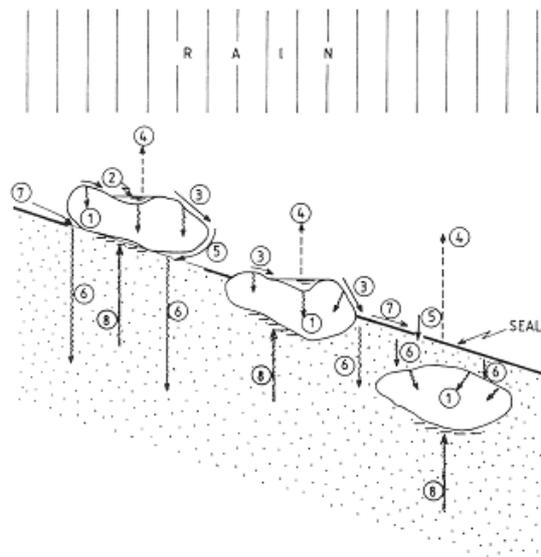


Fig 9.- Esquema para ilustrar los subprocesos hidrológicos que ocurren en un suelo con piedras en distintas posiciones respecto a la superficie del suelo. La piedra de la izquierda está *sobre* la superficie, la del centro está *embutida* en la superficie y la de la derecha, *debajo* de la superficie. 1 = absorción de agua; 2 = interceptación y almacenamiento en tránsito; 3 = flujo sobre la piedra; 4 = evaporación; 5 = infiltración; 6 = percolación; 7 = escorrentía superficial; 8 = ascenso capilar; seal = sellado (según Poesen y Lavee, 1994).

Otro elemento esencial en la superficie del suelo es la presencia de elementos líticos o piedras, de gran influencia en el comportamiento hidrológico del suelo. Según Poesen y Lavee (1994), las piedras pueden encontrarse en tres distintas posiciones respecto al plano teórico de la superficie (Fig 9): a) *sobre* la superficie, b) *dentro* de la superficie (o *embutidas* formando parte de la superficie) y c) *debajo* de la superficie. Según estas posiciones, los efectos de las piedras en la infiltración y la percolación son distintos: en la primera posición favorecen la infiltración y reducen la evaporación; en la segunda posición favorecen la escorrentía, pero reducen la evaporación; y en la tercera reducen la evaporación, pero también y según la textura del suelo y la profundidad a la que se encuentren las piedras pueden favorecer la escorrentía una vez saturado el suelo por encima.

6.4.- La erosión eólica

La erosión eólica puede llegar a ser un problema grave en muchas regiones áridas y en áreas costeras con suelos arenosos. Las partículas sueltas del suelo se pueden mover en suspensión (partículas < 0.05 mm), por saltación (entre 0,05 y 0,5 mm) y por reptación (> 0,5 mm) (Fig 10). Las partículas mayores de 1 mm no suelen moverse y dejan un residuo de arena y/o grava (pavimento desértico) que protege al suelo de más erosión.

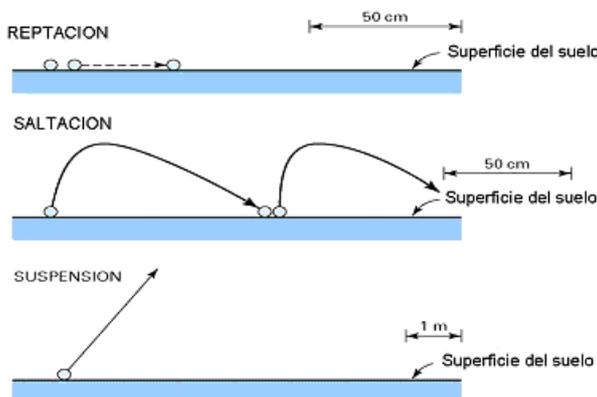


Fig 10.- Mecanismos de transporte de las partículas por el viento

reducción de la visibilidad, etc.) y sedimentación indeseable (tanto las partículas de limo, que llamamos polvo, que lo recubre todo, como la arena, que se acumula en calles, edificios, económicamente costosa de quitar).

La capacidad del viento de arrancar o separar las partículas del suelo es función de la velocidad umbral o de corte expresada por la ecuación de Bagnold, 1941, en López Cadenas, 2003.

$$V_u = A \sqrt{\frac{\sigma - p}{p} g d}$$

V_u = velocidad umbral, A = coeficiente experimental función del tipo de fluido y del tamaño de la partícula, σ = densidad de la partícula, p = densidad del aire, d = diámetro de la partícula, g = aceleración de la gravedad.

La capacidad del viento para transportar partículas está sobre todo relacionada con la velocidad del viento y no parece variar mucho con el tamaño de las partículas. Se pueden mover más las partículas más finas pero el peso total de partículas que puede acarrear el viento es relativamente constante.

Entre los factores que afectan la erosión eólica cabe mencionar:

1) la resistencia del suelo, que incluye:

- la distribución de tamaños de agregados: los superiores a 1 mm son muy poco erosionables.
- la estabilidad mecánica de los agregados, que depende de su contenido en materia orgánica, textura, contenido en carbonato cálcico y cationes intercambiables.

Las consecuencias de la erosión eólica son la pérdida de suelo, cambios en la textura superficial, pérdidas de nutrientes y productividad (una parte de las partículas que se lleva el viento son las coloidales, las de mayor interés para mantener la estructura del suelo y la nutrición para las plantas), abrasión (daños a las hojas de las plantas, especialmente graves en las más jóvenes, a los edificios, a vehículos, maquinaria e instrumental diverso, etc.), contaminación atmosférica (malestar, afecciones respiratorias y cutáneas,

- humedad del suelo: los suelos con contenidos de agua inferiores y cercanos a una tensión de - 15 bar son más susceptibles de erosionarse que aquellos con humedades superiores.
- la presencia de costras superficiales aumenta la velocidad umbral del viento para arrancar partículas.

2) las estructuras de protección:

- surcos en la superficie
- relieve ondulado
- longitud del área expuesta al viento
- cobertura vegetal

6.5- Métodos de evaluación de la erosión

- Métodos de medición directa de la erosión hídrica

- Clavos o agujas de erosión.* Se insertan varios clavos o piquetas en el suelo y se mide el rebajamiento de la superficie a intervalos regulares de tiempo o después de cada lluvia.
- Las marcas superficiales* se basan en el mismo planteamiento de los clavos de erosión, pero en objetos naturales, como árboles, afloramientos rocosos, construcciones.
- Cambios en la *topografía de los regueros y las cárcavas* se miden con facilidad mediante levantamientos topográficos, que proporcionan información de los cambios en las tasas de erosión. Los *perfiladores* consisten en el levantamiento del perfil transversal mediante mediciones regulares. Hoy en día, en vez de los perfiladores de agujas se usan *perfilómetro laser*.
- Parcelas delimitadas.* Consisten en delimitar zonas concretas de la ladera y medir la escorrentía y los sedimentos exportados que permitan calcular las tasas de erosión.
- Artesas gerlach.* Son canaletas de 0.5 m de longitud y 0.1m de anchura, cerradas por los laterales y tapadas con una tapadera móvil. Un conducto de desagüe que va desde la base de la canaleta a un recipiente colector. Se colocan en distintos puntos de la ladera.
- Aforadores en microcuencas o cárcavas elementales.* Miden el caudal y puede acoplarse un sistema para muestrear el agua de escorrentía y conocer la concentración de sedimentos.
- La medición de la *salpicadura* se realiza mediante pequeños recipientes insertados en el suelo, o bien mediante marcas o trazadores (copas de *splash*).
- Para medir el material en suspensión en corrientes de agua se usan los *turbidímetros*.
- Simuladores de lluvia.* Un simulador de lluvia está diseñado para reproducir una tormenta de energía conocida y tamaño y velocidad de las gotas determinado, para que los experimentos puedan repetirse a voluntad.

Los simuladores de lluvia se clasifican de acuerdo con los elementos formadores de las gotas. Pueden ser simples boquillas de aspersion, como las utilizadas en irrigación, o un conjunto de goteros formados por agujas hipodérmicas o tubos capilares.

Los estudios de erosión por salpicadura se hacen en laboratorio llenando contenedores con suelo, pesándolos en seco y sometiéndolos a una lluvia simulada de intensidad preseleccionada y midiendo, de nuevo en seco, el peso perdido por los contenedores.

Cuando el lugar de recepción del agua tiene forma de pequeña parcela, el simulador de lluvia puede complementarse con el aporte de agua de escorrentía desde la parte superior de la parcela. Esta posibilidad es útil para los estudios de la hidráulica del flujo superficial durante la lluvia. Los canales hidrodinámicos consisten en caja abiertas, en general metálicas y/o de plástico transparente de varios metros de longitud y unos pocos decímetros de ancho que se alimentan con agua por su extremo más elevado. La cantidad de agua se controla totalmente y la pendiente es ajustable. Los simuladores de lluvia se pueden situar en cualquier parte del canal.

- Métodos para determinar la erosión eólica:

- Receptores o trampas de polvo a diferentes alturas y orientaciones para recoger las partículas transportadas por el viento,
- Túneles de viento: dispositivos que producen corrientes de aire constante, a determinadas velocidades, en donde observar y medir las consecuencias de una serie de factores tales como tipos de suelo y su cobertura, obstáculos diversos, etc.

- *Métodos de evaluación indirecta: modelos*

Se han desarrollado numerosos modelos para predecir la erosión. Los modelos son siempre una simplificación de la realidad mucho más compleja, pero pretenden encontrar fórmulas para predecir situaciones extremas y poder tomar las oportunas medidas de control o mitigación.

Algunos de estos modelos son simples ecuaciones que calculan el promedio anual de erosión en la desembocadura de una cuenca, otros son modelos complejos que simulan la erosión diaria a muy diferentes escalas, desde una parcela hasta todo un territorio (como el modelo PESERA, mapa de riegos de erosión para toda Europa, con una resolución de 1 km²).

Los modelos para predecir la erosión salen del ámbito de esta presentación, sin embargo uno de los pioneros, conocido como USLE (*Universal Soil Loss Equation*, de Wischmeier y Smith, 1965), ó ecuación universal de pérdida de suelo, por su gran sencillez e interés didáctico en el estudio de la erosión hídrica, merece ser comentado. También un modelo similar, la Ecuación para Predecir la Erosión Eólica merece unas líneas.

El modelo USLE se basa en la ecuación $A = R * K * LS * C * P$, en la que A es el promedio estimado anual de pérdida de suelo (en t/ha), R es la erosividad de la lluvia (en J/ha), K es la erodibilidad del suelo (en t/J), LS es un factor combinado de longitud y pendiente de la ladera (adimensional), C es el factor manejo del cultivo (de 0 a 1, adimensional), y P es el factor “prácticas de conservación de suelo aplicadas” (de 0 a 1, adimensional).

El factor R se calcula a partir de la energía cinética de cada episodio de lluvia superior a 13 mm ($E = 118,9 + 87,3 \log I$) multiplicado I_{30} ó intensidad de la lluvia en 30 minutos.

El factor K se obtenía de las mediciones de erosión en parcelas estandar de 22,1 m de largo con un 9% de pendiente mantenidas en barbecho y con periódicas labranzas paralelas a la dirección de máxima pendiente.

El factor LS se obtiene con la ecuación:

$$LS = \left(\frac{\textit{longitud}_{\textit{parcela}}}{22.1} \right)^m (0,065 + 0,045s + 0,0065s^2)$$

siendo m un valor que oscila entre 0,2 (pendientes inferiores al 1%) y 0,5 (pendientes superiores al 5%, aunque se admiten valores de m más elevados. S es la pendiente en %.

El factor C se obtiene de dividir la tasa de erosión bajo un determinado cultivo y la tasa de erosión en barbecho y labranza longitudinal a la pendiente.

Dado que el factor C no es suficiente para conocer el grado de protección al que está sometido el suelo, el factor P lo tiene en cuenta. Se refiere a los cultivos siguiendo las curvas de nivel, a los cultivos en fajas y a todas las obras de ingeniería que modifican la topografía del terreno para corregir la pendiente y/o disminuir la escorrentía (terrazas y bancales).

La ecuación para predecir la erosión eólica (Woodruff y Sidoway, 1965) es la siguiente:

$$E = f (I', K', C', L', V)$$

en donde E es la pérdida anual de suelo (en t ha⁻¹); I' es el factor de erodibilidad (t ha⁻¹ año⁻¹), en el que intervienen esencialmente las partículas superiores a 0,84 mm; K' es el factor de rugosidad del suelo (formada a partir de la labranza) ; C' es el factor climático, en el que tiene en cuenta la velocidad del viento y la humedad del suelo en la superficie; L' es el factor de longitud del terreno o parcela no protegida con setos cortavientos; y V' es el factor cubierta vegetal.

7.- Métodos de corrección y mitigación de la erosión de suelos (técnicas de conservación)

Los tratamientos de conservación de suelos consisten en un conjunto de técnicas que aplicadas por separado raramente consiguen todo el efecto deseado (López Cadenas, 2003).

Las principales técnicas para controlar la erosión del suelo consisten en:

- 1) proteger la superficie del suelo con algún tipo de cobertura para mitigar o evitar el impacto de las gotas de lluvia y la acción del viento.
- 2) controlar la escorrentía antes de que se convierta en un agente erosivo, reduciendo tanto su cantidad como su velocidad.
- 3) mejorar la estructura del suelo para que resista al máximo a los agentes erosivos.
- 4) controlar el viento antes de que se convierta en agente erosivo

7.1.- Proteger la superficie del suelo con acolchados

Una cobertura del suelo adecuada es el principal factor para controlar la erosión porque reduce el efecto erosivo de las gotas de lluvia sobre el suelo desnudo y la acción del viento de arrancar las partículas del suelo.

La cantidad de cobertura que requiere un suelo depende de la naturaleza de este suelo y de la intensidad de los procesos erosivos en un determinado momento. Un suelo muy suelto en fuerte pendiente requiere de una vegetación permanente muy densa para interceptar tanto las gotas de lluvia como para frenar la velocidad del agua de escorrentía. En cambio determinados suelos en zonas llanas y con una textura y estructura adecuadas pueden ser casi inmunes a la erosión hídrica, incluso sin vegetación. La mayoría de los suelos se encuentran entre estos dos extremos.

Sin embargo, los suelos de parques y jardines, por ser un bien escaso en el contexto urbano, son sumamente valiosos además por el valor añadido que supone el trabajo humano, los enmiendas, fertilizantes, bulbos y semillas que contienen. Por ello deben protegerse de manera permanente cuando no están ocupados por césped o plantaciones de elevada densidad. La mejor protección para un suelo la proporcionan los **acolchados**.

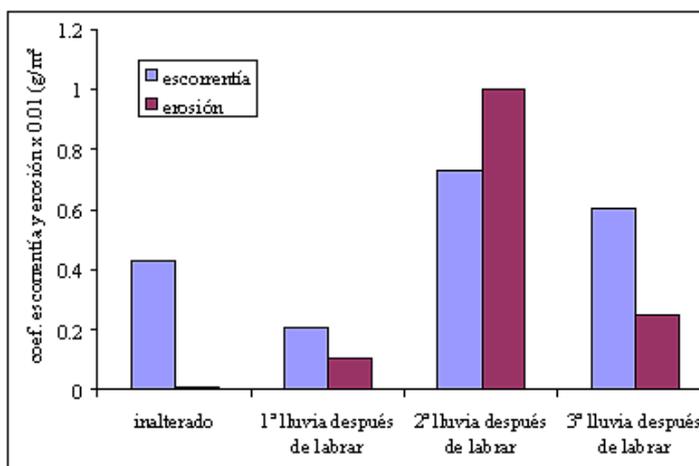
Se define como **acolchado** (*mulch* en inglés) cualquier material que colocado en la superficie del suelo, al mismo tiempo que permite el intercambio de fluidos con la atmósfera, protege al suelo de los agentes erosivos (impacto de las gotas de lluvia y escorrentía superficial), regula la temperatura del suelo y mantiene su humedad. Además evita el crecimiento de malas hierbas por falta de luz.

Hay muchos materiales utilizables como acolchados. La selección dependerá de su coste, disponibilidad, de la estación del año y del tipo de suelo y/o plantación a ser acolchada. Hay materiales inertes como las piedras o gravas (entre uno y varios centímetros de diámetro y de naturaleza diversa: granito, basalto, rocas volcánicas porosas, pizarras, caliza, mármol, etc.) que proporcionan una excelente protección, son duraderos e incluso pueden añadir un valor ornamental. También las conchas, las arcillas expandidas y la lana de roca, pertenecen a esta categoría.

Otros, de origen orgánico, pueden ser de descomposición relativamente rápida, como la paja o restos de poda o de césped, o el compost, y aumentan la cantidad de materia orgánica del suelo, añaden nutrientes y humus proporcionando una mejor agregación y resistencia a la erosión. O bien de descomposición más lenta, como el aserrín, las virutas, los fragmentos de madera, la corteza y las acículas de pino, las mantas orgánicas, o el carbón vegetal (tardan varios años en descomponerse).

Los materiales que vayan a usarse como acolchados no deben mezclarse nunca con el suelo subyacente. Si esto ocurriera, los agregados o terrones del suelo original que han quedado en la superficie se disgregarían con el impacto de las gotas de lluvia y rellenarían los huecos entre los elementos del acolchado, disminuyendo la infiltración, la aireación y desvirtuando una gran parte de las ventajas del acolchado.

En la figura 11 se muestra un ejemplo de un suelo auto-acolchado con pavimento de piedras después de haberse labrado y tras varias lluvias intensas. Durante los primeros minutos de la primera lluvia, el agua se infiltra gracias a la gran rugosidad del arado, pero al cabo de unos minutos, se produce un sellado superficial que da lugar a una gran escorrentía y subsiguiente erosión. Al irse arrastrando todos los elementos finos superficiales, van quedando los elementos gruesos en superficie. Al cabo de varias lluvias y enormes tasas de erosión de hasta 10 kg m⁻² (toda la tierra fina ha sido arrastrada por el agua de escorrentía), queda un pavimento de piedras que protege al suelo de su posterior erosión (Fig 12). Si bien esto último podría considerarse positivo, el problema es que durante la fase erosiva se ha perdido una gran cantidad de materia orgánica y nutrientes que empobrecen al suelo.



Figs 11 (izq) y 12 (dcha): Costra filtrante en suelo auto-acolchado que protege de la erosión (inalterado). Sin la costra filtrante (después de labrar) las tasas de erosión aumentan hasta que disminuyen una vez se reconstituida la costra filtrante de forma natural (lluvia + escorrentía).

7.2.- Controlar la escorrentía.

A pesar de que una buena cobertura dispersa la escorrentía en vez de concentrarla, ésta todavía tiene tendencia a concentrarse al ir pendiente abajo. Este efecto puede mitigarse utilizando medidas estructurales tales como terrazas o la disposición de las plantas en líneas perpendiculares a la pendiente (cultivo a nivel). La mayoría de estas medidas técnica son bien conocidas en agricultura y en restauración de montes, específicamente en Conservación de Suelos y deberán adaptarse a las condiciones particulares de los parques y jardines.

Cultivo a nivel consiste en realizar las labores y otras prácticas de cultivo o plantación en el sentido de la curvas de nivel del terreno con el objeto de eliminar o reducir la escorrentía superficial del agua y el correspondiente arrastre del suelo (López Cadenas, 2003).

Cultivo en fajas es la ordenación de cultivos en el espacio y en el tiempo, de manera que se sucedan alternativamente las fajas de terreno descubierto o con escasa vegetación con otras cubiertas de vegetación densa y resistente a la erosión hídrica o eólica. En los suelos expuestos a la erosión hídrica, las fajas siguen la línea del terreno; en los afectados por la erosión eólica, las fajas se orientan perpendicularmente a la dirección del viento dominante. Las fajas pueden ser de dos tipos: a) fajas a nivel o en contorno: el trazado se adapta exactamente a las curvas de nivel por lo que la anchura de las mismas no es uniforme; b) fajas de anchura uniforme, se trazan a través de la ladera, en forma de bandas de terreno de anchura uniforme con el eje longitudinal sensiblemente perpendicular a la línea de pendiente media del terreno; éstas últimas se utilizan más en zonas susceptibles de erosión eólica.

Las *terrazas* son estructuras de defensa consistentes en un surco o canal y su lomo o caballón correspondiente que actúan como cauces superficiales (desagüe) o bien favorecen la infiltración (absorción). Se trazan sensiblemente paralelas a las curvas de nivel. Acortan la trayectoria del flujo del agua y permiten el control de la escorrentía. Hay una gran variedad de terrazas (Fig 13):

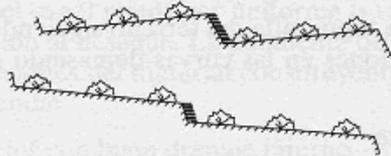
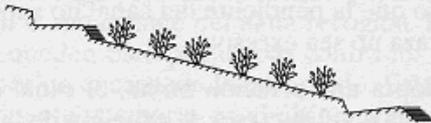
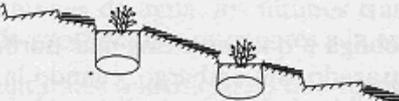
Uso de la tierra y cultivo	Vista de la sección transversal	Tipo
A. Tipo Continuo (para suelos profundos y pendientes de 7° a 25°)		
1. Para arroz o para riego de inundación.		Terrazas de banco a nivel o de irrigación
2. Principalmente para cultivos sin riego o de regadío en la estación seca.		Terraza de banca inclinada a. En contrapendiente b. Con la pendiente hacia fuera.
B. Tipo Discontinuo (para suelos poco profundos a profundos y pendientes de 7° a 30°)		
3. Para cultivos de tierras altas, especialmente para cultivos semipermanentes.		Acequia de ladera
4. Para cultivos forestales o árboles frutales en pendientes pronunciadas.		Terrazas de huerto
5. Para plantas o árboles individuales.		Terracetas individuales
C. Tipo transitorio (para suelos profundos y pendientes de 7° a 25°)		
6. Para agricultura mixta o para cambios futuros en el uso de la tierra.		Terrazas convertibles
7. Para ir completando un sistema de bancales durante un período de tiempo.		Terrazas intermitentes

Fig 13.- Tipos principales de terrazas para pendientes pronunciadas y para parcelas pequeñas y medianas (extraído de Lopez Cadenas, 2003).

Los *bancales* son rellanos que interrumpen la pendiente de un terreno. Existen los bancales de talud y los bancales de pared de piedra seca.

Barreras vegetales, provocan un abancalamiento progresivo

7.3.- mejora de la estructura (fig)

El principal elemento para mejorar la estructura es mantener un buen nivel de materia orgánica. Como en los suelos de las zonas áridas las tasas de mineralización son altas, deberemos reducirlas mediante un acolchado adecuado (apartado 7.1). Paralelamente puede aumentarse el contenido de MO mediante abonos verdes (sabiendo que la incorporación de material vegetal requiere de un aporte adicional de nitrógeno), utilización de compost y un manejo vegetal con inclusión de leguminosas.

En aquellas partes degradadas, habrá que revegetar con las especies más adecuadas que mejor se adapten a las zonas áridas (especies poco consumidoras de agua y resistentes a la salinidad),

Para aumentar la infiltración se puede:

- Disminuir la compactación reduciendo el paso de maquinaria cuando el suelo está húmedo. Reducir al máximo el paso de maquinaria pesada y procurar seguir siempre el mismo camino o las mismas huellas para todas las operaciones. Esto ayuda a mantener conectada la porosidad superficial y favorece la actividad biológica.
- Controlar la formación de costras manteniendo una buena cobertura vegetal o un buen acolchado para reducir el impacto de las gotas de lluvia.
- Aumentar la cantidad de materia orgánica para aumentar la estabilidad de los agregados.

7.4. - cortinas rompevientos (Fig 13), disminuyen considerablemente la velocidad del viento y su efecto erosivo.

8.- Conclusiones

Los parques y jardines públicos no solo son una necesidad para la evasión y el disfrute de los ciudadanos sino también estructuras necesarias para la regulación hidrológica y climática del territorio urbano, la depuración del aire y servir de hábitat para determinada fauna urbana. Sus suelos, como elemento esencial de estos ecosistemas particulares, deben gozar de la mayor salud posible para mantener adecuadamente la vegetación, absorber el máximo el agua de lluvia y no contribuir a la escorrentía general que generan el resto de las áreas urbanas selladas (construidas y asfaltadas).

Por ello un diagnóstico acertado sobre las propiedades de sus suelos es obligatorio para la toma de decisiones respecto a las eventuales medidas correctoras a tomar. Los suelos deberán mantener la máxima capacidad de infiltración, deberán conservar al máximo el agua mediante los oportunos acolchados y los tipos de vegetación más adecuados, compatibles con las disponibilidades hídricas y la calidad de las aguas locales o regionales. Cuando, además, la topografía del terreno indique posibles riesgos de escorrentía y erosión, deberán adoptarse las medidas adecuadas para mitigarla o corregirla.

Referencias

- Ayers, R.S. y Wescott, D.W. 1976. Calidad del agua de riego para la agricultura. FAO. Roma.
- Capel Molina, J.J. 1990. *Climatología de Almería*. Cuadernos Monográficos, 7. Instituto de Estudios Almerienses. Almería. 158 p.
- Cerdà, A. 2001. La erosión del suelo y sus tasas en España. *Ecosistemas*, 10(3):1-16. Depto. Edafología - Universidad de Granada. 2004. *Curso de Edafología on line*. <http://edafologia.ugr.es/introeda/>
- De Hayr, R., Gordon, I. 2004. Irrigation water quality, Salinity and soil structure stability. Fact sheet W55, pp 1-4, NRME, Queensland Government, Australia.
- Elías Castillo, F., Ruiz Beltrán, L., 1979. *Precipitaciones máximas en España. Estimaciones basadas en métodos estadísticos*. Monografías del ICONA, nº 21, ICONA, Ministerio de Agricultura, Madrid.
- FAO-UNEP. 1979. Metodología provisional para determinar la degradación de suelos. FAO. Roma.
- GHCN (Global Historical Climatological Network). 2005. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/ghcn/ghcn.SELECT.html>
- García, I., Dorransoro, C. 2004. *Curso de contaminación de suelos*, on line. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema12/recup.htm>
- López Cadenas, F. (coord.) 2003. *La ingeniería en los procesos de desertificación*. TRAGSA-Mundi-Prensa. Madrid. 1045 p.
- Martínez Beltrán, J. 1999. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. *Agricultural Water Management*, 40: 183-194.
- Pizarro, F. 1985. *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*. 2ª Ed. Editorial Agrícola Española, SA, Madrid. 542 p.
- Poesen, J, y Lavee, H. 1994. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 23: 1-28.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª Ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 929 p.
- Rhoades, J.D., Candíah, A., Mashali, A.M. 1992. The use of saline waters for crop production. FAO irrigation and drainage paper nº 48, Roma, 133 p.
- Solé-Benet, A. (en prensa) Soil erosion in Spain. In J.Boardman & J.Poesen (eds) *Soil erosion in Europe*, capítulo 26. John Wiley & sons, Reino Unido (en prensa).

UNESCO. 1979. *Map of the world distribution of arid regions*. MAB Technical Notes n° 7. UNESCO, Paris. 54 p + mapa.

Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation. ARS USDA Agricultura Handbook, n° 282. Washington, DC, USA.