

matices3

Erosión y desertificación

Heridas de la Tierra

Francisco López Bermúdez

nivola
L I B R O S
E D I C I O N E S

Erosión y desertificación

Heridas de la Tierra

Francisco López Bermúdez

*m*atices3

nivola
L I B R O S
E D I C I O N E S

Índice

9	Prólogo
11	Introducción
13	La erosión, un fenómeno complejo
23	La erosión eólica
41	El ciclo del agua, ciclo hidrológico o ciclo hidrogeomorfológico
45	La erosión del suelo por agua: un problema endémico
77	Señales o síntomas de la erosión sobre el terreno
83	Métodos de medida y evaluación de la erosión hídrica
105	La erosión del suelo en España
115	Los sistemas de información geográfica (SIG) como instrumentos de integración de factores de erosión y elaboración de cartografías
117	Conclusión: la erosión, la peor amenaza para el suelo y el factor más destacado de la desertificación
121	La desertificación, un problema ambiental y social global
123	Desertificación, un concepto controvertido
129	La magnitud del problema
153	Implicaciones ambientales más relevantes de la desertificación

157	El Convenio de Naciones Unidas de lucha contra la desertificación
169	Conclusiones
173	Glosario adicional
183	Bibliografía
189	Direcciones de internet

Clave de los símbolos utilizados:

- ▶ Palabra cuyo significado se explica en el glosario al margen
- Palabra cuyo significado se explica en el glosario adicional al final del libro
- ◆ Información adicional sobre el tema
- ❖ Tabla

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

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

Antonio Machado. "Por tierras de España"



*Volví a mi tierra verde
y ya no estaba,
ya no estaba
la tierra,
se había ido,
con el agua hacia el mar
se había marchado.
Espesa
madre
mía,
trémulos, vastos bosques,
provincias montañosas,
tierra y fragancia y humus.*

Pablo Neruda

Prólogo

Decían los filósofos y sabios griegos, cuatro siglos antes de Cristo, que el aire, el agua y la ● **tierra** son las "raíces de todas las cosas", constituyen las bases esenciales sobre las que reposan la doble vida animal y vegetal. Son los componentes fundamentales de la naturaleza, del medio que nos rodea, de la existencia de los seres vivos en este dinámico y complejo sistema que es la Tierra. Son los ► **recursos** más importantes del patrimonio natural de todos los pueblos. Constituyen la base y el límite del desarrollo económico; por ello, la conservación ambiental y el desarrollo económico deben tener un interés común: su protección y buena gestión.

El ● **suelo** cumple vitales funciones como soporte de la naturaleza y sus ● **ecosistemas**. Es archivo de la propia naturaleza y de la historia, soporta a los seres humanos y la mayoría de sus actividades y repercute directamente en importantes aspectos como la vegetación, la alimentación, la calidad de las aguas y la salud. De entre todos los recursos, el suelo es el más sobresaliente y el medio primario de producción de alimentos. A escala humana es un recurso no renovable; por ello, científicos, ambientalistas, organizaciones internacionales y administraciones públicas de todo el mundo se preguntan, con frecuencia, si el suelo podrá alimentar, en el futuro, a una población mundial creciente. Se estima que, con la actual tecnología, el mínimo de tierra arable *per capita* necesaria para mantener un aceptable *standard* de vida es de 0,5 hectáreas (ha). Sin embargo, el suelo disponible va disminuyendo gradualmente por debajo del mínimo requerido debido a procesos de ● **degradación** y a su conversión en usos

no agrícolas. Asumiendo que los mecanismos de deterioro de la tierra arable fuesen ralentizados y detenidos, la superficie de suelo agrícola *per capita* irá declinando progresivamente. Fue de 0,25 ha en 1995 y se estima que, en la actualidad, puede estar alrededor de 0,23. Hacia el año 2055 podrá ser de unas 0,15 ha, y de unas 0,14 en el año 2110 (Lal *et al.*, 1998).

El problema, contemplado a escala global, se acentúa en determinadas regiones del planeta debido a la desigual distribución de recursos y población. De ahí que urja limitar la degradación del recurso suelo, conociendo las causas del deterioro, restaurando aquellos suelos deteriorados pero todavía con capacidad biológica productiva, utilizando nuevas tecnologías que no impacten negativamente y mantengan la producción, deteniendo el uso no agrícola en suelos de buena calidad agronómica, aplicando la prevención en el mantenimiento de la cantidad y la calidad del suelo, etc.

La erosión del suelo es la forma más importante de degradación y el principal factor desencadenante de la crisis ambiental conocida como desertificación. Se estima que una sexta parte de los suelos de todo el mundo han sido degradados por la erosión del agua y del viento. Esta situación da lugar a dos importantes consecuencias; por un lado, la reducida

► Glosario

Recurso natural. Aquella parte de la naturaleza o del medio ambiente que es capaz de satisfacer necesidades humanas.

***Desarrollo sostenible.** Es aquel que puede asegurar que se satisfagan las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias. No es un estado de armonía fijo, sino un proceso de cambio por el que la explotación de los recursos, la dirección de las inversiones, la orientación de los progresos tecnológicos y la modificación de las instituciones concuerdan con las necesidades tanto presente como futuras.*

capacidad de la población para producir alimentos suficientes debido a la pérdida de suelo en cantidad y calidad; por otro, los efectos de la contaminación de aguas y sedimentaciones en muchas zonas debido a la erosión.

Los problemas de la erosión del suelo y desertificación no se limitan al mundo subdesarrollado. En las últimas décadas se ha producido un incremento en la apreciación de que la amenaza para los suelos de Europa, Norteamérica, Australia..., se debe a la introducción de mecanismos intensivos de cultivo, a la frecuencia y magnitud de los incendios forestales, a la sobreutilización de los pastos y al cambio climático. Esta amenaza es más clara en tierras bajo condiciones climáticas áridas, semiáridas y subhúmedas secas.

El cambio global, que incluye el cambio climático, los cambios en la composición de la atmósfera y el cambio en el uso del terreno en el tiempo, puede originar nuevas amenazas que incrementen los problemas de la erosión y la desertificación. El cambio en el uso del terreno es de particular importancia, ya que es causa directa de erosión. Alguno de los principales cultivos mundiales, tales como el maíz y la soja, tienen un alto nivel de ● **riesgo**. El cambio climático es también una amenaza importante para los suelos desprovistos de vegetación o con especies pobres que son muy vulnerables a los previsible incrementos de la actividad tormentosa atmosférica, las lluvias de alta energía, la velocidad del viento, etc. Debido a que estos cambios se prevén como un problema serio en el futuro, parece aconsejable establecer adecuadas herra-

mientas predictivas para poder anticipar su distribución espacial e intensidad.

La solución de esta crisis ambiental, social y económica que representan la erosión y la desertificación (ésta afecta a más de un tercio de las tierras emergidas del planeta) requiere investigación, conocer e identificar, en detalle, los factores y procesos genéticos que desencadenan los procesos de degradación del suelo y los ecosistemas que soporta. En muchos países existen centros de experimentación en campo y laboratorios, bien instrumentalizados, sobre mecanismos de erosión y desertificación, en los que se desarrollan y aplican tecnologías de conservación de suelos y ● **modelos** predictivos en relación con el cambio global.

Además, la solución a estos problemas exige una reconsideración radical del conflicto sociedad-naturaleza de principios de siglo y milenio. La humanidad se encuentra en un momento decisivo de su historia. Se enfrenta con la permanencia de las disparidades entre países, y dentro de muchos de ellos, con el agravamiento de la pobreza y el continuo empeoramiento de los ecosistemas de los que depende el bienestar y el ► **desarrollo sostenible**. La valorización y correcto uso y gestión de los recursos naturales constituye la mejor medida para su explotación durable y conservación, evitando su degradación. Gestionar sosteniblemente naturaleza y ● **medio ambiente** es luchar contra la erosión del suelo y los mecanismos que conducen a la desertificación, es conseguir una mejor protección y un uso de los ecosistemas, es gestionar bien el presente y el futuro de la humanidad para lograr un futuro más próspero. Con esta idea y con la intención de dar a conocer, de modo sintético, los procesos de la erosión del suelo y de desertificación y las posibles soluciones para mitigar estos graves problemas ambientales y sociales, se ha redactado este libro: con la esperanza de que pueda contribuir, en los lectores, a la armonía entre ellos y la naturaleza herida.

Introducción

Entre los grandes problemas ambientales que atañen a casi la mitad de las tierras emergidas del planeta, porque reducen los recursos naturales, se hallan la *erosión* y la *desertificación*. La erosión del suelo y la desertificación son problemas que en los últimos años han alcanzado una amplia consideración mediática y el reconocimiento de problemas ambientales globales por diversos foros y organismos internacionales, así como por la comunidad científica, puesto que afectan a la fertilidad de la tierra, al disminuir su potencial para producir alimentos, fibras y recursos renovables necesarios para el aumento de la población. Erosión y desertificación inducen a ecosistemas cada vez más pobres y frágiles y, además, impiden la conservación de la base de recursos naturales imprescindibles para el *desarrollo sostenible*. El suelo, recurso natural vital, viene a ser la *placenta* para la nutrición de plantas y microorganismos, de los que dependen animales y humanos. Su degradación constituye el principal proceso de la desertificación del territorio.

Suelo, agua y vegetación constituyen la base y el límite del desarrollo económico; por ello, la conservación ambiental y el desarrollo económico deben tener un interés común: su protección y buena gestión. Por otro lado, los sedimentos producidos por la erosión que entran en los sistemas hídricos son también causa de importantes problemas de degradación. En particular, la calidad del agua se reduce a causa de la turbidez y de sustancias químicas como el nitrógeno, el fósforo y las materias orgánicas que son arrastra-

das o disueltas por el agua. Los sedimentos transportados también ocasionan el *aterramiento* de los embalses, con la consiguiente pérdida de capacidad. La erosión, pues, produce daños, no sólo en el lugares donde se registra la pérdida de suelo (● *áreas fuente*), sino que también ocasiona notables impactos aguas abajo. Los daños producidos por la erosión del suelo son, pues, múltiples: disminución de la productividad de la tierra, degradación o pérdida de hábitat, reducción de la diversidad de especies, pérdida de ● *resiliencia* de las plantas, etc.

La erosión es un proceso global, complejo y endémico en la mayor parte de las tierras emergidas, en particular en las tropicales y las mediterráneas, acelerado en diversas etapas históricas por la intervención humana (desde el Neolítico hasta la actualidad) y durante crisis climáticas, como ● *sequías* prolongadas y lluvias de alta energía. La erosión causada por el agua y el viento amenaza la capacidad de la Tierra para producir alimentos, fibras y recursos renovables para una población mundial en continuo crecimiento. Adicionalmente, los sedimentos producidos constituyen destacados elementos de contaminación del aire y del agua y pueden causar importantes impactos ambientales lejos de los lugares donde se han originado.

Precipitaciones intensas sobre suelos mal protegidos por la vegetación, determinadas prácticas agrícolas, deforestación y *sobrepastoreo* han promovido la mayor parte de la erosión del suelo. Estas actividades continúan toda-

vía en muchas regiones; recientemente, el proceso urbanizador y las infraestructuras que lo acompañan se han convertido en un importante factor de erosión del suelo.

Desde los años setenta del pasado siglo, la erosión es reconocida como un síntoma de un problema más amplio relacionado con la perturbación de la cubierta vegetal y el inadecuado manejo del territorio. El resultado es una pérdida progresiva, con frecuencia muy rápida, de la capacidad productiva de los sistemas naturales y agrícolas mal gestionados. A la erosión, en definitiva, se la reconoce como uno de los más destacados fenómenos (quizás el más relevante) de la *desertificación*.

► Glosario

Degradación de las tierras. Se entiende como la reducción o la pérdida de la productividad biológica o económica y la complejidad de las tierras agrícolas de secano, las tierras de cultivo de regadío o las dehesas, los pastizales, los bosques y las tierras arboladas, ocasionada, en ● **zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas**, por los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y pautas de poblamiento, tales como: (a) la erosión del suelo; (b) el deterioro de las propiedades físicas, químicas, biológicas y económicas del suelo; (c) la pérdida duradera de vegetación natural.

La desertificación es, a la vez, una crisis climática y socioeconómica que desencadena nuevos mecanismos de degradación ambiental que dificulta e incluso impide la conservación de los recursos naturales básicos: suelo, agua y vegetación. Un complejo e irreversible síndrome que afecta a los ecosistemas y a las poblaciones. Bajo los efec-

tos de esta patología en expansión por las tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas del planeta, la pérdida de suelo por el agua es un relevante proceso, indicador del estado de los ecosistemas. Las huellas se hallan presentes en extensas áreas. Puede resultar paradójico que el agua, recurso escaso en las regiones más o menos secas, sea el agente natural más relevante del modelado de los paisajes y el desmantelamiento del suelo.

La degradación del suelo a consecuencia de la erosión ha sido reconocida como el principal proceso inducido por la actividad humana responsable de la ► **degradación de las tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas**. El *Atlas del mundo de desertificación* (UNEP/PNUMA, 1992) indicaba, a partir de ● **datos** suministrados por el GLASOD (Global Assessment of Soil Degradation Database; Base de datos para la valoración global de la degradación del suelo), que la degradación de las tierras áridas se debe en un 48 % a procesos de erosión hídrica, la erosión eólica es responsable del 39 %, y a las degradaciones química y física se les atribuye un 10 % y 3 % respectivamente.

La percepción y evaluación de los procesos y formas de erosión y de desertificación, manifestadas en un descenso de la fertilidad natural y la productividad biológica del suelo, resulta fundamental para el establecimiento de programas de gestión del territorio, de conservación de los recursos soporte de la vida y para el desarrollo sostenible.

1

La erosión, un fenómeno complejo

La **erosión** es un proceso natural continuo dependiente de factores climáticos, tectónicos, topográficos, **litológicos** y biogeográficos que contribuyen a modelar la superficie de la Tierra y a originar suelos, por la intervención de diversos agentes: la gravedad, el agua, el viento y la sensibilidad o **erosionabilidad** de los materiales litológicos (Fig. 1). La erosión se expresa en términos de balances representados en una amplia gama de formas mayores, modelados a escala más reducida y en depósitos de sedimentos que traducen una historia compleja de duración muy variable que va desde los tiempos geológicos a períodos muy cortos. Los suelos son creados por la erosión del **material parental** y los correlativos mecanismos de transporte y deposición en el lugar, próximo o lejos de las áreas fuente de producción de sedimentos. A este tipo de erosión que actúa ininterrum-

► Glosario

Erosión: El término erosión procede de la palabra latina *erosio-onis* derivada del verbo latino *erodere*, que significa roer, desgastar, mermar (*vis ignium colles erosit*, la fuerza del fuego erosionó los cerros; Séneca, Epístolas 91, 11), y se identifica con el fenómeno de ataque a los volúmenes de la epidermis de la Tierra. Es un proceso de denudación de la corteza terrestre. El fenómeno actúa en la **interface** entre la atmósfera, la litosfera y la biosfera, rebajando o desgastando los materiales que aparecen en la superficie de las tierras emergidas.

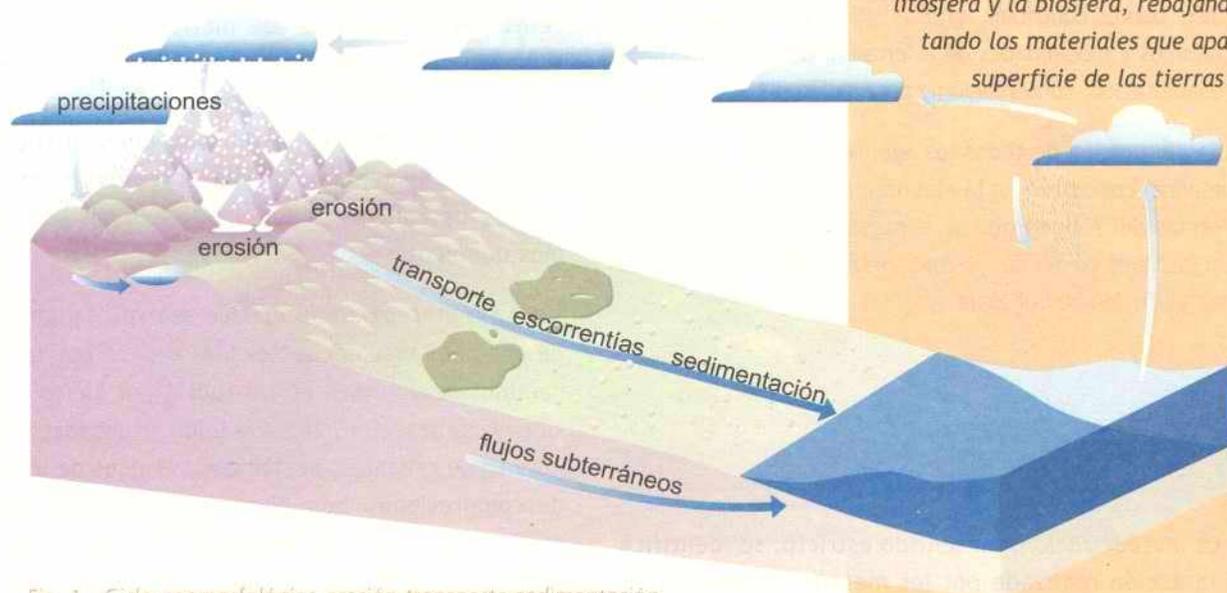


Fig. 1.- Ciclo geomorfológico erosión-transporte-sedimentación. Los procesos de denudación y deposición correlativa, son responsables destacados en la creación de los paisajes de la superficie terrestre.

pidamente desde el alba de los tiempos con la emersión de las tierras se la conoce como *erosión natural*.

Pero la erosión es también un hecho humano cuya importancia se manifiesta con la presión de los grupos sociales sobre los ambientes geográficos y con el desarrollo de las tecnologías. El gatillo que dispara la erosión, especialmente en los ambientes áridos, semiáridos y tropicales, es la pérdida de la cubierta vegetal protectora. La pérdida de vegetación expone a los suelos a la acción erosiva del viento y del agua, a la vez que la pérdida de suelo disminuye el potencial productivo de la vegetación natural y cultivada. Ciertas prácticas agrícolas, la deforestación, el pastoreo excesivo, la urbanización, la gestión de los cursos de agua, pueden agravar la erosión hídrica y los movimientos en masa y afectar a dominios geográficos muy variados, como las ● *laderas*, los valles y los litorales. Con frecuencia, la sociedad aparece como un amplificador de los fenómenos erosivos (se habla entonces de *erosión acelerada*) y de las modificaciones climáticas, pero ella también puede contribuir, gracias al conocimiento de los mecanismos y modalidades de la erosión, a ejercer medidas de rehabilitación, conservación y prevención del suelo.

La conjunción de todos los agentes (físicos, biológicos y humanos) concurren en la elaboración de la amplia gama de formas del relieve que se expresan en los ► *paisajes*, según los tipos de acción: ● *meteorización*, erosión por el viento y erosión por el agua.

Procesos de meteorización

La *meteorización*, en sentido estricto, se identifica con la acción realizada por los meteoros o fenómenos atmosféricos sobre los materiales de la superficie de la

corteza terrestre. Es un proceso de desintegración física y química de los materiales sólidos en la superficie de la Tierra o cerca de ella, bajo la acción de los agentes atmosféricos. Sin embargo, el contacto o proximidad de los materiales de la litosfera con la hidrosfera y la biosfera también ocasiona transformaciones que se incluyen en el concepto de *meteorización* o ablación de los materiales puestos en el lugar por las fuerzas internas que afectan al planeta (orogénesis). Globalmente, es un proceso que disminuye la resistencia de las rocas, altera sus fuerzas de cohesión, las debilita, incrementa su ● *permeabilidad* a la humedad y abre el camino a la erosión.

La respuesta o adaptación de las litologías a la meteorización se expresa en un conjunto de transformaciones físicas, químicas y biológicas que originan unos productos conocidos como formaciones superficiales alteríticas o ● *alteritas*, cuya potencia varía entre centímetros y decenas de metros. En realidad, estos tipos se combinan, lo que hace difícil definir cuál de ellos actuó en determinado proceso de alteración. En la actualidad, se tiende a establecer una inicial distinción entre las fragmentaciones por procesos físicos o mecánicos y descomposiciones o alteraciones por mecanismos químicos.

La ● *meteorización física* se expresa por una serie de acciones mecánicas llevadas a cabo por tensiones y cambios de volumen en las rocas, por ciclos de expansión y contracción, humectación y desecación, crecimiento de cristales, acción de las raíces de los árboles, descompresiones por disminución de carga, etc. El resultado es que rocas y suelos se fragmentan y desagregan en partículas, granos, gránulos y bloques (Fig. 2). Los procesos de meteorización física adoptan deno-

minaciones específicas en función de los agentes desencadenantes: variaciones de temperatura que son capaces de provocar una alternancia de fenómenos de dilatación y retracción que, al afectar de modo desigual a la masa rocosa debido a su limitada conductividad térmica, se traduce en tensiones mecánicas entre las partes externas, que registran variaciones de volumen, y las internas, que se mantienen volumétricamente estables. Este diferente comportamiento de las partes externas e internas de las rocas se manifiesta en una desagregación granular, en una descamación, en un cuarteamiento o en una fragmentación. A este fenómeno se le conoce como ● **termoclastia**.

Paisaje. El término, en su sentido más amplio, es lo que nos rodea. Es el medio visualmente percibido, un complejo de interrelaciones de todos los elementos o componentes de la superficie terrestre. El medio se hace paisaje cuando alguien lo percibe. Es un indicador de la salud ambiental y del tipo de desarrollo de un territorio. Un indicador del estado de los ecosistemas y sus componentes, un indicador o clave ambiental.



Fig.2.- La meteorización mecánica de los relieves expuestos (bloques, tafonis...) suministra gran cantidad de derrubios que se acumulan al pie de las áreas-fuente formando canchales o pedrizas. Las áreas más o menos estabilizadas son colonizadas por la vegetación (Los Mirabetes, Sierra de Guillimona, Cordilleras Béticas).

En ocasiones, la ruptura de las rocas se produce como consecuencia de la congelación del agua confinada en sus espacios vacíos. Al pasar del estado líquido al sólido, el agua registra un aumento de volumen del orden del 10%, de tal modo que la congelación producida por el descenso de la temperatura por debajo de los 0°C somete a las paredes de los poros, las ● *diaclasas* y a otras fracturas de las rocas, a unas presiones que pueden llegar a los 15 gr/cm². Sus efectos mecánicos son capaces de separar fragmentos de la roca y producir la disyunción de sus elementos o partículas; es el proceso conocido como *crioclastia* o *gelifración*.

Cuando el proceso de la fragmentación o clastia es causado por la acción directa del agua, a consecuencia de importantes variaciones en el contenido de humedad, recibe el nombre de ● *hidroclastia*. Algunos minerales que constituyen las rocas, especialmente las arcillas, son muy higrófilos, pudiendo hincharse, incrementando significativamente su volumen. Al desecarse por evaporación, tienden a recuperar su volumen inicial mediante una dinámica de retracción. De este mecanismo se derivan tensiones capaces de generar importantes rupturas (Fig.3).

Finalmente, la fragmentación de las rocas debida a los esfuerzos mecánicos producidos por la cristalización de las sales en los poros y fisuras de las rocas es conocida como ● *haloclastia*. Los cristales proceden de la evaporación del agua salada que ha penetrado por las discontinuidades. Por tanto, se trata de un proceso que sólo actúa allá donde la salinidad es importante, como son las regiones áridas y, sobre todo, las franjas litorales.

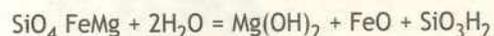
Las transformaciones ocasionadas por la meteorización física originan cambios texturales en los materiales,

alterando su compacidad y haciéndolos más vulnerables, deleznable y desagregables. Estas alteraciones favorecen la penetración del agua y las sustancias agresivas necesarias para la ● *meteorización química*.

Las acciones de la *meteorización química* operan mediante el ataque de los activos constituyentes químicos del suelo, de la atmósfera y de la biosfera, especialmente por la acción disolvente del agua. Este tipo de meteorización, que ocasiona la descomposición de los minerales, es favorecida por las temperaturas elevadas y la abundancia de humedad.

Reacciones o procesos básicos implicados son:

a) *Hidrólisis*: reacción de cambio ● *catiónico* (reemplazamiento de cationes por iones H⁺), que origina la progresiva destrucción de los minerales, sobre todo silicatos, abundantes en las rocas cristalinas. Una reacción muy frecuente es



es decir,

mineral silicatado + agua = óxido o hidróxido + ácido silícico

Es el proceso más común de descomposición en las rocas cristalinas; así, los feldspatos hidrolizados dan origen a arcillas de neoformación muy abundantes (caolinita, montmorillonita, illita). Otras respuestas son arenizaciones, mantos meteorizados y diversos tipos de costras o corazas lateríticas y bauxíticas;

b) *Hidratación*: puede ser tanto física como química. Resulta de la capacidad de algunos minerales para absorber e incorporar agua con el consiguiente cambio de volumen de la roca. La frecuencia de los ciclos de hidratación-

deseccación provoca la expansión-contracción de los materiales, haciéndolos más vulnerables a otras alteraciones (Fig. 3). Es un proceso importante en la generación de nuevos minerales que suele acompañar a otras reacciones, como la hidrólisis y disolución. Este fenómeno tiene especial importancia en geotecnia allí donde hay suelos con arcillas expansivas que plantean importantes problemas de construcción de edificios y vías de comunicación;

ionizar el agua, el CO_2 produce la corrosión de las rocas carbonatadas mediante la reacción



Esta reacción química transforma la caliza (insoluble) en bicarbonato cálcico, que es soluble y, por ello, fácilmente evacuado por las aguas corrientes. La abundancia de materiales carbonatados en el mundo confiere a este proceso una gran importancia en el modelado del paisaje. En España, debido a la gran extensión que ocupan los afloramientos de rocas carbonatadas, la carstificación ha modelado una amplia serie de paisajes de gran valor ambiental, científico y estético: Torcal de Antequera (Málaga), Zafarraya y sierras Gorda y Guillimona (Granada), sierra de Cazorla (Jaén), Calar del Mundo (Albacete), serranía de Cuenca, el Garraf (Cataluña), karst de Larra o de la Piedra de San Martín (Pirineos), montaña cantábrica (Santander), serra de Tramuntana (Mallorca), etc.



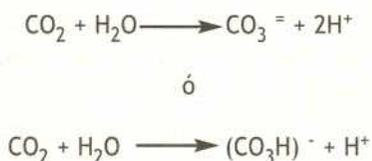
Fig. 3.- Los procesos de humectación-deseccación en materiales arcillo-limosos dan origen a figuras geométricas poligonales.



Fig. 4.- Paisaje cárstico (Torcal de Antequera, Málaga).

c) **Disolución**: proceso que ocasiona el desmoronamiento de la red cristalina de los minerales que forman la roca por la acidez o alcalinidad del agua y por la difusión de moléculas o átomos de un cuerpo en las de otro. En general, implica una disociación iónica, lo más común de sólidos en líquidos. Este proceso afecta a todos los materiales en mayor o menor grado, siendo notoriamente significativa en evaporitas (yeso, halita, carnalita, silvina) y sulfatos y carbonatos de calcio y magnesio. Es el principal fenómeno para la ● **carstificación** (Fig. 4), ya que, al

d) **Carbonatación:** proceso de alteración química que transforma materiales que contienen Ca, Mg, K y Na en carbonatos o bicarbonatos debido a la acción del CO₂ contenido en el agua. Un proceso muy frecuente, es la disolución del dióxido de carbono en agua formando ácido carbónico que la ioniza:



Este fenómeno tiene importancia en la disolución de rocas carbonatadas e hidrólisis de las silicatadas, al ionizar el agua y hacerla más agresiva.

e) **Oxidación-reducción:** es un fenómeno de ganancia o pérdida de electrones de un elemento que hace a los minerales más o menos vulnerables a otras reacciones. Interviene en todos los procesos de meteorización, originando pátinas y algunas concentraciones. Ciertos minerales, como los anfíboles, biotita, olivinos y ● **piroxenos** son sensibles a la oxidación; sus efectos pueden observarse por la presencia de colores ocre y rojizos en los terrenos. La reducción, proceso opuesto a la oxidación, normalmente ocurre en condiciones anaerobias, en ausencia de oxígeno libre;

f) ● **Meteorización biológica:** se debe a la acción del mundo vegetal, en concreto a la acción de las raíces que penetran en los materiales en forma de cuña y van fragmentando la roca y disgregando el suelo.

Ligado a las condiciones bioclimáticas de algunas regiones de la Tierra (pasadas y actuales), los productos liberados por la meteorización (silicatos, alúmina, bicarbonatos, óxidos de hierro, etc.) pueden acumularse y con-

centrarse originando capas compactas y duras conocidas como *costras* o *caparzones*, más o menos resistentes a la erosión. Por otro lado, la meteorización es responsable de la formación de una amplia gama de formas menores que se originan en la superficie de los afloramientos rocosos expuestos a la intemperie, tales como acanaladuras, desconches, oquedades, ● **tafonis**, cresterías, canchales, pedrizas, lancharas, etc.

Por último, la meteorización debe considerarse como un conjunto de acciones articuladas en el tiempo y en el espacio; la acción conjunta de todos estos procesos (físicos y químicos) genera importantes cambios en la composición y configuración de los materiales de la superficie de la corteza terrestre y es una acción sobresaliente en el modelado de los paisajes terrestres.

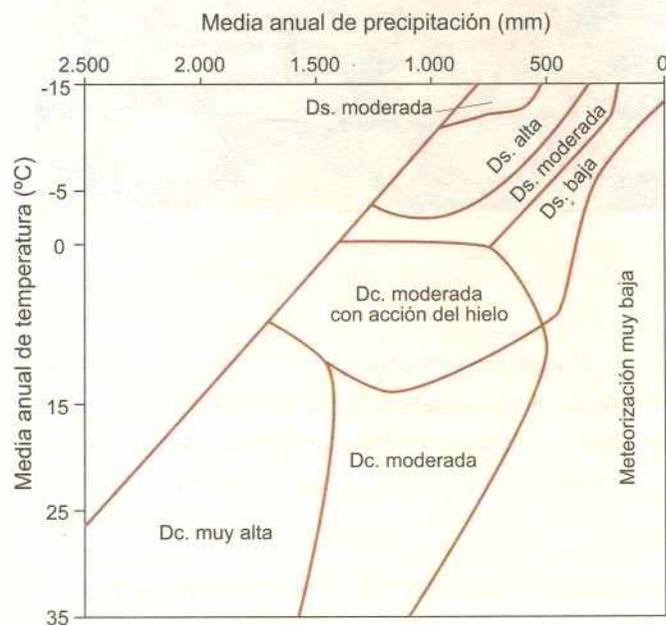


Fig. 5.- El diagrama muestra la relación entre clima y meteorización a escala global en función de la precipitación y temperatura medias.

Clima y perfiles de meteorización

Las condiciones climáticas y el tipo de materiales son los factores que determinan y controlan la meteorización. Parece evidente que la mayor parte de los procesos de meteorización y de las formas de modelado resultantes tienen una distribución dependiente de los climas pretéritos y actuales. El clima influye, básicamente, mediante precipitaciones y temperaturas. La cantidad y el tipo de

estas **variables** condiciona que se active un tipo definido de meteorización y origine geoformas específicas. Esta influencia del ambiente climático se detecta a todas las escalas.

A escala mundial (macroescala), aparecen ciertas relaciones zonales que afectan a todos los tipos de meteorización (Fig. 5), si bien no es posible diferenciación alguna de los procesos. Sin embargo, es la meteorización química en rocas sili-

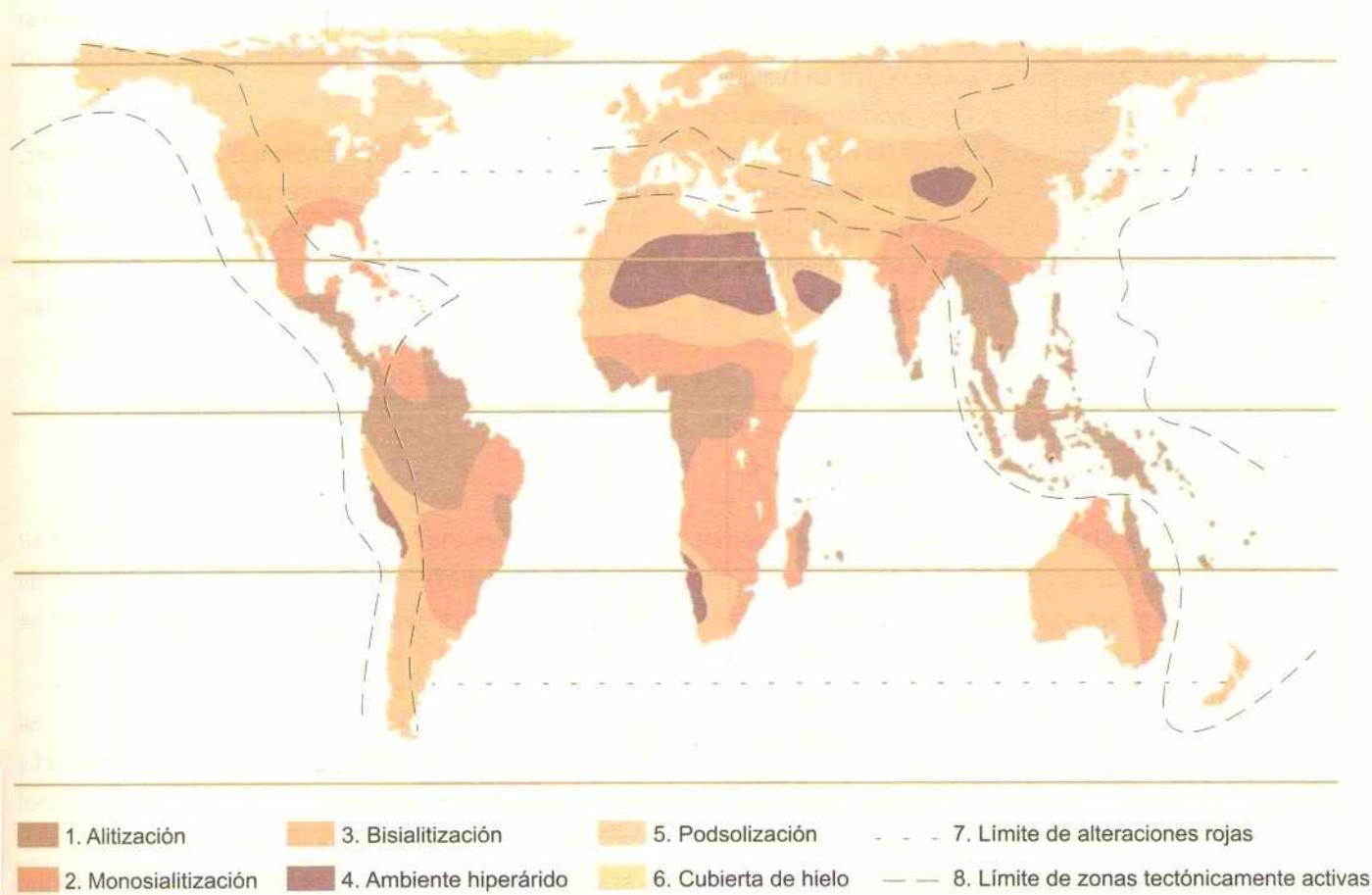


Fig.6.- Principales zonas de meteorización química en el mundo para materiales silicatados (según Pedraza, 1996 y otros autores).

catadas la que suele ser utilizada como referencia (Fig.6). A escalas intermedias (mesoescala), ya es posible detectar y estimar productos de la meteorización más detallados que permiten diferenciar ámbitos de desagregación o descomposición de los materiales y obtener índices específicos, tales como los de helada, ● **lixiviación**, expansión-retracción, acidificación, etc. Finalmente, a escala de detalle (microescala), los procesos y las geformas suelen estar bien diferenciados, se pueden detectar posibles desviaciones respecto a la tendencia general y obtener índices.

No obstante, debe reconocerse que virtualmente cualquier proceso de la meteorización puede ocurrir en cualquier ámbito climático, si bien hay regiones morfogenéticas con procesos dominantes específicos (Fig. 7). Un modo de apreciar la influencia del clima en la meteorización es considerar las relaciones entre las condiciones climáticas, los mantos de alteración y la potencia de los suelos, mediante un ● **perfil de meteorización** meridiano desde el Polo Norte

hasta el Ecuador (Fig. 8). El diagrama sintetiza la estrecha interrelación existente entre la meteorización química (fundamentalmente por hidrólisis) de las rocas silicatadas y las variaciones de las precipitaciones, la temperatura, la evaporación y el suministro de materia vegetal al suelo. Bajo climas tropicales húmedos, la intensa meteorización química origina suelos con espesores de hasta un centenar de metros. Los feldspatos de las rocas cristalinas son completamente alterados, arenizados y transformados en arcillas, y todos los materiales solubles, disueltos en agua. Las elevadas temperaturas y altas tasas de humedad de estos ambientes aceleran las reacciones químicas, y la descomposición de la materia orgánica es muy rápida.

Por el contrario, bajo ambientes con fuerte aridez, desiertos y semidesiertos, la meteorización química es mínima porque las lluvias son extremadamente escasas. El suelo prácticamente no existe, en superficie aparece la roca alterada por procesos de meteorización mecánica, la termoclas-

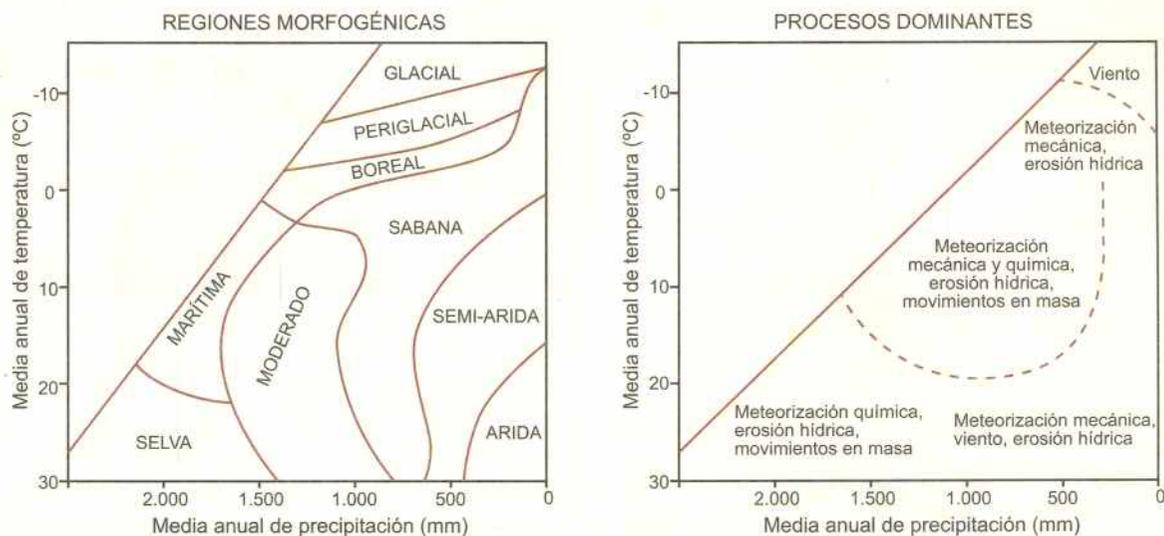


Fig. 7.- Diagramas de Peltier mostrando las regiones morfogenéticas y los diversos procesos dominantes en función de las precipitaciones y de las temperaturas medias anuales.

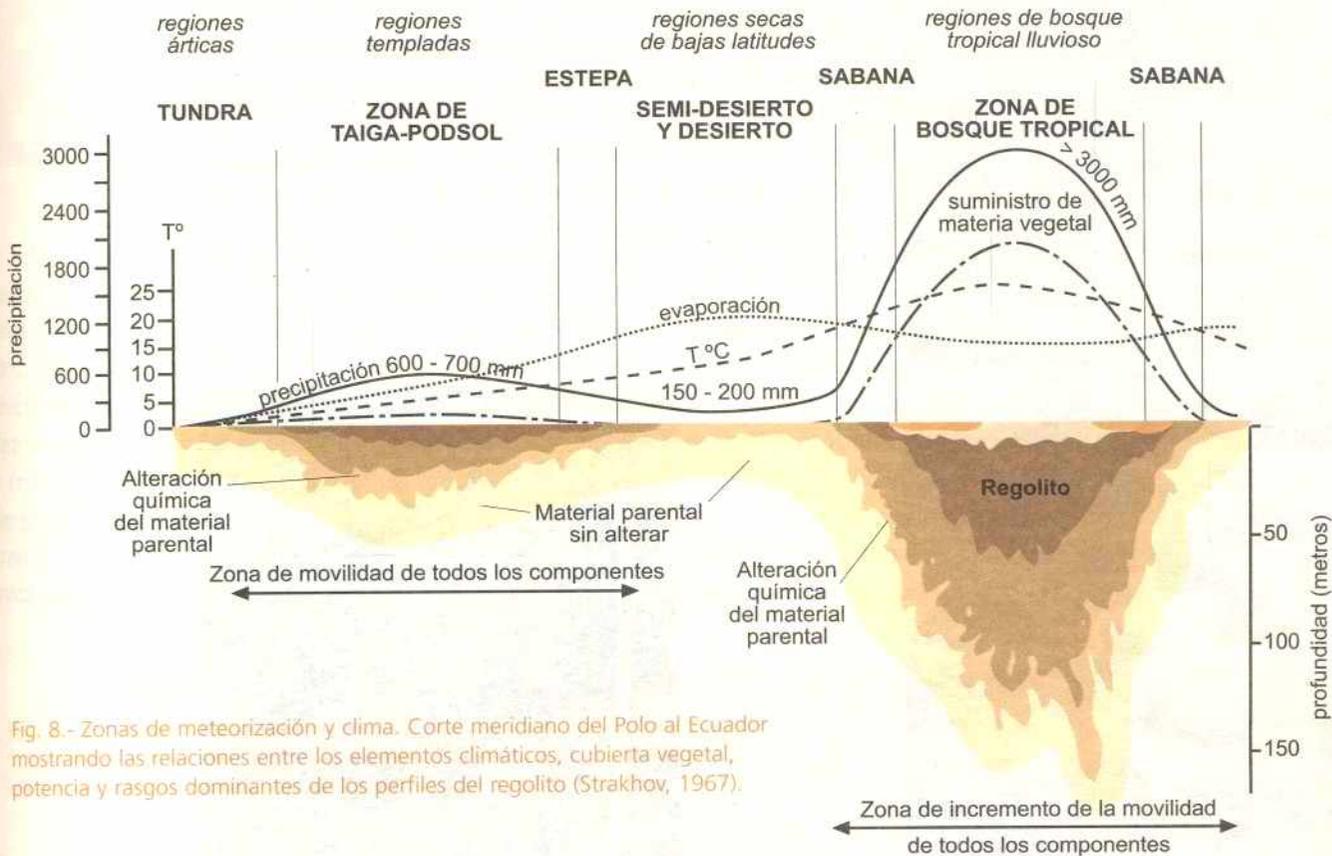


Fig. 8.- Zonas de meteorización y clima. Corte meridiano del Polo al Ecuador mostrando las relaciones entre los elementos climáticos, cubierta vegetal, potencia y rasgos dominantes de los perfiles del regolito (Strakhov, 1967).

ta es la responsable fundamental del proceso; ● **hamada** (desierto tabular rocoso) y ● **reg** (desierto tabular pedregoso) son las formaciones más comunes (Fig. 9).

En las regiones de clima templado, la amplitud de las condiciones pluviométricas oscila entre las húmedas y las semiáridas y las temperaturas del frío al calor. En función de estas variaciones, los procesos de meteorización, tanto física como química, son más o menos operativos; el manto de alteración y el suelo pueden desarrollarse con espesores desde algunos centímetros hasta

varios metros (Fig. 10). Bajo los climas de altas latitudes, de tundra, las temperaturas son demasiado bajas para la meteorización química, así que la alteración predominante es la mecánica; el suelo es muy delgado y con abundante material fragmentado por termoclastia y ● **crioclastia**.

Este esquema, muy simplificado, asume que tanto el clima como la superficie de los territorios son estables, condiciones que rara vez se dan. Es conocido que la estabilidad de los climas a escalas temporales de miles y millones de años



es corta, que la variabilidad y los cambios han sido la norma y, en consecuencia, los ● **balances de meteorización**, muy variables. La mayor parte de los climas actuales que registra el planeta no tienen más de 10000 años, período insuficiente para desarrollar perfiles de meteorización profundos; por ello, gran parte de estos perfiles de *alteritas*, ● **regolito** y *suelo* corresponden a condiciones bioclimáticas pasadas, distintas de las actuales.



Fig. 10.- Perfil de suelo bajo clima mediterráneo semiárido. La meteorización es muy moderada, el material parental se halla a escasos centímetros de la superficie y la potencia del suelo, xerosol cálcico en la imagen, de unos 35 cm.

Fig.9.- Reg: cantarral de bloques resultante de la meteorización física en el desierto. La pátina de color oscuro que recubre el material es debida a procesos de reducción química (Desierto del Sahara).

2

La erosión eólica

Entre los procesos erosivos que actúan en la superficie terrestre, la erosión por el viento está ampliamente extendida; es particularmente severa en algunos ambientes áridos, en los semiáridos y en muchos sectores litorales, es decir, en aquellos territorios donde la sequedad y la escasez de vegetación son factores relevantes: desiertos cálidos y fríos, regiones peridesérticas y zonas litorales con playas de gran amplitud (Fig. 11). En estos escenarios se encuentran los más importantes paisajes modelados por la dinámica eólica. Sin embargo, en comparación con la erosión

llevada a cabo por agua, el viento es un agente erosivo de menor importancia. La pérdida de suelo y nutrientes, por erosión eólica, afecta a la estructura y productividad del suelo, produce daños en la vegetación natural y los cultivos, contamina la atmósfera; el transporte y la deposición de sedimentos afectan a muchos ambientes y actividades, reduce la visibilidad por el polvo en suspensión, incrementa el costo en el mantenimiento de carreteras, afecta a la salud humana y a la de los animales y contribuye a la desertificación del territorio.

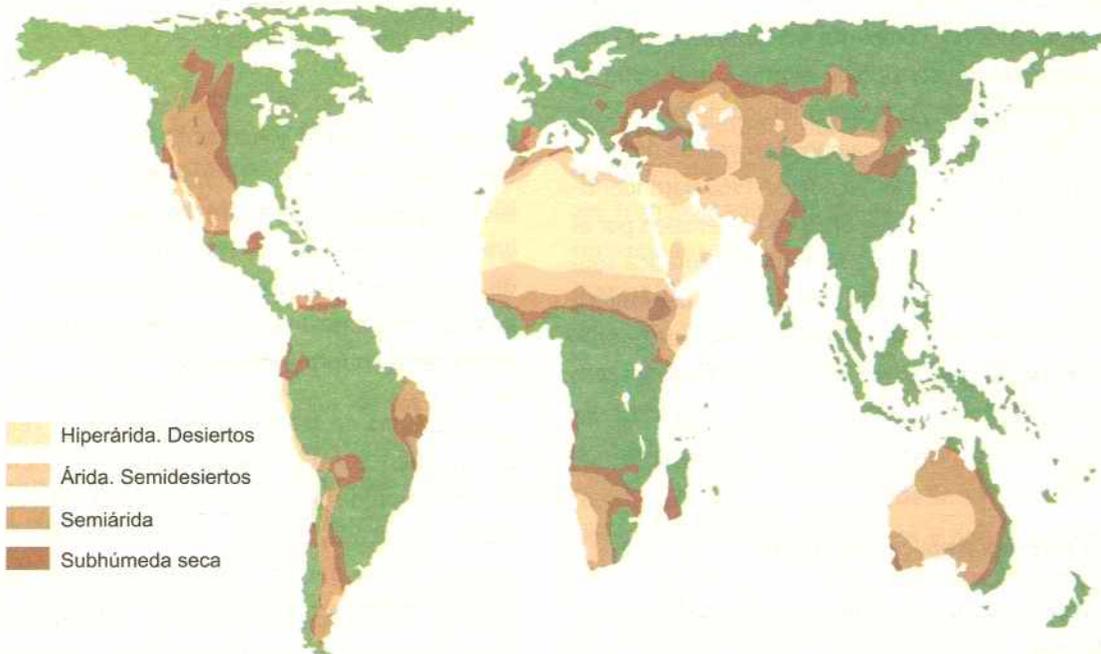


Fig. 11. Desiertos y semidesiertos del globo. Los climas áridos y semiáridos abarcan alrededor del 30 % de la superficie terrestre.

Movimientos de partículas y tipos de transporte eólico

La erosión por viento de un suelo es función de la oposición de dos fuerzas; por un lado, la ejercida por el viento, y por otro, la resistencia del suelo. Rocas y suelos, por su amplia diversidad, responden de modo diferente a la energía cinética que le es aplicada. Según el tipo de suelo y las condiciones de superficie, se requiere un mínimo de velocidad para remover las partículas. Es el llamado ● **umbral de velocidad**. El movimiento de los granos se inicia cuando el viento alcanza una velocidad suficiente para superar la inercia de las partículas en reposo. En el aire, los granos son transportados por el viento hasta que la fuerza de la gravedad los arrastra de nuevo hacia la superficie.

Los ● **parámetros** que intervienen en la erosión eólica están relacionados por complejos mecanismos; por ello, no resulta fácil estimar este tipo de erosión. Un sistema de ecuaciones, ● **nomogramas**, tablas, métodos informáticos, experimentos de laboratorio y campo, han venido desarrollándose desde mediados de la década de 1960 para identificar y entender los factores que afectan a la erosión por el viento y poder plasmarla en una fórmula matemática sencilla. Finalmente, la erosión eólica fue expresada, empíricamente, por la llamada *ecuación de la erosión del viento* como función de los siguientes factores (Schwab *et al.*, 1996):

$$E = f(I, R_f, C, L, V)$$

donde

E = Tasa de erosión eólica media anual (t/ha/año);

I = Erosionabilidad del suelo en t/ha/año. Es función de los agregados;

R_f = Factor de rugosidad;

C = Factor climático en porcentajes;

L = Longitud del terreno sobre la que soplan los vientos prevalentes, área afectada;

V = Factor cubierta vegetal

La cantidad de suelo removido está determinada, pues, por el tamaño de las partículas, la densidad, la gradación, la rugosidad de la superficie afectada, la velocidad del viento y el desarrollo del área erosionable y de la cobertura vegetal.

Las fuerzas que actúan sobre las partículas de un suelo expuesto a un flujo turbulento de viento y capaces de movilizarlas son tres: *suspensión*, *saltación* y *reptación* (Fig. 12). Estos tipos de transporte dependen, básicamente, del tamaño del grano y de la energía eólica, si bien la transición de uno a otro tipo de transporte es, con frecuencia, difícil de delimitar.

La *suspensión* se produce cuando las partículas de polvo son muy finas y ligeras (<0,06 mm), son transportadas en el seno del viento y, aunque la carga suspendida suele depositarse relativamente cerca del área fuente, las grandes tormentas con vientos fuertes y altos son capaces de transportar grandes cantidades de polvo, permanecer durante bastantes días, recorrer enormes distancias y depositarse en forma de polvo.

Los tipos de tiempo a escalas local, regional y global pueden estar acusadamente influenciados por la acumulación de polvo en la atmósfera. Cuando la vegetación es escasa, cuando las labores agrícolas suprimen la vegetación natural para el cultivo y sobreviene la sequía, la tierra queda expuesta a la erosión eólica. El viento remueve grandes cantidades de sedimentos de la

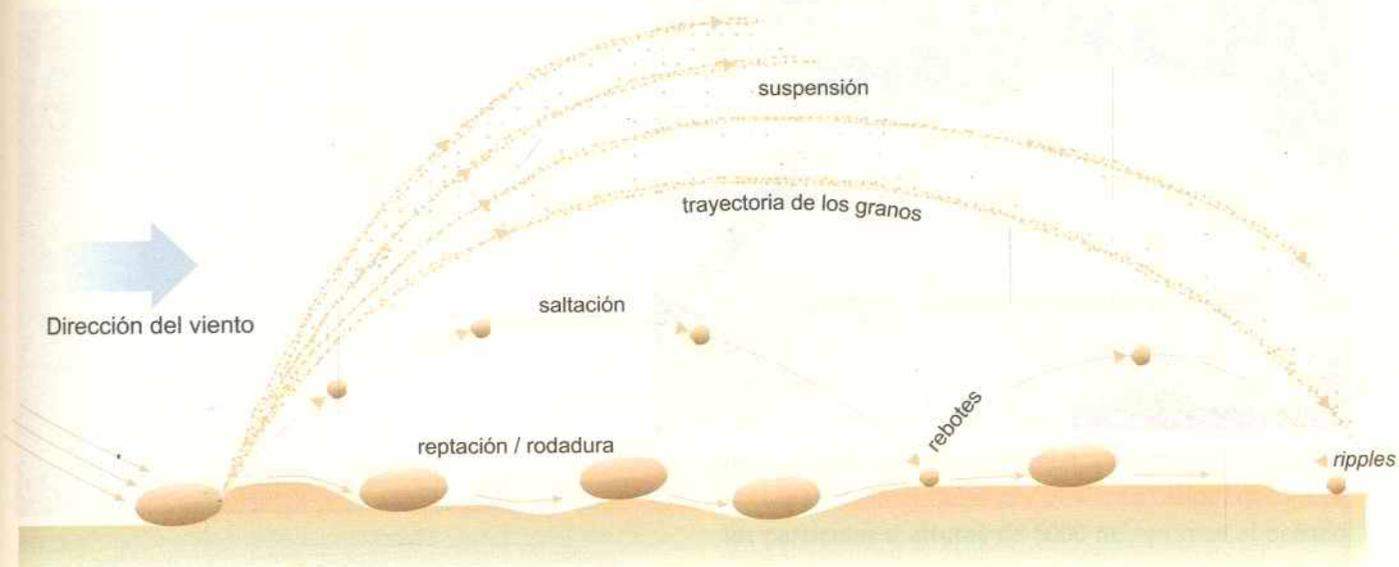


Fig. 12. Tipos de movimientos y desplazamientos de partículas que se producen durante la erosión por el viento: suspensión, saltación, rodadura y rebotes.

superficie y de las capas superiores del suelo, nutrientes incluidos. Estas circunstancias se produjeron en la región de la Gran Llanura (Estados Unidos) durante los años 1930; sequía y tormentas de polvo originaron el llamado *Dust Bowl* (depresión de polvo), provocando una grave crisis agrícola y ambiental. En 1934, una inmensa nube de polvo procedente de la erosión del suelo en la Gran Llanura cubrió el este de los Estados Unidos, a 2400 km de distancia. Al año siguiente, los Estados Unidos crearon el *Servicio de Conservación del Suelo* con el objetivo de promover las buenas prácticas en su manejo.

Las tormentas de polvo son acontecimientos naturales en los climas ventosos de las regiones áridas, y se

ven incrementadas durante los períodos de sequía; sin embargo, la cantidad de sedimentos disponibles para ser transportados guarda estrecha relación con las perturbaciones que el ser humano introduce en los sistemas naturales por reducción o supresión de la cubierta vegetal, sobrepastoreo, sistema de labranza, incendios, etc. Por ejemplo, en la región del Sahel (borde meridional del desierto del Sahara) las tormentas de polvo son frecuentes y están causadas por la desaparición de la cubierta vegetal natural de la sabana por roturaciones para extender los cultivos y por el pastoreo excesivo. Situación que se agrava con los años de extensas y severas sequías, como las registradas en los años 1960 y 1970 (Fig. 13).

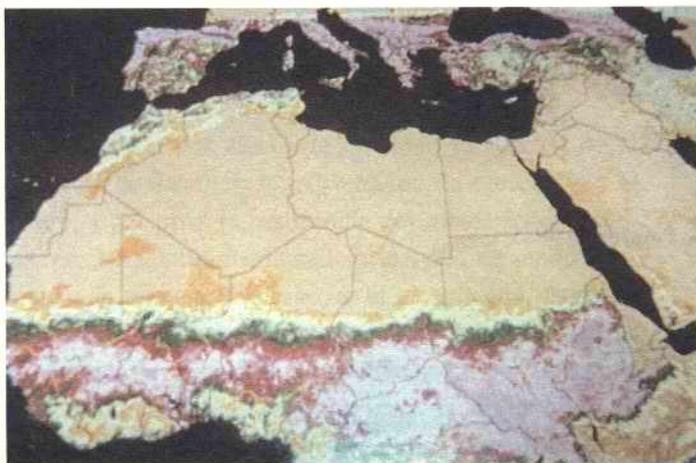


Fig. 13. Las graves secas registradas en la región subsahariana del Sahel, unidas a la deficiente gestión de los recursos suelo y vegetación, a las pobres técnicas de irrigación y a la presión demográfica, son las causas dominantes de la erosión eólica del suelo, de las grandes tormentas de polvo en suspensión y de la expansión del desierto.

Los movimientos de las partículas

De los tres modos de movimiento de partículas, la suspensión es la forma más espectacular y fácil de reconocer. Las partículas de polvo en el aire reducen la visibilidad, son un abrasivo cuando el viento sopla y una fuente de contaminación del aire que puede ocasionar problemas respiratorios. Con el tiempo, el polvo se deposita sobre cualquier cosa: viviendas, vías de comunicación, vegetación natural, cultivos, lagos, embalses, mares, océanos, etc., pudiendo ocasionar daños más o menos importantes.

La *saltación* es un proceso por el que las partículas finas (entre 0,1 y 0,5 mm de diámetro) son levantadas y saltan desde la superficie del suelo, siguiendo distintas trayectorias, por la velocidad y turbulencia del viento, la resistencia del aire, y la gravedad y naturaleza del sustrato sobre el que rebotan al caer. Es un transporte a baja altura; la mayor parte de la saltación ocurre dentro de los primeros 30 o 40 cm de altura. Las longitudes de los saltos de las partículas son del orden de 10 a 15 veces su altura, si bien las partículas más pequeñas pueden alcanzar mayores alturas y, por consiguiente, longitudes de salto mucho

mayores. Al desplazarse, los granos describen trayectorias curvas y chocan contra el suelo con una fuerza considerable, pero con un ángulo pequeño. El impacto hace que el grano vuelva a rebotar y ascienda de nuevo. Al mismo tiempo, la capa superficial de granos del suelo también se desplaza en la dirección del viento, ya que está sometida al bombardeo de los impactos de los granos transportados por la acción eólica.

El proceso de saltación es detenido por la obstrucción que puede introducir un obstáculo (vegetación, vallas, muros) que atrape las partículas o reduzca la velocidad del viento próximo a la superficie del suelo. Las partículas movidas por este proceso pueden causar severos daños a la vegetación.

La *reptación* y *rodadura* se registran cuando las partículas transportadas son demasiado pesadas para ser levantadas por el viento (diámetros entre 0,5 y 2 mm). En este proceso, las partículas son arrastradas o rodadas a través de la superficie y chocan con otras partículas en saltación,

Las grandes tormentas transoceánicas de polvo en suspensión

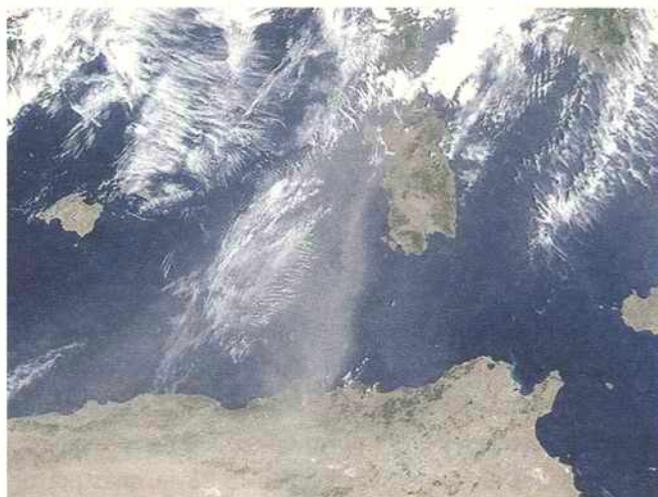
Las imágenes que suministran los satélites que orbitan la Tierra permiten observar, desde el espacio, la magnitud y las trayectorias de las grandes tormentas de polvo en suspensión. El Sahara, palabra bereber que significa *desierto*, es el más dilatado espacio de tierras áridas del planeta (casi 4800 km de Oeste a Este, entre 1600 y 2000 km de Norte a Sur y más de 8 millones de km²) y el mayor productor de polvo mineral del planeta. Cada año, varios cientos de millones de toneladas de polvo del Sahara occidental son transportadas hacia el Oeste por el viento cálido, que eleva las partículas a alturas de 5000 m., y cruza el océano

>>



Fig.14. Masiva tormenta de polvo sahariano, por el viento siroco, sobre las Islas Canarias. El polvo llega a alcanzar el mar Caribe, y su depósito afecta severamente las formaciones de coral, degradándolas. (Imagen del 26/02/2000, cortesía del SeaWiFS Project. Nasa/Goddard Space Flight Center and Orbimage).

Fig.15. Las tormentas de polvo sahariano afectan con frecuencia al Mediterráneo occidental, siendo las regiones orientales de la península Ibérica las más afectadas por este fenómeno. (Imagen cortesía del SeaWiFS Project. Nasa/Goddard Space Flight Center and Orbimage).



Atlántico y alcanza el mar Caribe, América Central y América del Sur. Este proceso afecta a miles de kilómetros cuadrados del oeste del Atlántico y a las islas Canarias (Fig. 14). En ocasiones, estas tormentas de polvo sahariano siguen una trayectoria en sentido Norte y cubren vastas extensiones del Magreb y del Mediterráneo occidental (Fig. 15). Los vientos del desierto transportan más sedimentos finos que cualquier otro agente: el Sahara probablemente remueve y transporta entre 60 y 200 millones de toneladas/año de polvo (*The U. S. Global Change Research*, 2001). Se ha estimado que en un km³ de aire puede viajar en suspensión unas 900 toneladas de polvo. Así, una tormenta de 500 km de diámetro puede transportar más de 90 millones de toneladas de polvo a largas distancias.

Recientes investigaciones llevadas a cabo por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S.G.S) relacionan la degradación de las barreras de coral del Caribe y el incremento en la frecuencia e intensidad de las tormentas de polvo del Sahara desde la década de 1970. Este polvo en suspensión transporta patógenos que afectan a buen número de especies marinas caribeñas. Por otro lado, otros estudios sugieren que el polvo sahariano en suspensión puede desempeñar una importante función en la frecuencia e intensidad de los huracanes que se forman en el este del Océano Atlántico y que, posteriormente, se desplazan hacia el Caribe y la costa norteamericana.

También recientes observaciones satelitarias de la NASA (Centro espacial de vuelo Goddard) e investigaciones de la Universidad Hebrea de Jerusalén han encontrado estrechas relaciones entre polvo en suspensión y sequías. Las partículas en suspensión inhiben la lluvia, más polvo significa menos lluvia y menos lluvia significa sequía y más

aridez, menos vegetación protectora, más erosión eólica y más polvo en suspensión. Se origina así un círculo vicioso que se retroalimenta positivamente y que tiene unas importantes afecciones en calentamiento global, en la desertificación del paisaje y en la expansión de los desiertos. Al desencadenamiento de este proceso contribuyen aquellas actividades humanas que afectan severamente al suelo, tales como determinados tipos de agricultura y el pastoreo excesivo. La dramática sequía que registró la región del Sahel a principios de los años setenta, el sobrepastoreo y la creciente desecación del lago Chad han contribuido al incremento del polvo generado por el Sahara y su transporte a través del océano Atlántico y del mar Mediterráneo.

Las grandes tormentas de polvo no son exclusivas del Sahara, otros desiertos registran el mismo fenómeno, tal como detectan los satélites. Por ejemplo, el 15 de abril de 1998 una gran tormenta procedente del desierto de Gobi (oeste de China y Mongolia) produjo una inmensa nube de polvo que fue transportada a través del océano Pacífico y causó elevadas concentraciones de aerosoles en amplias áreas de la costa de América del Norte. El 18 de mayo de 2001, otra vasta tormenta de polvo, procedente de los desiertos de Khash y Margow, en el suroeste de Afganistán, cubrió gran parte de Irán, Afganistán y Pakistán.

Las tormentas de polvo en suspensión son, pues, una destacada respuesta a los procesos de erosión y transporte eólicos. En las últimas décadas se viene observando un notable incremento de los flujos de polvo y sus negativas repercusiones en la visibilidad, sequías, productividad de muchos ecosistemas, salud de los humanos, calentamiento global y expansión de la desertificación.

Erosión eólica y formas de modelado

El viento cargado de materiales puede llevar a cabo dos tipos de acción erosiva, sobre todo en aquellas áreas de escasa o nula cubierta vegetal. Por un lado, barre las partículas finas que se hallan en la superficie del suelo, las arrastra o levanta y las proyecta contra las rocas y otras superficies a velocidades más o menos importantes. Este proceso de selección, movilización y transporte del material suelto, generalmente arenas, es denominado **deflación**. El resultado de este mecanismo es la aparición de depresiones topográficas, más o menos acentuadas y de variables dimensiones, denominadas *depresiones de deflación*.

En amplias zonas de muchos desiertos, donde se mezclan materiales finos y gruesos, la deflación elimina limos y arenas, mientras que los cantos gruesos, al no poder ser deflactados, quedan en su sitio, permanecen en la superficie rebajada y protegen las capas de cantos finos que se hallan debajo (Fig. 16); excepcionalmente, cuando la fuerza del viento es muy grande, puede levantar pequeños cantos. De este modo se forman vastas extensiones pedregosas conocidas como *reg*, desierto de piedras o pavimento desértico (Fig. 17). Estos inmensos pedregales pueden tener dos orígenes distintos, por un lado ser el resultado de la fragmentación de rocas (*reg de disociación*), mientras que por otro pueden proceder de la acumulación de antiguos depósitos fluviales (*regs aluviales*).

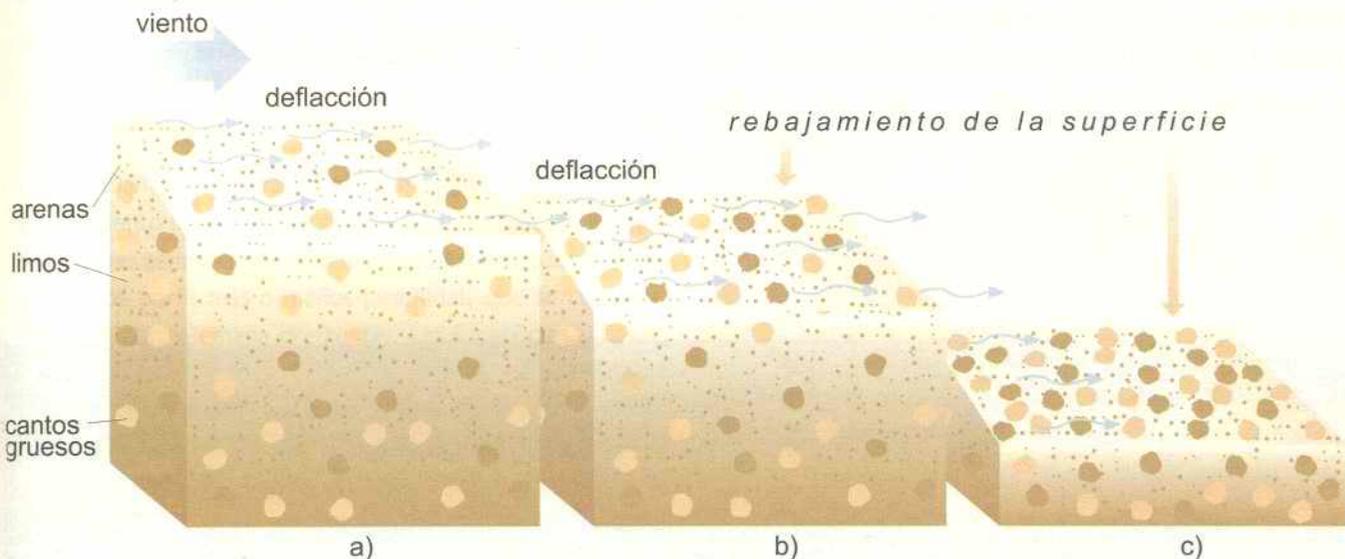


Fig. 16. Formación del desierto de piedras o *reg*.

(a) empieza la deflación movilizándolo el material fino;

(b) la movilización de las partículas más finas y su transporte a distancia rebajan la superficie topográfica y concentran la proporción de gruesos;

(c) agotado el material fino en superficie, queda una capa continua de cantos gruesos, finalizando la deflación. Ésta puede reanudarse si alguna causa (vehículos, animales...) remueve la capa de gruesos.

Asimismo, una vez cargado de granos de arena, el viento ejerce una acción mecánica que pule las rocas y desgasta la cutícula de los vegetales, si los hubiera. Es la **abrasión** o **corrasión**. Esta acción erosiva del viento se limita a las primeras decenas de centímetros (hasta uno o dos metros como máximo) basales de un acantilado, colina u otro afloramiento que destaque sobre un plano más o menos horizontal. La eficacia y la tasa de abrasión es máxima allá donde la velocidad del viento es alta, abundante el suministro de partículas que pueda levantar abundante y friables las litologías sobre las que impactan los granos de arena. La imagen erosionada de la Esfinge de Egipto ha popularizado los efectos de este proceso (Fig. 18).

Formas de erosión eólica, a pequeña escala, aparecen en las superficies de los desiertos pedregosos con la presencia de cantos que presentan superficies pulidas y facetadas por los impactos de las partículas transportadas por

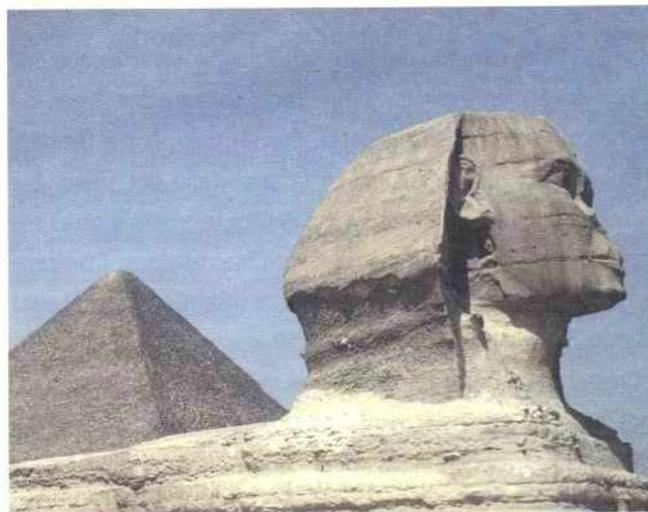


Fig.18. La Esfinge de Giza, en Egipto, ofrece los efectos de la abrasión eólica en su rostro y cuerpo.

Fig.17. El reg es el resultado de la pérdida de los componentes más finos del suelo, quedando los fragmentos más gruesos. En el desierto del Sahara, los pedregales suelen ser de color oscuro por la pátina de barnices que recubren bloques y cantos, por lo que a estas extensas superficies también se las conoce como desierto negro.



el viento; son los llamados ● **ventifactos**. Las facetas o caras son originadas por ángulos de entre 30 y 60 grados orientadas perpendicularmente a la dirección de los vientos.

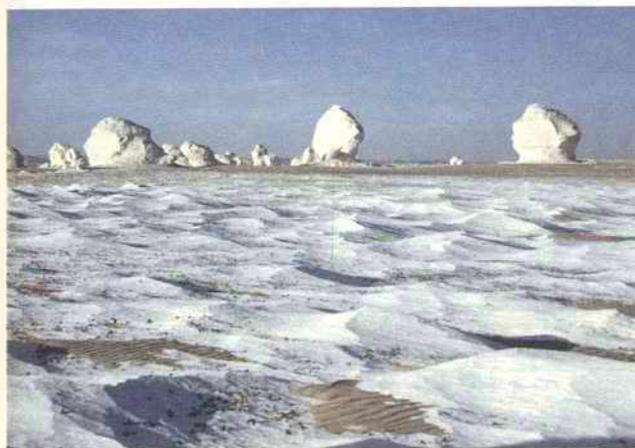


Fig 19. Superficie rocosa de calcreta pulimentada por la abrasión eólica. Al fondo modelado fungiforme por la acción del viento. (Desierto Blanco, Egipto).

tos dominantes y separadas por aristas más o menos agudas. El viento puede erosionar más de una cara, si bien las formas más comunes son aquellos cantos modelados en tres caras y de perfil más o menos piramidal, que se conocen con la palabra alemana *dreikanter*. Las superficies rocosas desnudas también pueden exhibir evidencias de la abrasión eólica en forma de superficies pulimentadas y facetadas que ofrecen un aspecto de *oleaje rocoso* (Fig. 19). Otras huellas se expresan en pequeñas oquedades (*pits*), acanaladuras (*flutes*) y surcos (*grooves*). En ocasiones, es difícil adscribir estas formas con exactitud a las acciones eólicas, porque rasgos similares pueden ser producidos por la erosión hídrica y los procesos de meteorización.

Formas de modelado por abrasión y deflación, a mediana escala, en rocas de estructura granular, en arcillas y

limos, son los ● **yardangs** (término mogol que procede del desierto de Taklimakan, en China). Además de la litología, también la dirección, el ● **buzamiento** y el grado de fracturación de las rocas influyen en el desarrollo y la forma de estos esculpidos eólicos. Se presentan como cerros alomados de perfil longitudinal disimétrico, alineados paralelamente a la dirección del viento, con el frente de barlovento redondeado y extremo a menor altura y afilado a sotavento (Fig. 20). El tamaño de estas formas aerodinámicas, presentes en el corazón hiperárido de todos los grandes desiertos, varía desde unos pocos metros hasta varios centenares de longitud, algunos metros de altura y hasta 25-30 de anchura. Están separados por pasillos o corredores excavados por el viento.

En estos escenarios, también en rocas poco consolidadas como las areniscas y los sedimentos de antiguas depresiones lacustres, coronados por materiales cementados en

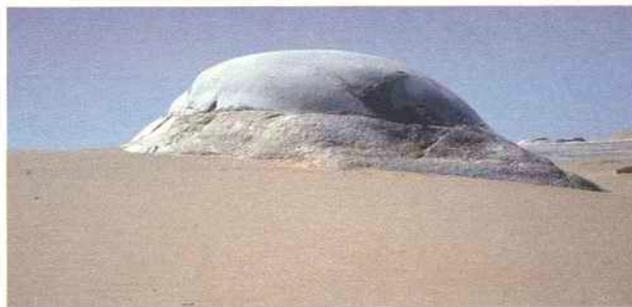


Fig.20. Yardang modelado sobre calcreta. Las fracturas propician una mayor eficacia de la acción eólica. (Desierto del Oeste, Shara al-Garbiya, Egipto oriental).

forma de costra, la abrasión es muy activa y eficaz en las partes inferiores y vulnerables de estos relieves. El resultado es un modelado fungiforme, en forma de seta (Fig.21). Uno de los escenarios más impresionantes de estas formas de modelado eólico, extendidas en cientos de kiló-



Fig.21. Modelado en seta en antiguos sedimentos lacustres coronados por una costra. El perfil que ofrece es el resultado de la abrasión diferencial que se ejerce en ambos tramos, el superior y el basal (Sahra al Gharbiya, Egipto).



Fig.23. Lago salado de aguas someras de Al-Bahrayin (Dos mares), próximo al oasis de Siwa (Depresión de Qattara, Egipto). Obsérvese la costra salina precipitada en sus bordes.



Fig.22. Vasto campo de yardangs y formas achampañonadas en el Desierto del Oeste (Egipto oriental).

metros cuadrados, es el llamado Desierto Blanco en el Desierto del Oeste, Sahra al-Gharbiya, Egipto (Fig. 22).

La presencia de formas de erosión a gran escala fue detectada desde el comienzo de las primeras exploraciones por estas regiones áridas; sin embargo, su magnitud sólo ha sido apreciada gracias a las imágenes suministradas por los satélites. En el Sahara oriental se hallan cuencas de deflación de varias decenas de metros de profundidad y más de 100 km de largo, algunas están orientadas siguiendo líneas de ● *drenaje*, y otras, localizadas en amplios corredores entre ● *dunas*, y en ambos casos con sus ejes alineados según la dirección de los vientos prevalentes. En realidad, estas grandes cuencas han tenido unos procesos de modelado mucho más complejos que la única acción eólica. En muchos casos su tamaño aparece relacionado con la tectónica, como puede apreciarse con la presencia de fracturas, con procesos y modelados fluviales heredados, meteorización, etc. Son cuencas que tienen un origen poligénico, si bien la actividad eólica desempeña una acción primordial.

Probablemente, la más importante concentración de este tipo de grandes cuencas se halle en el noroeste de Egipto, donde se extienden por más de 70000 km². Destaca la Depresión de Qattara, la más profunda de todas las cuencas, de 134 m bajo el nivel del mar Mediterráneo. En su sector suroccidental, en el área del oasis de Siwa, se hallan alojados extensos lagos de agua salobre por afloramiento de los ● **niveles freáticos** (Fig. 23). Su desecación a causa de la intensa evaporación produce, en sus fondos arcillosos, la precipitación y la formación de una costra salina. A estas grandes depresiones, restos fósiles de grandes lagos, se las conoce como ● **sebjas o sebkhas**.

Otras grandes cuencas y corredores atribuidos a la acción eólica se encuentran en el Desierto del Oeste de Egipto (Farafra, Dhakla y Kharga), sur de Túnez, sur de Argelia, Tibesti y Tassili en el Sahara central, desierto líbico, desierto del Lut (Sureste de Irán), suroeste de Australia y otros desiertos. En general, estas cuencas se desarrollan, preferentemente, en sedimentos escasamente consolidados por procesos combinados de deflación y abrasión, y suelen tener una larga y compleja historia geomorfológica.

Depósitos eólicos: estructuras básicas

Las acumulaciones de sedimentos transportados por el viento destacan en las regiones secas de todo el mundo y a lo largo de muchas costas arenosas y amplias. A las grandes acumulaciones de arena se las consideró, durante mucho tiempo, el paisaje exclusivo o casi de los desiertos, ya que las rutas de caravanas seguían, preferentemente, los corredores entre las dunas. No obstante, las construcciones dunares son las que expresan más frecuentemente la acción del viento en la morfogénesis de las regiones áridas y las formas más llamativas de los desiertos, pese a que

ocupan, de media, alrededor del 20 % de sus superficies; aunque menos del 1% en los desiertos de América del Norte y del Sur y hasta el 50 % en los desiertos australianos.

Las más pequeñas acumulaciones eólicas de arena son los ● **ripples**, **rizadas** u **ondulaciones** originados en el flanco barrido por el viento. Aparecen en una sucesión de pequeñas crestas u ondulaciones con una altura de alrede-

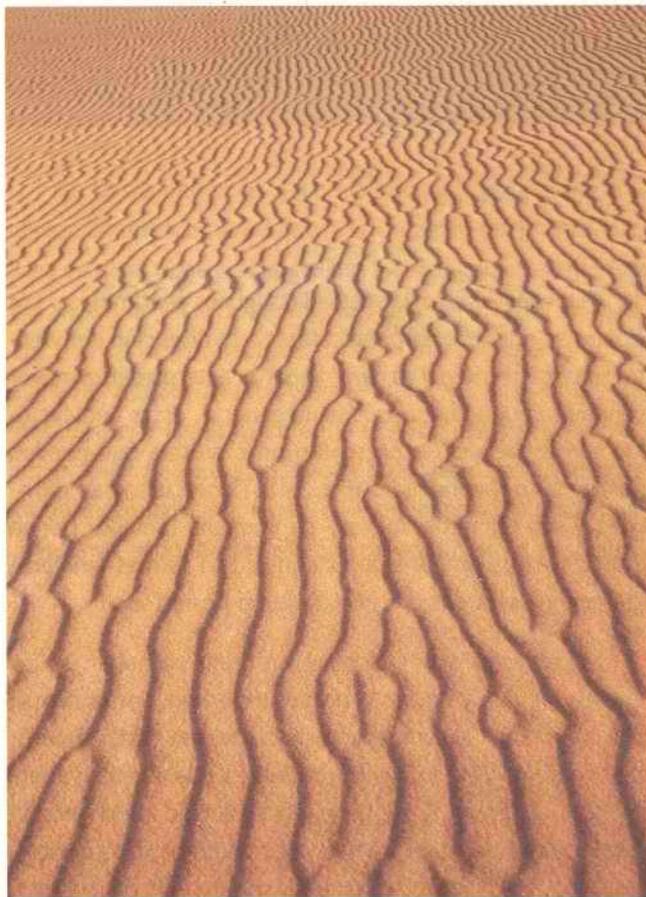


Fig.24. Ripples producidos por el viento. Sus crestas pueden ser sinuosas o rectas y tener un trazado más o menos longitudinal.

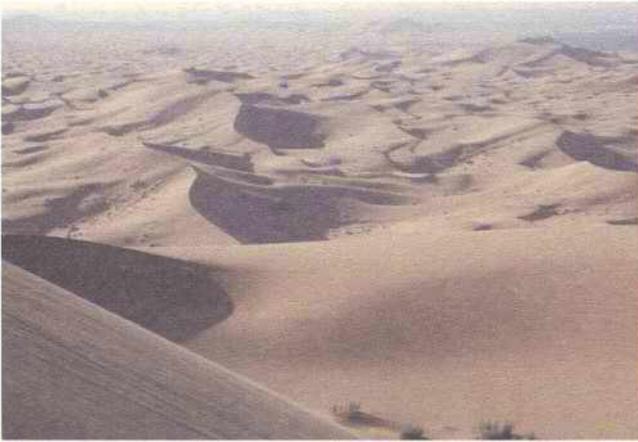


Fig.25. El erg es un extenso cuerpo de arena que se halla en los grandes desiertos, especialmente en los del hemisferio norte (Erg Chebbi, suroeste de Marruecos).

dor de un centímetro y espaciadas algunos centímetros. Los *ripples* se orientan perpendiculares a la dirección del viento, son disimétricos y su cara de barlovento presenta mayor pendiente que la opuesta. Por lo general, estas ondulaciones son asimétricas y presentan unas crestas que pueden ser agudas o redondeadas (Fig. 24). Tienen una gran movilidad y son efímeros. Aunque de pequeño tamaño, tienen características similares a las dunas. Son formas omnipresentes en los extensos arenales de los desiertos.

Las mayores acumulaciones de arena se hallan en los ● *ergs* (Fig. 25) y en los ● *mantos de arena*. Los primeros, conocidos también como *mares de arena*, son vastas superficies, de forma y extensión muy variables, que albergan diversos tipos de dunas. En su génesis y evolución intervienen la disponibilidad de grandes volúmenes de arena, las condiciones climáticas hiperáridas, una importante energía del viento y una topografía adecuada. Cuando los suministros de

arena se realizan en áreas de topografía llana, el *erg* es dinámico y ofrece una gran movilidad; mientras que si se localiza en depresiones topográficas, a la sombra de barreras topográficas o en zonas con vientos de baja energía, su movilidad es escasa y se le conoce como *erg* estático. Algunos *ergs* cubren decenas de miles de kilómetros cuadrados, como los grandes *ergs* saharianos (Gran *erg* occidental, Gran *erg* oriental, *erg* Iguidi) y de la península arábiga (*erg* Roub al Khali). El paisaje de estos arenales suele mostrar una alternancia de alineaciones de dunas paralelas, conocidas en el Sahara como ● *draa*, amplios pasillos llamados ● *gassi*, si aflora el substrato rocoso, y ● *feidj*, si se hallan cubiertos por la arena.

Los *mantos de arena* (Fig. 26) son también vastos cuerpos de arena, sin dunas o con algunas de pequeña envergadura, y se originan en terrenos de topografía subhorizontal o con suaves declives. Como los *ergs*, su formación es poligénica, interviniendo la topografía llana, la prevalencia del viento, el tamaño del grano del material fino, la presencia de mantos freáticos someros y costras superficiales, las efímeras ● *escorrentías* de los ocasionales aguaceros, etc.

La sedimentación y las construcciones dunares correlativas son las que expresan más comúnmente la morfogénesis

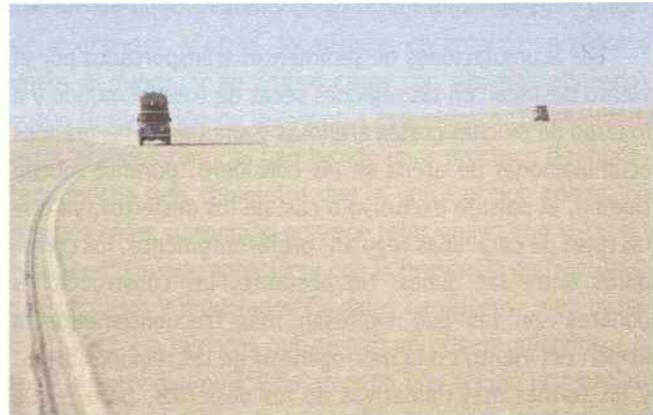


Fig.26. Manto de arena (Sahara oriental).



Fig. 27. Componentes básicos del perfil transversal de una duna-tipo.

del viento en los dominios áridos y los sectores costeros, por la extensión de los espacios que recubren, la diversidad de tipos y las considerables dimensiones que alcanzan en ocasiones. Las *dunas* son las acumulaciones eólicas más características y conocidas. Las partículas transportadas por el viento caen cuando la efectividad del medio de transporte disminuye. Normalmente, esta disminución está motivada por la presencia de una superficie de desplazamiento rugosa o de un obstáculo, por una sobrecarga de los materiales transportados o bien por la inestabilidad en el flujo de viento.

La forma básica de una duna originada por un viento de dirección única es la asimetría en su perfil transversal. Este tipo de duna tiene una larga cara inclinada suavemente (con un ángulo de 10 a 15°) en la dirección del viento (barlovento) y otra opuesta (sotavento) más corta y escarpada, por donde se desliza la arena grano a grano o en placas. Los granos de arena depositados en la cara de deslizamiento suelen originar una estratificación entrecruzada como respuesta a los cambios en los vientos dominantes. El **umbral** del ángulo de estabilidad para que se produzcan o no desliza-

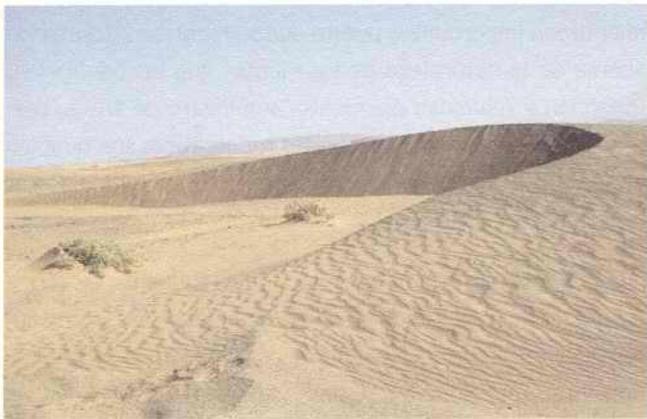


Fig. 28. Barjana de tamaño medio en forma característica de media luna, con ripples en la cara de barlovento (Sahara oriental).

► Glosario

Umbral. En la ciencias de la Tierra, se le identifica como un valor o estado crítico del medio natural o medioambiental que actúa como limitador de cualquier proceso. Son como los fusibles de la naturaleza o del sistema ambiental.

mientos se halla entre 30 y 35° (Fig. 27). Las tasas de movimiento de la duna dependen, a la vez, del tipo y tamaño de la duna y de la frecuencia y fuerza del viento necesario para provocar el movimiento de la arena. Tasas de desplazamiento de 10 a 20 metros/año son las más comunes.

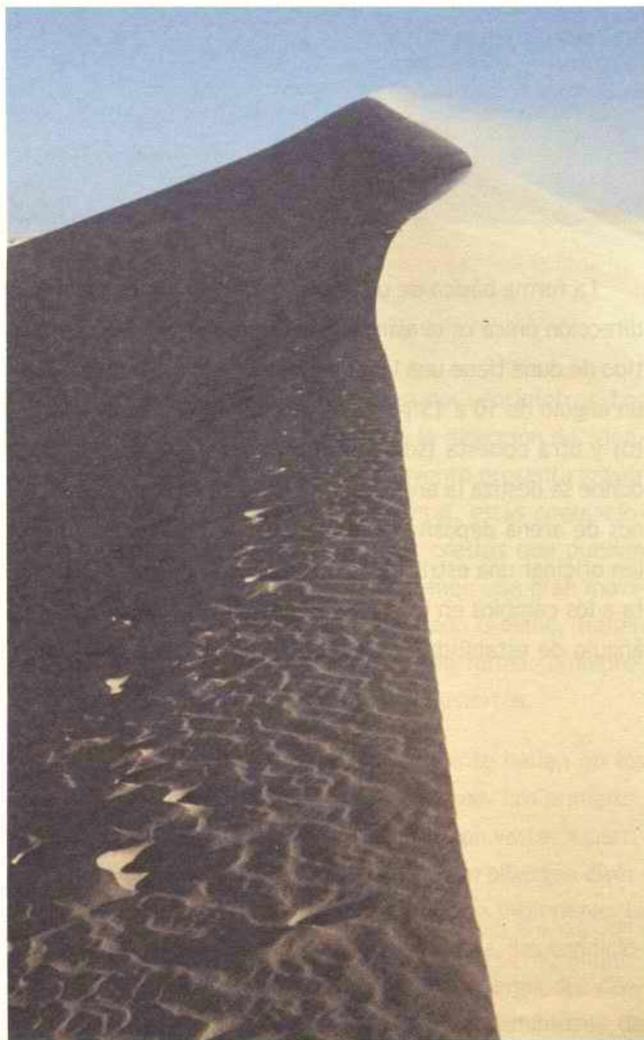


Fig. 30. Seif. Duna longitudinal de afilada cresta. Obsérvese el transporte de arena por el viento en la parte superior de la cresta.

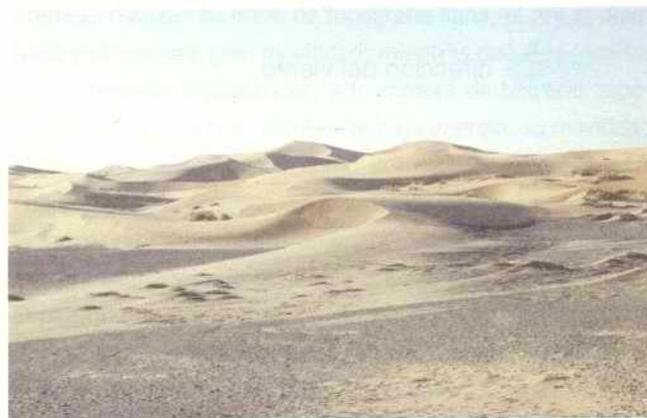


Fig. 29. Dunas barjanoides, muy frecuentes en los desiertos. Forman grandes alineaciones de perfil festonado perpendicular a la dirección del viento (Gran erg occidental, Sahara).

Las dunas

Se diferencian una gran cantidad de tipos de dunas en función de sus rasgos, si bien las clasificaciones más comunes se apoyan en dos características básicas: forma externa de la duna y posición y número de las caras de deslizamiento que presenten. La forma es el principal factor considerado, pero las características de las caras de deslizamiento son importantes, puesto que suministran información acerca de la naturaleza de los vientos que las configuran. Dirección y velocidad del viento, suministro de arena, presencia de vegetación y obstáculos topográficos son también importantes factores que influyen en la morfología. Los tipos básicos de dunas son:

- **Barkhana o barjana.** Son dunas solitarias en forma de media luna generadas por el viento que sopla constantemente en una sola dirección. Son dunas asimétricas que presentan una pendiente suave del lado de barlovento y

otra más abrupta a sotavento. Los granos de arena ascienden por la pendiente cara al viento y al llegar a la cresta caen por la pendiente opuesta formando un talud de pronunciada inclinación. De este modo, la duna avanza lentamente en la dirección del viento hasta unos 15 metros por año. Su tamaño suele ser modesto, tres o cinco metros de altura, aunque las mayores pueden alcanzar los 30 m. Cuando la dirección del viento es casi constante, la forma en media luna o *croissante* (creciente) es casi simétrica (Fig. 28); si no es así, una de las puntas crece y se extiende más que la otra.

Dunas transversales. Se originan allá donde hay abundancia de arena, vegetación inexistente o muy escasa y son uniformes los vientos predominantes. Las dunas forman un conjunto de largas crestas separadas por hondonadas y orientadas perpendicularmente respecto de la dirección principal del flujo de arena transportado por el viento. En los grandes desiertos, como el Sahara occidental, este tipo de dunas alcanzan alturas que rebasan los 200 metros y pueden extenderse en distancias que superen los cien kilómetros. Un tipo de duna de estructura intermedia entre los barjanes aislados y

las extensas ondulaciones de los complejos transversales son las *dunas barjanoides* (Fig. 29).

Dunas lineales. También conocidas con el término árabe de ● *seif* (duna de espada), que alude a las largas crestas de arena con bordes acusados, longitudinales y paralelas entre sí y a la dirección del viento dominante (Fig.30). Pueden extenderse a lo largo de muchos kilómetros y alcanzar alturas de varias decenas de metros.

Dunas parabólicas. Son dunas con cierto parecido a las barjanas, porque tienen forma de U en planta; sin embargo, sus brazos apuntan en dirección contraria al viento en vez de en su misma dirección. Suelen formarse allá en donde existe una vegetación rala en el área de barlovento. Este tipo es bastante común en los bordes de los desiertos y en las zonas costeras.

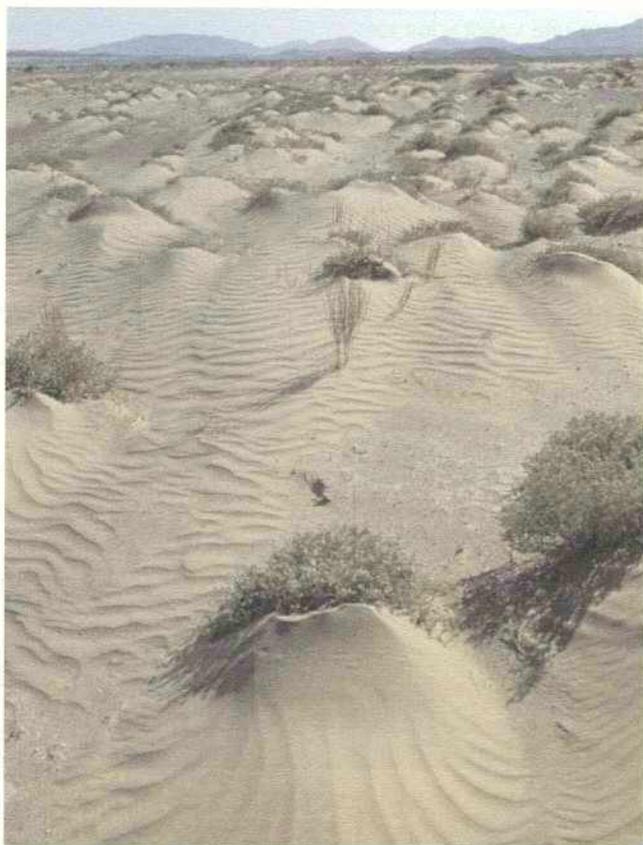
Dunas piramidales o en estrella. Son las dunas masivas que alcanzan las mayores alturas en los *ergs*, pudiendo rebasar los 300 metros. Presentan formas complejas con varios brazos radiales, divergentes desde la cima (Fig.31). Su forma indica que los vientos que las originan son variables. Se localizan en zonas de gran deposición de la arena



Fig.31. Duna piramidal, de proporciones masivas, con crestas de arena que irradian de la cima (Erg Chebbi, suroeste de Marruecos).

con crecimientos anuales de varios centímetros. Sus desplazamientos son bastante lentos.

● **Nebkhas.** Son pequeñas dunas originadas por el obstáculo que la vegetación u otro obstáculo oponen al viento. Tienen un contorno en flecha y a veces elíptico en planta, alargado en la dirección del viento. La arena se acumula a sotavento del arbusto o mata (Fig.32). Son formas que suelen construirse rápidamente cuando el viento cargado de arena sopla con cierta intensidad y en dirección constante. Sus dimensiones son proporcionales a las del abrigo bajo el que se extiende, siguiendo la dirección de los vientos dominantes cargados de arena.



La erosión eólica, un proceso de desertificación

La *Convención de Naciones Unidas de lucha contra la desertificación* (CCD, 1994) reconoce a la erosión por el viento como uno de los procesos destacados de la desertificación, en particular en los países secos. A escala global, no es un problema ambiental tan serio como la erosión por el agua; sin embargo, afecta severamente a muchas regiones áridas y semiáridas de la Tierra. El paisaje final es el clásico desierto de dunas.

La erosión eólica es un fenómeno natural, pero puede ser notablemente incrementada por acciones humanas inadecuadas tales como el laboreo excesivo o inadecuado, ciertas formas y tipos de cultivo, el sobrepastoreo, las roturaciones de la cubierta vegetal, la supresión de las plantas rastreras, la utilización de áreas marginales, la reducción en la rotación de cultivos, las talas indiscriminadas, la quema de rastrojos, los incendios, etc., cuyo resultado es la reducción, degradación e, incluso, desaparición de la cubierta vegetal. Y un suelo despojado de su cubierta protectora es extremadamente vulnerable a la erosión eólica, especialmente en las regiones con escasas lluvias. Por ello, la manera más eficaz para el control de este tipo de erosión del suelo es mantener la cubierta vegetal, medida también muy eficaz para el control de la erosión por agua.

Fig. 32. Nebkhas. Pequeñas dunas en forma de flecha que se han formado a sotavento de la vegetación. Cuando tienen dimensiones suficientes, sobre ellas, se forman ripples. Por lo general, tienen menos de un metro de altura y no más de dos de longitud.

Salinización. Proceso de enriquecimiento del suelo en sales solubles como los cloruros y sulfatos de sodio y magnesio. Es un proceso que se origina, principalmente, en ambientes áridos y semiáridos por causas naturales o bien inducido por el hombre por un uso inadecuado de las aguas de riego. Es un importante factor de desertificación.

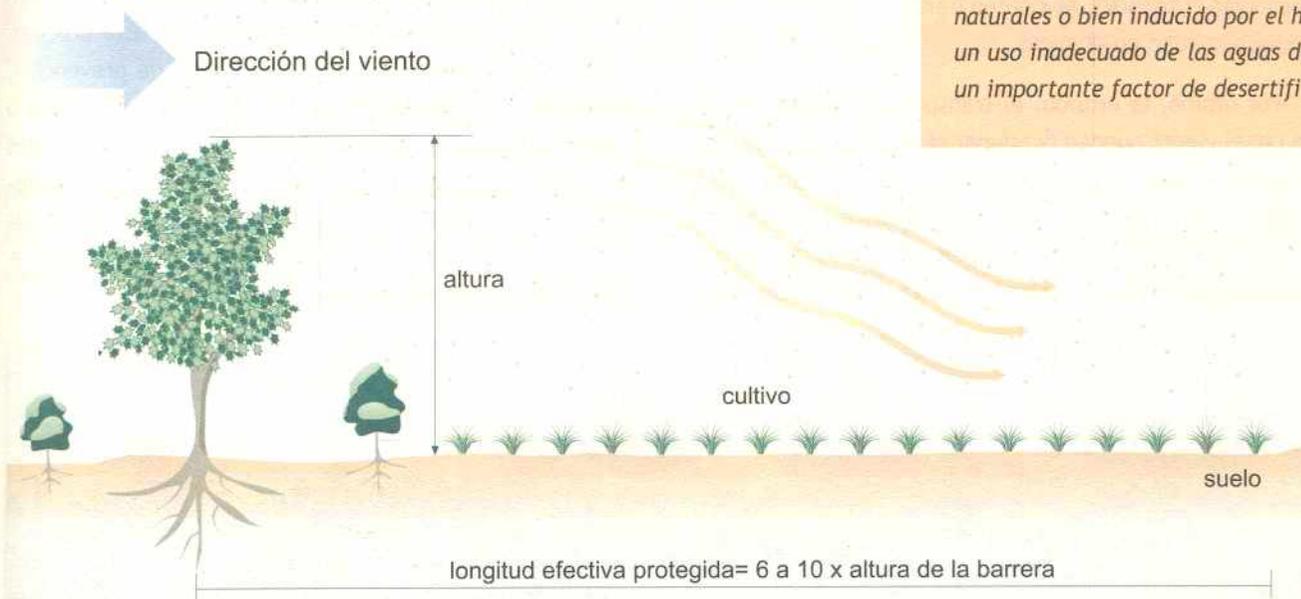


Fig.33. Relación entre la altura del cortavientos y la longitud efectiva del área protegida contra la erosión del viento.

Los efectos más notables de la erosión por el viento son:

-Sobre los suelos, especialmente los agrícolas: *pérdidas de materiales finos* con las correlativas alteraciones de la textura, disminución de la retención de humedad, aumento de la erosionabilidad y disminución de la productividad. *Deseccación del suelo* con la consiguiente pérdida de cubierta vegetal y aumento de la erosionabilidad. *Pérdida de nutrientes*, lo que acarrea la disminución de materia orgánica y de productividad. *Depósito de sales* transportadas por el viento, lo que provoca la ► **salinización** del suelo y una alteración de la textura.

-*Efectos sobre los cultivos.* El impacto de la *deflación* y *abrasión*, que remueve las semillas y, si han nacido las plántulas, puede desenraizar, arrancar, herir, arrasar, romper o destruir arbustos y árboles. La *deposición de materiales* ocasiona el enterramiento de semillas y plántulas, el ● **aterramiento** de cultivos, la formación de costras. Además, la erosión y los depósitos eólicos pueden transmitir patologías a los cultivos. Medidas eficaces para reducir la erosión eólica son el dejar y extender, en el suelo, los residuos vegetales de los cultivos al levantar la cosecha, y construir cortavientos, es decir, barreras vivas con árboles o arbustos que obstaculicen el viento. Se estima que la

superficie protegida por las barreras cortavientos es de entre seis y quince veces la altura de la barrera (Fig. 33). Estas técnicas, además de reducir la erosión por el viento y conservar el recurso, favorecen e incrementan el contenido de humedad en el suelo.

-Por último, la erosión, el transporte y la sedimentación por el viento pueden ocasionar el sepultamiento de las áreas de cultivo y de poblados enteros, como ocurre en el sur de Marruecos, Argelia, Mauritania y otros países saharianos (Fig. 34). También produce las tormentas de polvo y arena que pueden ser arrastradas por la lluvia y ocasionan

las *lluvias de barro*, con importantes consecuencias sobre cultivos, ecosistemas y población.

Conocer bien los mecanismos de la erosión eólica, evaluar las tasas de pérdida de suelo debidas a este proceso, desarrollar y aplicar programas específicos de prevención, mitigación y rehabilitación en los territorios afectados o que potencialmente puedan estarlo, son tareas urgentes para que el deterioro que ocasiona la erosión eólica no disminuya o destruya el potencial biológico de la tierra de las regiones secas ni produzca la degradación de las condiciones de vida y la expansión de los desiertos.

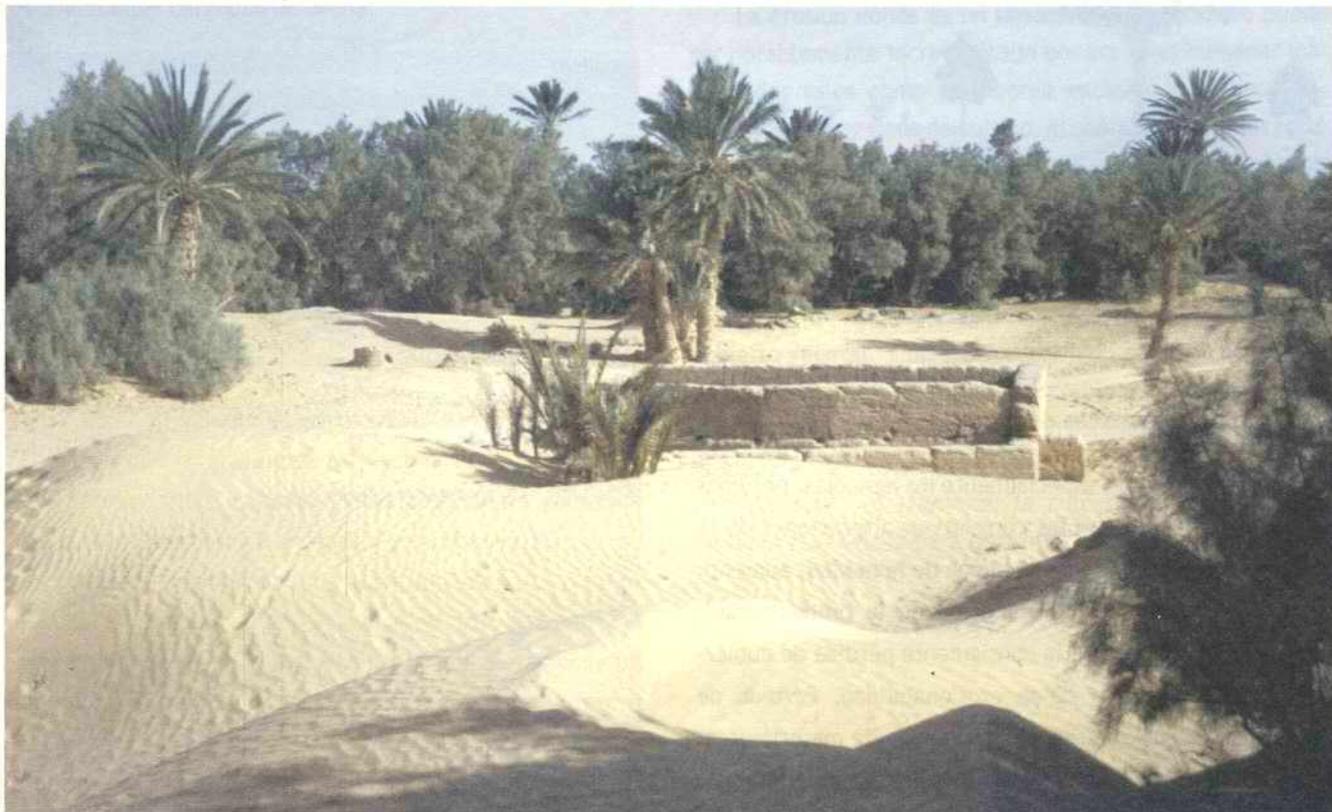


Fig.34. Invasión de un oasis por la arena. Este proceso implacable es bastante común en los países saharianos y algunos periféricos. Constituye uno de los ejemplos más dramáticos de la desertificación. Sidi Makhlouf. Sur de Túnez.

3 El ciclo del agua, ciclo hidrológico o ciclo hidrogeomorfológico

El clima es el principal agente activo de la erosión, parámetro dinámico de los sistemas ambientales, y la erosión parte de la dinámica evolutiva del planeta. Su consideración en los estudios de erosión es básica y se justifica

por muchas razones, entre otras, por ser el factor determinante en el modelado del paisaje, por su significado en los procesos hidrológicos y geomorfológicos y por su importancia en los fenómenos químicos, biológicos y bioquímicos.

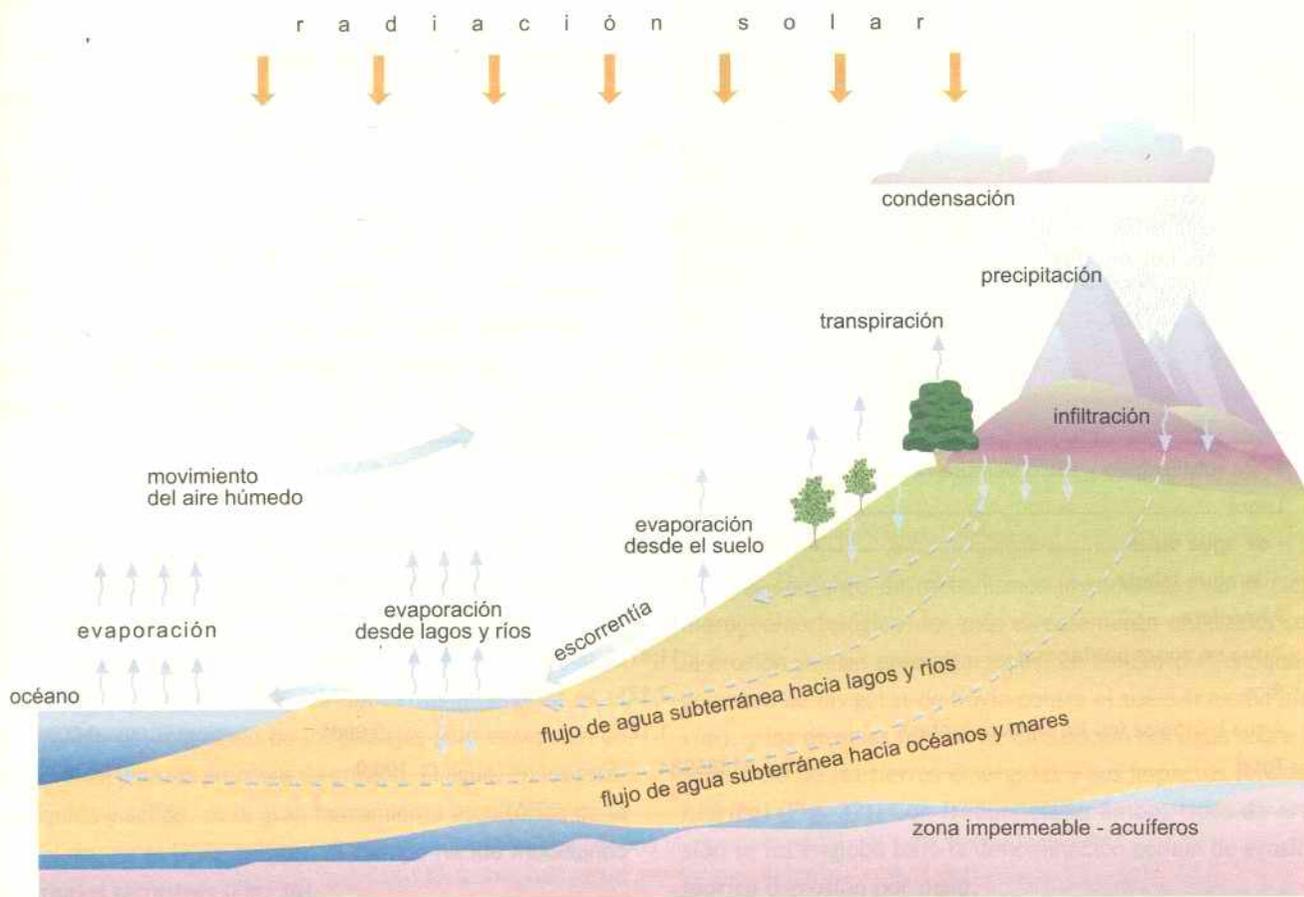


Fig. 35.- Ciclo del agua o ciclo hidrogeomorfológico

De todas las variables climáticas, son las precipitaciones y las correlativas escorrentías las que liberan mayor energía en los procesos de erosión. El agua se desplaza en un *continuum* atmósfera-superficie terrestre y superficie terrestre-atmósfera, franqueando umbrales y discontinuidades en función de los niveles de energía potencial de cada sistema, variables en el tiempo. Es el clima el que determina las grandes diferencias de erosión entre unas regiones y otras, a través del efecto directo del régimen de precipitaciones y del efecto indirecto sobre la cubierta vegetal.

Un ciclo climático básico en todos los procesos que modelan los paisajes es el conocido como *ciclo del agua*, *ciclo hidrológico* o *ciclo hidrogeomorfológico* que expresa la circulación del agua y sus efectos en la superficie de la Tierra. En concreto, es el fenómeno global de la naturaleza en el que el agua de la superficie terrestre atraviesa sucesivas etapas, al pasar de la atmósfera a la superficie terrestre y de ésta de nuevo a la atmósfera (Fig. 35). El ciclo es el responsable de un gran número de procesos hidrológicos, geomorfológicos y biológicos, además de tener una importancia vital para el hombre,

Distribución global del agua en el planeta Tierra

	Volumen (1000 km ³)	% del total	% de agua del agua dulce
Océanos y mares	1338000	96,5	—
Casquetes polares, glaciares y nieves permanentes	24064	1,74	68,7
Aguas subterráneas	23400	1,70	—
dulces	(10530)	(0,76)	30,1
salinas	(12870)	(0,94)	—
Humedad en el suelo	16,5	0,001	0,05
Hielo subterráneo y suelo siempre helado	300	0,022	0,86
Lagos	176,4	0,013	—
de agua dulce	(91,0)	(0,007)	0,26
de agua salada.....	(85,4)	(0,006)	—
Atmósfera	12,9	0,001	0,04
Agua en zonas pantanosas	11,47	0,0008	0,03
Ríos	2,12	0,0002	0,006
Agua biológica (en los seres vivos)	1,12	0,0001	0,003
Total	1385984	100,0	100,0

Fuente: Gleick, P. H., 1996: Water resources. In *Encyclopedia of Climate and Weather*. Ed. S. H. Schneider, Oxford University Press, Nueva York, vol. 2: 817-823

especialmente en lo que se refiere a los recursos renovables de agua dulce.

El volumen de agua contenida en toda la Tierra es de alrededor de 1,39 billones de km^3 ; de este vasto volumen, el 96,5 % se halla en los océanos y mares. Aproximadamente el 1,7 % es almacenado en los polos, glaciares y nieves permanentes, y otro 1,7 % se halla en los ríos, lagos, aguas subterráneas y en el suelo. Finalmente, el 0,1 % se halla en forma de vapor de agua en la atmósfera. La ❖ tabla de la página anterior recoge una estimación de la distribución global del agua.

La estimación de las aguas subterráneas es particularmente dificultosa. Los datos varían ampliamente según las fuentes, aunque el valor que se ofrece en esta tabla es el más ampliamente aceptado. Según las cifras indicadas, las aguas subterráneas constituyen, aproximadamente, el 30 % del agua dulce, mientras que el hielo (incluyendo los casquetes polares, glaciares, nieves eternas, hielo subterráneo y *permafrost* -suelo siempre helado) representa alrededor del 70 %. Otras estimaciones dan para las aguas subterráneas y hielo los valores del 22 % y 78 %, respectivamente.

Lo cierto es que el movimiento de este agua global implica una amplia serie de procesos, entre los que destacan: evaporación, condensación, precipitación, interceptación, transpiración, circulación, erosión, transporte, acumulación, infiltración y de nuevo evaporación y precipitación. Tan sólo el 1,7 % de agua que se halla en estado líquido en la superficie, o próximo a ella, de las tierras emergidas es el responsable del modelado de los paisajes (con excepción de los litorales) y de los procesos de erosión. El agua, en los estados líquido y sólido, es la gran herramienta escultórica de la naturaleza, es el lápiz que con el tiempo ha ido modelando los paisajes terrestres (Fig. 36).

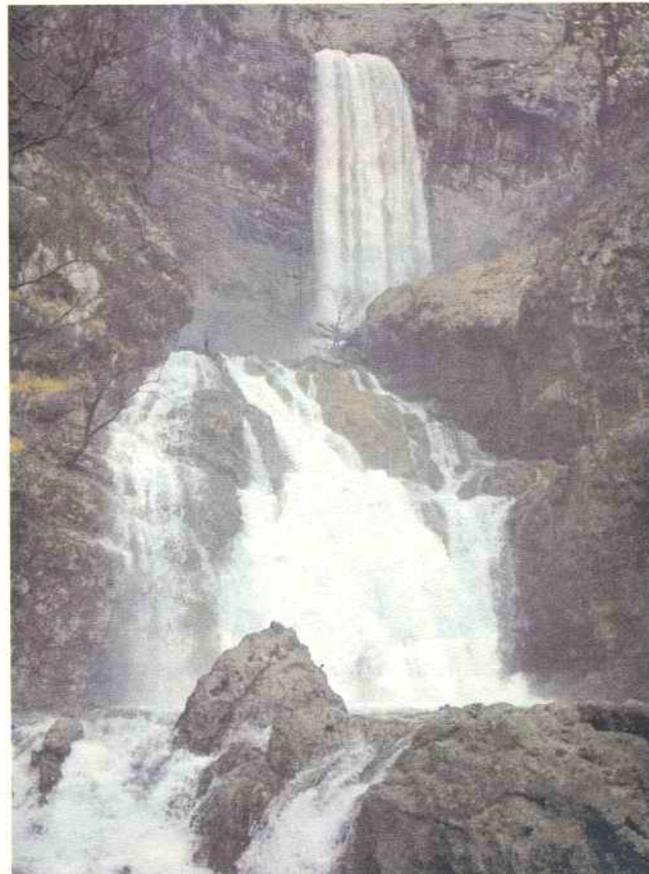


Fig.36.- El agua es la principal herramienta escultórica de la naturaleza que modela los paisajes. (Nacimiento del río Mundo, conocido como *Los Chorros*, Albacete).

Del conjunto de mecanismos involucrados en el ciclo hidromorfológico, los más directamente enlazados con la erosión son las precipitaciones, en concreto el choque o golpeteo de las gotas de lluvia contra el suelo (*erosión pluvial*), y las diversas formas de circulación del agua sobre la superficie de las tierras emergidas y sus impactos (*erosión hídrica*) (Fig. 37). Con frecuencia, a ambos tipos de erosión se los engloba bajo la denominación común de *erosión hídrica* o *erosión por agua*.

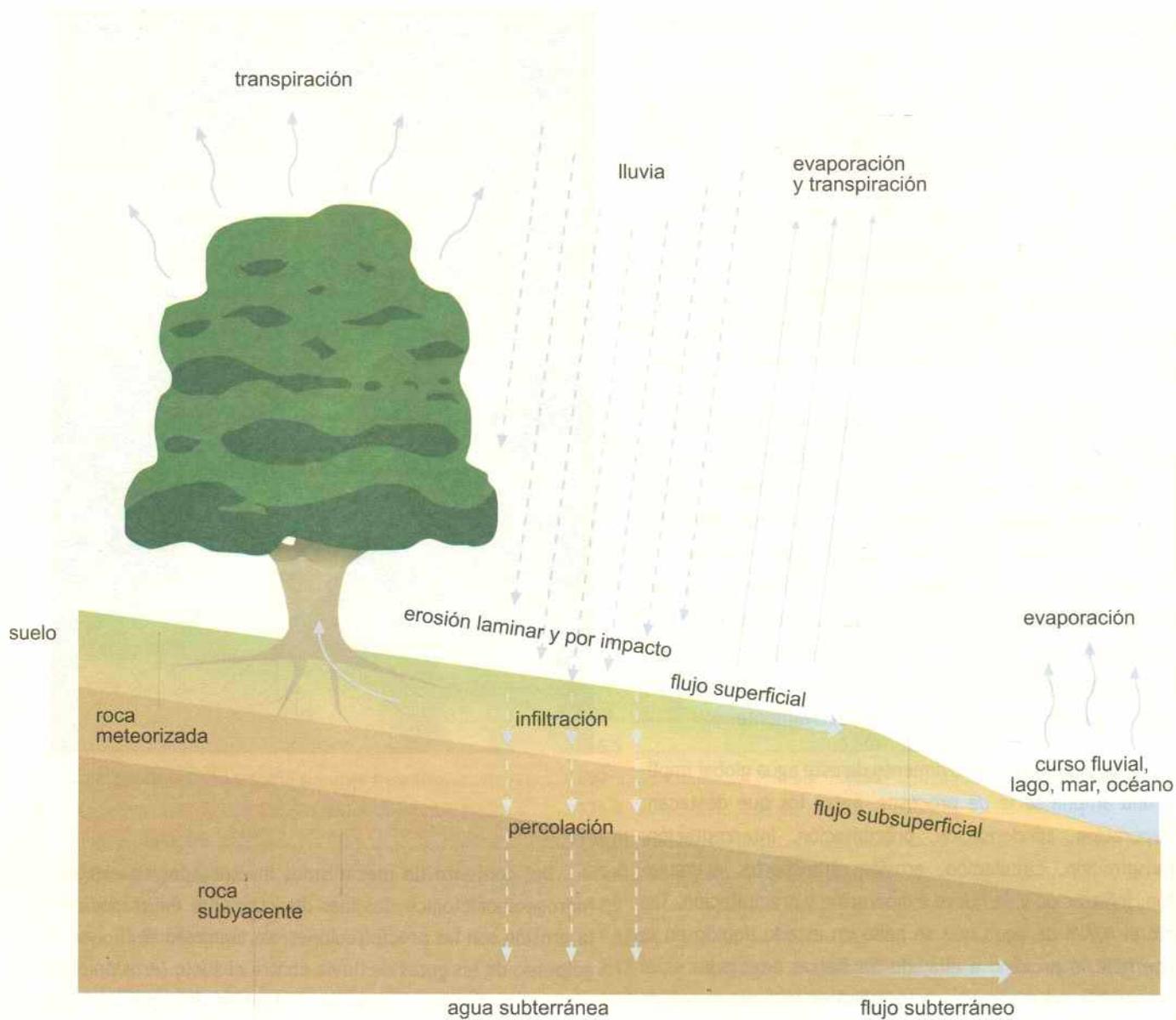


Fig.37.- Principales movimientos involucrados en el ciclo hidroegeomorfológico y su repercusión en los flujos hídricos y erosión del suelo.

4

La erosión del suelo por el agua: un problema endémico

La erosión del suelo por el agua es un fenómeno complejo de degradación por el que los horizontes más superficiales son arrancados y desplazados. El proceso implica la rotura de los agregados de partículas sólidas y su transporte. Los fenómenos de erosión del suelo por la lluvia y los flujos de agua que genera (*escorrentías*) han sido y siguen siendo considerados como problemas, en particular en aquellas regiones donde el vigor del relieve, la agresividad de las lluvias y la secular deforestación de laderas, con frecuencia al límite de las posibilidades agrícolas, presentan condiciones particularmente favorables para el desencadenamiento de crisis erosivas más o menos agudas.

En efecto, las grandes fluctuaciones de la erosión han estado y siguen estando en relación con la extensión de la deforestación y la roturación de tierras para el cultivo durante períodos de prosperidad y de presión demográfica para satisfacer las crecientes necesidades, como ocurrió durante el siglo XVIII, por ejemplo, y también con la regresión y abandono de cultivos y prácticas de conservación de suelos (períodos de guerras, epidemias, desvalorización de la agricultura de secano, etc). Bajo condiciones ambientales favorables, el abandono de las tierras cultivadas en fuertes pendientes ha permitido una importante progresión del matorral, de las praderas y de los bosques.

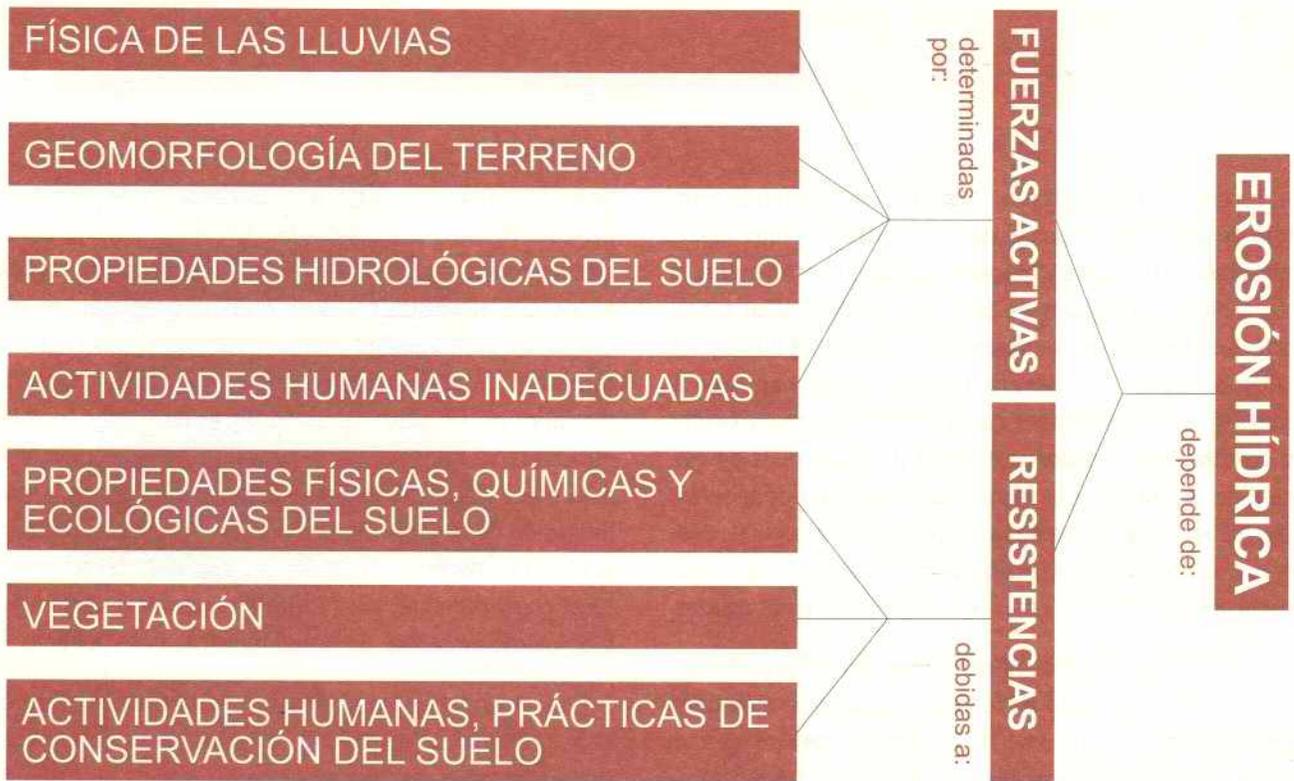
Desde hace unas cuatro décadas, otros fenómenos han originado una nueva crisis erosiva con fuerte incidencia en la degradación de los territorios afectados: la frecuencia e intensidad de los incendios forestales, determinadas prác-

ticas de cultivo incorrectas, el uso abusivo de maquinaria agrícola pesada, las transformaciones del paisaje por las vías de comunicación y la expansión del fenómeno urbanizador, que altera las redes de drenaje naturales, en unas ocasiones impermeabilizando importantes superficies de terreno y, en otras ocasiones, concentrando los importantes flujos de agua que se generan tras las lluvias copiosas, etc. En muchos países, la percepción de esta nueva crisis está en el origen de las campañas de información y sensibilización de los agricultores y de las actuaciones de lucha contra la erosión. Iniciativas propiciadas, tanto a nivel local como regional, por los departamentos de agricultura y de medio ambiente de las administraciones publicas.

La magnitud y la incidencia que la erosión tiene por todo el mundo, la diversidad de casos que es posible identificar, permiten reconocer y resaltar, por un lado, que los problemas son provocados por actores diferentes, y por otro, que la erosión de los suelos encierra, de hecho, un conjunto de procesos que no son idénticos en todas partes.

La erosión de los suelos por el agua produce la desagregación y el transporte de las partículas bajo la acción combinada de la lluvia y la fracción de agua que escurre por la superficie del terreno o cerca de ella. La cantidad de suelo que es exportado fuera del sistema que se considere (puede ser una parcela de cultivo, una ladera, una cuenca hidrológica, etc.) depende de las fuerzas que actúen sobre el suelo a través de los agentes y de las resistencias que el suelo sea capaz de oponer (Fig. 38).

Fig.38.- Principales factores que afectan a la erosión por agua.



La erosión y degradación del suelo son mecanismos en los que intervienen muchos factores; sin embargo, la eliminación de la cubierta vegetal desempeña una función esencial, desencadenante de los procesos de degradación física y química del suelo; además, lo fragiliza ante la **erosividad** de las lluvias. De estos procesos, la degradación de la estructura, y en ella, la estabilidad de los agregados, cumple una función primordial en la capacidad de retención hídrica, la erosionabilidad del suelo, la dinámica hidrológica, la formación de costras y la erosión por salpicadura.

El porcentaje de agregados estables en agua y su distribución de tamaños, junto con el grado de estabilidad de la estructura, indican el grado de resistencia de un suelo frente a los factores externos. Por otro lado, de los modos de acción de la lluvia y de los flujos de agua en superficie o cerca de ella depende el tipo y las formas de erosión. Sin embargo, si se destruyen los agregados, pero el agente de erosión no es capaz de moverlos, no se pierde suelo y las partículas pueden regenerarse posteriormente. De forma análoga, si no se alteran los agregados, por elevada que sea la capacidad

de transporte, tampoco hay pérdida de suelo (Giráldez, 1998). La *erosionabilidad* del suelo depende de la textura, la estructura, la densidad de los agregados, de sus componentes químicos, minerales y orgánicos, de la estabilidad mecánica.

La erosión pluvial y sus consecuencias

La *energía cinética* de las gotas de lluvia es el primer elemento determinante de la *erosividad* de la lluvia. Depende del diámetro y de la velocidad de las gotas y se expresa según la fórmula

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

donde

E_c = energía cinética (en julios);

m = masa (kg);

v = velocidad de caída (m/sg)

El diámetro de las gotas es muy variable, cada charparrón posee un espectro de tamaños de gotas en el que la mayoría de las más grandes se sitúan entre 2 y 3 mm de diámetro. Las lluvias excepcionales pueden producir gotas de 5 o 6 mm. Cuando las gotas oscilan entre 0,04 y 0,5 mm, se las denomina llovizna, y cuando están comprendidas entre 0,001 y 0,04 mm, se trata de nubes o de niebla.

En ausencia de viento, la velocidad de las gotas aumenta exponencialmente con su diámetro, tamaño que está estrechamente relacionado con la intensidad del cha-

parrón. La talla media aumenta con la intensidad hasta un máximo que oscila entre los 70 y los 100 mm/h; más allá de este límite, el choque de unas gotas contra otras en la caída puede reducir su tamaño antes de chocar contra el suelo.

En un aire en calma, una gota con un diámetro de 0,1 mm cae verticalmente a unos 25 cm/sg (0,9 km/h), una de 0,5 mm cae a 2 m/sg (7,2 km/h) y una de 5 mm a 9 m/sg (32,4 km/h). Sin embargo, lo más frecuente es que las gotas se precipiten formando un ángulo oblicuo por la acción del viento que las empuja lateralmente, incluso con velocidades de pocos metros por segundo.

La *intensidad de la lluvia* constituye otro aspecto fundamental de la erosión pluvial. Se designa intensidad a la cantidad de agua que cae (en mm o l/m²) por unidad de tiempo y superficie. Suele variar a lo largo del aguacero y se expresa en mm. h⁻¹. Se mide con pluviómetros de registro automático o con pluviógrafos, siendo los períodos de tiempo más utilizados los de 1, 5, 10, 15, 30 y 60 minutos. Es uno de los factores que determinan la agresividad de la lluvia.

Las intensidades de las lluvias se suelen clasificar en:

Intensidad de la lluvia y evaluación

Intensidad (en mm.h ⁻¹)	Evaluación
< 2	suave
2 - 20	moderada
20 - 50	fuerte
50 - 90	muy fuerte
> 90	torrencial

Evaluaciones de campo realizadas con aparatos registradores en gran número de tormentas muestran que cuanto mayor es la intensidad de una lluvia, menor es su duración. También que las relaciones intensidad-área afectada demuestran que al aumentar la superficie que registra una lluvia, disminuye su intensidad.

Es importante distinguir la *intensidad instantánea* (por ejemplo, se dice que una lluvia cae con intensidades de 100 mm/hora) y el tiempo durante el cual se mantiene esta intensidad (por ejemplo, la intensidad precedente se ha manteni-

do durante 15 minutos). En una tormenta o aguacero, es necesario, pues, diferenciar tres tipos de intensidades: la *intensidad global* (por ejemplo, 20 mm), la *intensidad instantánea* en un momento dado (p. ej., 60 mm) y la *intensidad máxima* (p. ej., 150 mm). Normalmente, las lluvias de alta intensidad son muy localizadas, lo que dificulta la generalización de las interpretaciones a territorios o cuencas extensas.

Algunos ejemplos de lluvias copiosas en las regiones mediterráneas españolas son:

Lluvias diluvianas en la vertiente mediterránea española

Estación	Total (mm)	Tiempo (horas)	Mes y Año
Barcelona (Cataluña)	250	24	Nov.1962
Figueres (Cataluña)	440	24	Nov.1971
Tarragona (Cataluña)	280	24	Oct. 1930
Valcebollera (Cataluña)	404	24	Oct.1982
Barcelona	187	24	Sep.1953
Lluc (Baleares)	350	24	Marz.1984
Soller (Baleares)	329	24	Oct. 1959
Son Torrella (Baleares)	504	24	Oct. 1978
Llucmajor (Baleares)	150	7	Sep. 2001
Valencia	263	24	Nov. 1956
Oliva (Valencia)	817	24	Nov. 1987
Pobla del Duc (Valencia)	790	24	Nov. 1987
Sumacarcer (Valencia)	520	24	Nov. 1987
Cap de S. Antoni (Alicante)	410	24	Oct. 1957
Jávea (Alicante)	878	24	Oct. 1957
Alicante	270	24	Sep. 1997
Murcia	330	24	Nov. 1987
Abarán (Murcia)	230	5	Sep.1989
Mula (Murcia)	194	10	Oct. 1986
San Javier (Murcia)	304	22	Nov. 1987
Pozo Estrecho (Murcia)	160	24	Oct. 2000
Cartagena (Murcia)	76	1	Oct. 2000
Purchena (Almería)	233	24	Oct.1973
Zurgena (Almería)	600	5	Oct.1973

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología

El impacto erosivo de los aguaceros torrenciales, considerando como tales aquellos que registran un máximo diario superior a 75 mm., radica en la elevada intensidad horaria de las lluvias. En todos los eventos recogidos en la tabla, se registraron intensidades máximas entre 50 y 100 mm/hora, con máximos instantáneos que rebasaron el umbral de los 300 mm/hora. Lluvias mediterráneas con tales intensidades son capaces de dismantelar decenas de toneladas por km² de suelo en pocas horas, sobre todo cuando éste, después de un largo y seco verano, se halla bajo una fuerte tensión hídrica y dispone de una escasa vegetación protectora en amplias superficies.

En otros ambientes climáticos se registran intensidades incluso más elevadas que en los mediterráneas. Las lluvias excepcionales producidas por los ciclones tropicales, los huracanes y los tifones pueden alcanzar y sobrepasar los 150 mm/h durante 10 minutos; el récord actualmente conocido es el alcanzado por un huracán que en la isla de Guadalupe, en noviembre de 1970, precipitó lluvias con una intensidad de 38 mm en 1 minuto, es decir, una intensidad máxima de 2280 mm/hora.

Existe una estrecha relación entre la energía cinética y la intensidad de cada aguacero. Entre otros, Wischmeier (1958) definió, empíricamente, un índice R de agresividad de la lluvia, dándole la siguiente expresión:

$$R = E_c \times I_{30}$$

donde,

$$E_c = 1214 \times 890 \log I \text{ (t/km}^2\text{/mm)}$$

esta expresión de la energía cinética fue obtenida a partir de los resultados de la pérdida de suelo, por erosión, en parcelas experimentales.

I_{30} = intensidad de la lluvia en 30 minutos. Este índice fue propuesto por Wischmeier (1958) y Wischmeier y Smith (1978) al estudiar la correlación entre la intensidad de las precipitaciones y la erosión en un suelo bajo unas determinadas condiciones. Hallaron que los valores más elevados de erosión correspondían con períodos de precipitación máximos próximos a los 40 minutos. Ante la dificultad de tratar con estos imprecisos intervalos de tiempo, adoptaron como intervalo-tipo el de 30 minutos, que se ha generalizado como I_{30} .

Este índice, de difusión mundial, suministra una buena idea de la capacidad de erosionar que tienen las lluvias. La erosión por impacto o golpeteo constituye un importante mecanismo en el dismantelamiento de los suelos.

La capacidad de los aguaceros para erosionar

Para calcular la energía liberada por cada aguacero para erosionar, se divide el aguacero de la tormenta en incrementos de tiempo de intensidad uniforme. Para cada intervalo de tiempo, en el que se conoce la intensidad de la lluvia (I, en mm/h), se calcula la energía cinética específica, mediante la expresión: $E_c = 1214 \times 890 \log I$. Este valor se multiplica por la cantidad de lluvia recogida en el intervalo de tiempo (P, en mm), para obtener la energía cinética de éste. La suma de las energías cinéticas de los intervalos de tiempo considerados constituye la energía cinética total del aguacero, obteniéndose el correspondiente valor de R multiplicándola por el I_{30} respectivo. La siguiente ❖ tabla expresa la energía cinética y el índice de erosividad de un aguacero.

Cálculo de la energía cinética e índice de erosividad (R) para un aguacero

Tiempo (minutos)	Lluvia (mm)	Intensidad (mm/h)	Energía cinética parcial (J.m ⁻² .mm ⁻¹)	Energía cinética total (J.m ⁻²)
0 - 14	1,52	6,08	19,097	29,027
15 - 29	14,22	56,88	27,739	394,448
30 - 44	26,16	104,64	30,095	787,285
45 - 59	31,50	126,00	30,813	970,609
60 - 74	8,38	33,52	25,695	215,324
75 - 89	0,25	1,00	12,124	3,031
TOTAL			2.399,7	
Lluvia máxima en 30 minutos	57,66 mm			
Intensidad máxima en 30 minutos	115,32 mm/h			
Energía cinética total del aguacero	2399,7 J.m ⁻²			
Ec. I ₃₀	276733 J.m ⁻² .mm.h ⁻¹			
R	276,73 J.m ⁻¹ .cm.h ⁻¹			

Este valor ha sido obtenido con la expresión:

$$R = \frac{E \text{ (J.m}^{-2}\text{)} I_{30} \text{ (cm.h}^{-1}\text{)}}{100}$$

La energía cinética parcial es obtenida por $E = 12,12 + 8,9 \log I$, mientras que la energía cinética total es obtenida multiplicando la lluvia por la energía cinética parcial.

(Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, ICONA, 1988)

Los valores mensuales y anuales del factor R de la lluvia, de cualquier estación meteorológica, se obtienen sumando los valores de cada aguacero individual registrados en esos períodos de tiempo.

La capacidad de las lluvias para erosionar, singularmente, en suelos mal protegidos por la vegetación depende, sobre todo, de sus características y de las del suelo, especialmente de su textura y estructura.

Consecuencias de la erosión pluvial

La energía disipada por las gotas de lluvia en el momento del impacto es considerable; sus efectos, en particular, son muy importantes cuando se abaten sobre suelos desnudos o mal protegidos por la vegetación, como sucede en los ambientes climáticos áridos, semiáridos y subhúmedos. En estos ambientes se producen las mayores tasas de erosión pluvial e hídrica, pese a registrarse unos volúmenes de lluvias de débiles a moderados, si bien con unos caracteres muy singulares, entre los que la irregularidad y fuerte intensidad son los más destacables.

La energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del terreno es parcialmente disipada a través del arranque y remoción de las partículas del suelo, por golpeo o *splash* (Fig. 39) y su transporte por salpicadura y el flujo de escorrentías que se generan. El impacto de la gota contra un suelo desnudo o mal protegido afecta, en primer lugar, al horizonte superior del suelo, que es el más rico en elementos fertilizantes; la sucesión de lluvia de alta energía puede des-

mantenlo por completo, de modo que afloran en superficie los horizontes inferiores. Con el tiempo, incluso el sustrato rocoso, el *material parental*, puede aparecer en superficie. La masa de suelo erosionado por este mecanismo puede ser del orden de varias decenas de toneladas por hectárea y año.

Cuando las gotas de lluvia impactan sobre suelos en pendiente se produce un transporte de partículas, por salpicadura y acción de las escorrentías, ladera abajo (Fig. 40). Las distancias medias de transporte por simple saltación suelen ser débiles, del orden de algunos decímetros. Depende esencialmente de la masa de las partículas, de la pendiente del terreno y del ángulo de incidencia de la lluvia en relación a la superficie del suelo. En suelos en pendiente, se registra una transferencia de suelo y nutrientes de las partes altas a las partes bajas, donde se acumulan, o bien van a parar a cursos de agua que las transportan a distancias más o menos largas.

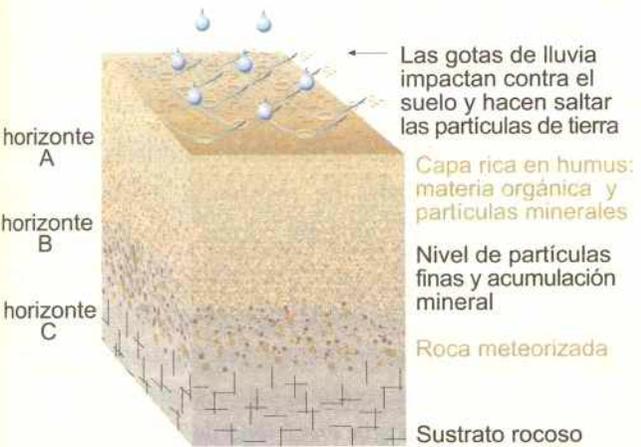
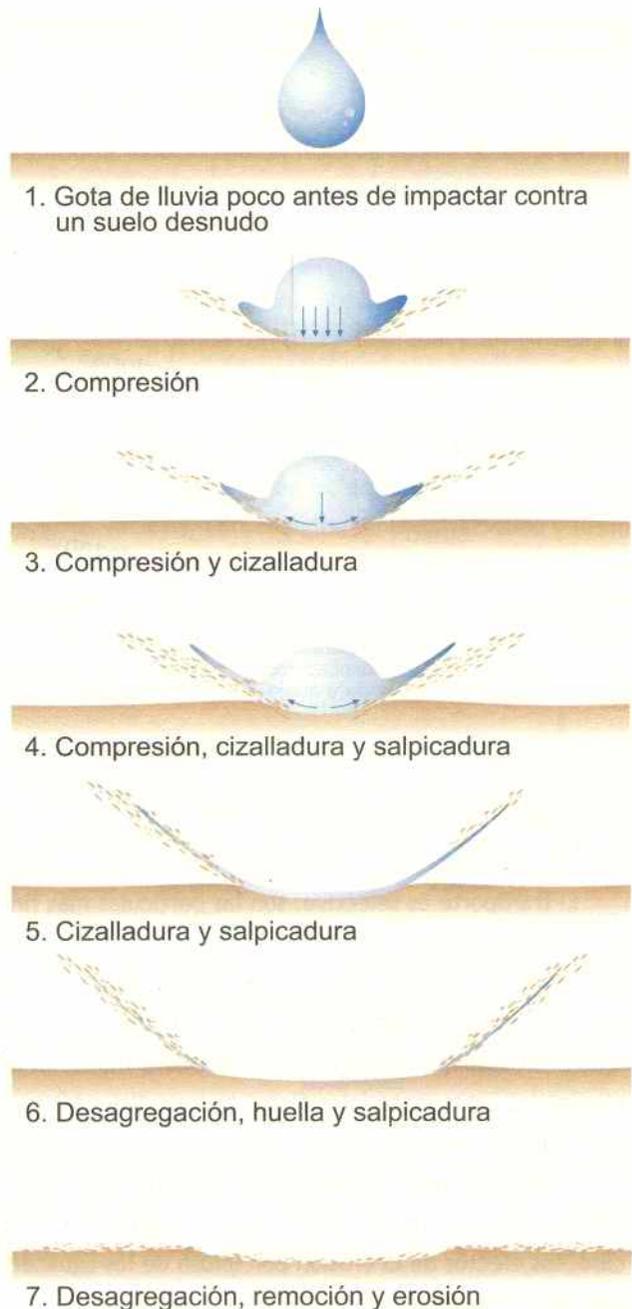


Fig. 39.- Mecanismo de impacto y salpicadura producido por la gota de lluvia sobre el suelo.



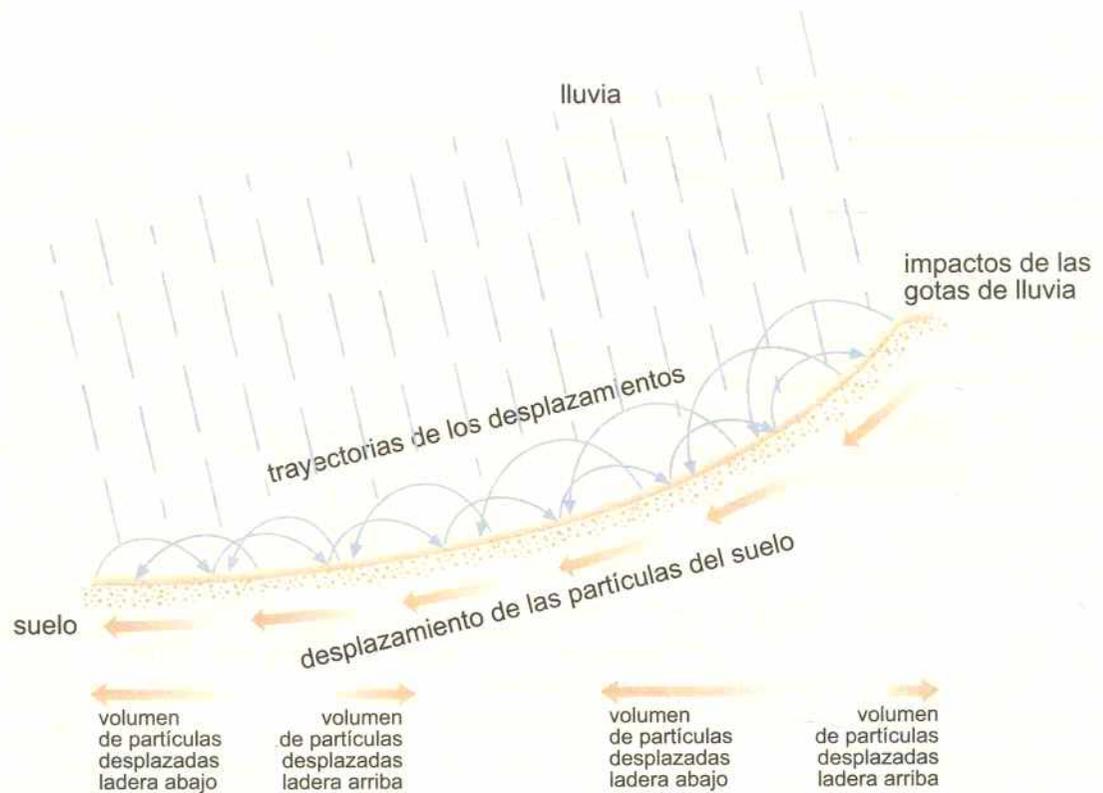


Fig. 40.- El resultado de los múltiples impactos de las gotas de lluvia sobre el suelo de una ladera en pendiente es la redistribución de las partículas con una transferencia neta del suelo ladera abajo.

El transporte es selectivo, son las partículas más finas y los microagregados los más afectados por el impacto de la lluvia y la saltación. Si sobre la superficie del suelo se organiza una lámina de agua, estas partículas son arrastradas en suspensión y evacuadas. De este modo, al ser eliminados estos materiales finos, la superficie del suelo evoluciona y progresivamente se va haciendo más resistente; incluso, con el transcurso del tiempo, puede aparecer el substrato rocoso o roca madre del suelo. En este caso, los efectos de la erosión por *splash* de los aguaceros son muy limitados.

El proceso, por tanto, actúa sobre materiales que pueden ofrecer propiedades de resistencia mecánica muy variada, desde un afloramiento rocoso consolidado a un suelo desnudo y frágil. La *erosionabilidad* del suelo se relaciona, básicamente, con la estabilidad de los agregados y las fuerzas de cohesión que los mantienen unidos, con su composición y su textura. Esta vulnerabilidad o susceptibilidad del suelo a la *erosividad* de las lluvias y a la erosión (Fig. 41) es función, a la vez que de las características físicas, del tratamiento o manejo que de él hagan los humanos. Por ello, la erosionabilidad del suelo es diná-

mica, en el sentido de que puede alterarse por un aguacero de lluvias intensas, las labores de labranza o el tipo de cultivo.

La movilización de partículas por impacto o *splash* va a estar correlacionada con un conjunto de factores que la inducen o la inhiben. En suelos con estabilidad baja sus agregados se pueden movilizar en grandes cantidades por el impacto, mientras que cubiertas de líquenes y vegetación, por un lado, y encostramientos superficiales, por otro, desempeñan una función protectora que minimiza la actividad del mecanismo. La incidencia de la erosión pluvial dependerá, pues, de la capacidad de la energía de las gotas de agua en superar o no la acción protectora de las diferentes cubiertas del suelo.

Cuando la lluvia supera el umbral de resistencia que ofrecen los elementos protectores, el impacto o *splash* de las gotas de agua de los chaparrones desencadena diversas acciones mecánicas, por la energía que libera el choque y por la dispersión y desagregación que produce el agua al penetrar, violentamente, en las partículas del suelo. Con intensidades de lluvia altas, la mayor parte de las estructuras se desagregan y los elementos gruesos son desplazados por saltos, rebotes y choques. Las partículas, en función de su tamaño (arcillas, limos, arenas finas, arenas gruesas y gravas pequeñas), de la pendiente y de la rugosidad de la superficie, son seleccionadas y redistribuidas por la superficie del terreno, originando microestructuras (pequeños ● *pedestales de erosión* coronados por pequeños cantos, gravas o matas aisladas, pequeñas oquedades, empedrados de gravas, etc.) (Fig. 42) y compactaciones que van a tener una notable influencia en las escorrentías generadas por los aguaceros siguientes: son las *costras laminares* o *costras de splash*.

Costras laminares en superficie

Una costra laminar o sedimentaria es la respuesta al transporte inducido por el flujo de agua y la deposición de partículas individuales y microagregados desde áreas topográficas elevadas a otras más bajas. En función de la intensidad de la lluvia, de la energía disipada y de la granulometría de las partículas movilizadas, una fracción importante (las partículas finas) es liberada y arrastrada, en profundidad, a través de grietas, poros y vacíos estructurales. Con este mecanismo, la superficie del suelo pasa de un estado fragmentario y poroso a uno más continuo y más compacto. Se va produciendo, entonces, el relleno de los espacios vacíos y, consecuentemente, el bloqueo y disminución de la porosidad, lo que puede acabar con la interrupción temporal de la infiltración y el incremento correlativo de los flujos hídricos superficiales. El relleno y



Fig. 41.- La erosión pluvial es el resultado de la interacción entre dos factores: lluvias de alta energía para dismantelar materiales de la superficie terrestre (erosividad) y materiales más o menos vulnerables (erosionabilidad). En el caso de los suelos, el uso que de ellos se haga puede disminuir o incrementar esa sensibilidad.

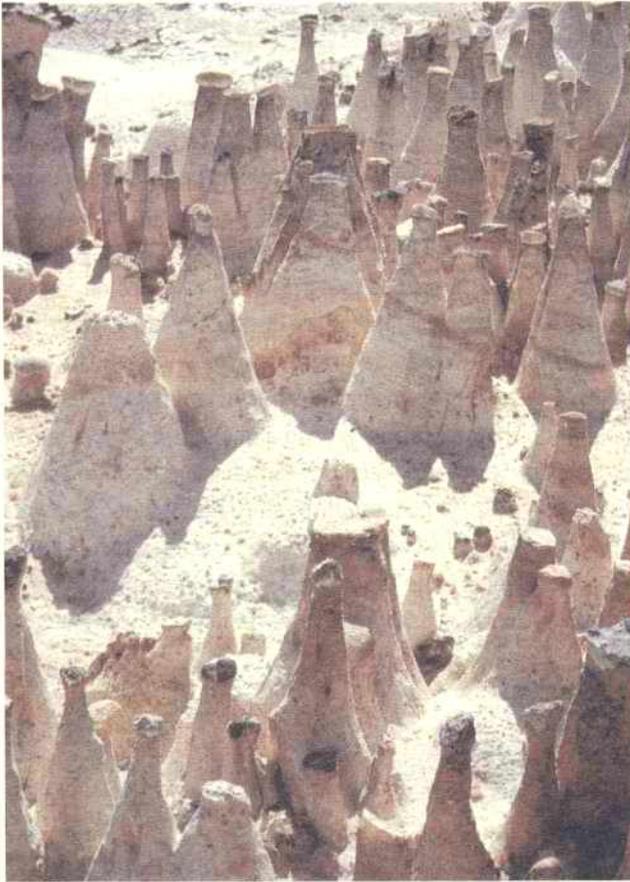


Fig. 42. - Microestructuras: pequeños pedestales de erosión, protegidos por pequeñas piedras que los recubren, originados por el impacto o splash de la lluvia. (Luepa, Sabana Venezolana)

soldadura de los huecos origina una barrera, una capa laminar superficial o costra de apelmazamiento conocida también como *costra de splash* (Fig. 43), que se individualiza del resto del perfil del suelo e influye apreciablemente en la relación infiltración/escorrentías con claro saldo a favor de estas últimas.

La costra de *splash* disminuye la rugosidad del suelo y lo compacta en varios milímetros en superficie, reduciendo así, considerablemente, la velocidad de infiltración del agua e incrementando la producción de flujos hídricos. La

disminución de la capacidad de retención de agua por los suelos y los bajos valores de infiltrabilidad que origina la costra de *splash* explican la aparición de escorrentías superficiales con lluvias de baja intensidad sin haberse saturado el suelo en profundidad.

En general, las costras sedimentarias proporcionan información válida que puede ser utilizada en diferentes campos, entre los que cabe destacar la predicción de la capacidad de infiltración, diagnóstico de la degradación del suelo y la adopción de técnicas para el manejo del control de la erosión.

Otro tipo de encostramientos de aspecto similar a los de *splash*, pero de génesis bien distinta, es el que se origina bajo condiciones climáticas de mayor o menor aridez, con lluvias escasas, fuerte radiación solar y elevada **● evapotranspiración**. En estas situaciones, el agua retenida en el suelo cargada de sales (sulfatos, carbonatos...) es bombeada hacia la superficie por la evaporación. Las sales disueltas van, entonces, a precipitar en superficie o cerca de ella conforme disminuye la cantidad de humedad, originando, por acumulaciones sucesivas, encostramientos laminares de espesor milimétrico que actúan como agentes cementantes de grietas y partículas superficiales. Estas costras pueden ejercer una acción protectora del suelo; sin embargo, su fragilidad es muy alta y pueden destruirse por el efecto combinado del impacto de las gotas de lluvia y de la acción química de disolución del agua de lluvia.

Bajo ciertas condiciones, la superficie de suelo recubierta por estos tipos de costra se hace más resistente a la erosión pluvial. Sin embargo, el exceso de escorrentías

que genera provoca un aumento de la erosión en otros lugares menos resistentes.

En suelos cultivados, los encostramientos laminares en superficie pueden ser destruidos fácilmente por las labores agrícolas y ser fragmentados por los efectos de la desecación (Fig. 44) o por la actividad de la fauna del suelo.

La erosión hídrica

La eficacia de la lluvia en los procesos de erosión está ligada a la acción por impacto de las gotas de agua y a la desagregación de las partículas del suelo que produce, pero sobre todo a la fracción de agua que escapa a la evaporación y a la infiltración, es decir, a las escorrentías.

La degradación del suelo debida básicamente a los procesos de erosión por el agua que discurre por la superficie del suelo constituye uno de los problemas ambientales más serios a los que se enfrenta gran parte de la humanidad, especialmente las poblaciones de aquellas regiones de la Tierra más vulnerables a este proceso. El *Atlas del mundo de la desertificación*, elaborado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 1992), expresa que el deterioro de las tierras áridas se debe, casi en un 50 %, a procesos de erosión hídrica (Fig.45). Como puede observarse, son las regiones tropicales y las semiáridas las que registran las mayores tasas de pérdida de suelo por erosión del agua.

En las primeras, la alta agresividad de las lluvias y su acusada estacionalidad, la intensa deforestación y la vulnerabilidad de la mayor parte de los suelos justifican el alto

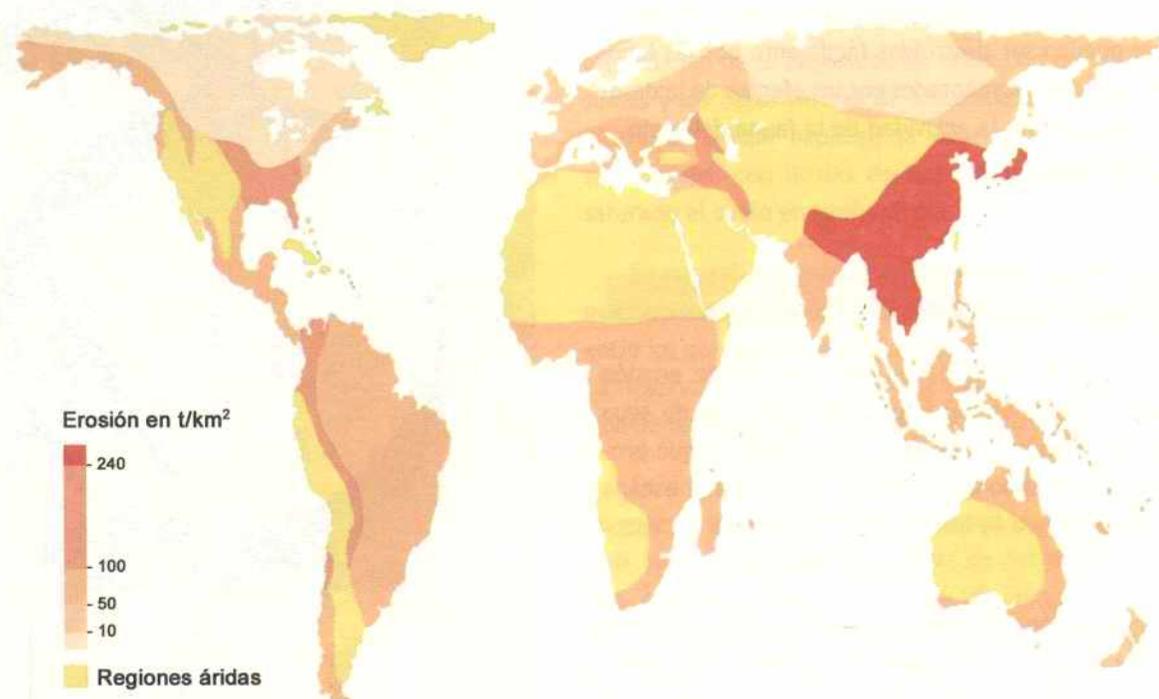


Fig. 43 - Costra laminar o costra de splash formada en la superficie del suelo y que dificulta la infiltración del agua



Fig. 44 - Fragmentación de la costra de splash por desecación

Fig.45.- Distribución espacial de la erosión hídrica en el mundo.



● **riesgo de erosión.** Las regiones semiáridas registran, también, unas lluvias moderadas, pero con frecuente alta intensidad y capacidad para erosionar por precipitarse sobre unos suelos desnudos o mal protegidos por la vegetación. La Fig. 46 relaciona la precipitación y la producción de sedimentos producidos por la erosión que van a ser evacuados por los cursos fluviales. El máximo potencial de erosión se produce con lluvias en torno a los 300 mm anuales (aridez bastante acusada); a mayores precipitaciones, más abundante debe ser la vegetación para proteger los suelos frente a la erosión. Por debajo del umbral de los 300 mm de lluvia efectiva, la erosión por agua va siendo cada vez menor, a la vez que la erosión eólica va siendo dominante.

La erosión es, sin embargo, un problema antiguo acelerado en diversas etapas históricas de la humanidad por crisis climáticas (períodos de sequías y de lluvias copiosas e intensas) y por un uso deficiente y abusivo de los recursos vitales, es decir, suelo, agua y vegetación.

La erosión contribuyó al derrumbe de civilizaciones

Parece ser que hay dos formas en que los humanos son capaces de aniquilar a una civilización: una es la guerra, y la

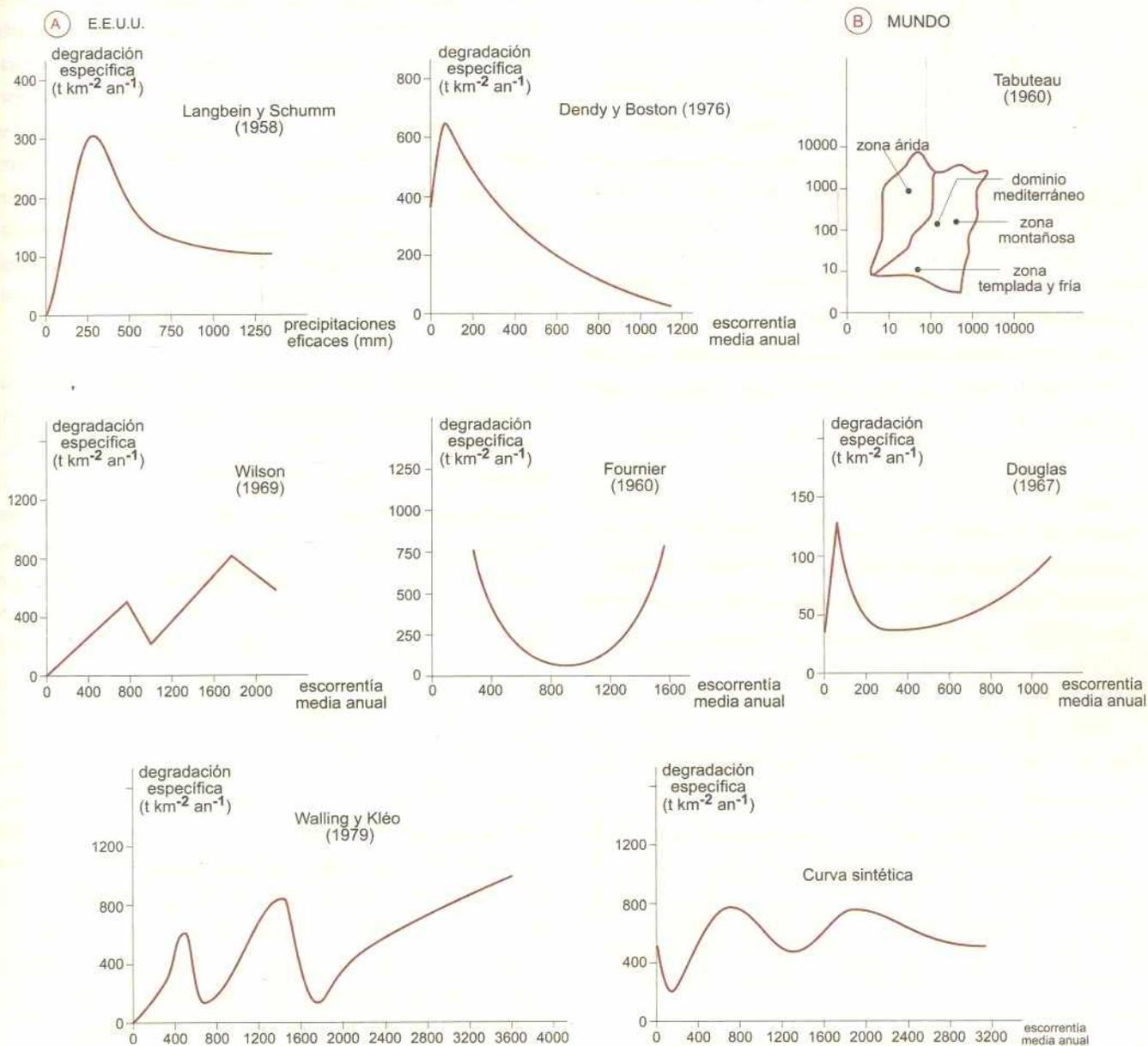


Fig. 46.- Relaciones entre las precipitaciones medias anuales y la degradación específica. Interpretaciones según diferentes autores (Cook y otros, 1993).

otra, la erosión del suelo. De ambas, la pérdida de suelo es la más insidiosa y fatalmente destructiva (Shepherd, 1947). En los albores de la humanidad, la influencia de las comunidades humanas preagrícolas en el medio natural tuvo que ser muy débil. Sus modos de vida y subsistencia se adaptarían a las condiciones del clima, relieve, suelos y agua de los diferentes territorios. De hecho, los grupos humanos formarían parte de unos ecosistemas naturales que por sus actividades recolectoras y de caza apenas serían alterados, salvo cuando utilizaban el fuego. Por otro lado, la escasa densidad de población, reforzada por el nomadismo y las migraciones, aseguraba el mantenimiento de una relación entre población y recursos más que suficiente para la supervivencia y continuidad de los grupos humanos.

La primera gran transición en la historia de la ecología humana fue la adopción de la agricultura y la ganadería como procedimientos dominantes de obtención de alimentos (Sempere y Riechmann, 2000). Fue el paso de unos sistemas naturales autorregulados a unos sistemas regulados por los seres humanos (● **agrosistemas**). La transición a estas dos actividades fue precedida por la selección de plantas y la domesticación de animales con la finalidad de obtener variedades más productivas y nutritivas, y aprovechar a los animales para su utilización y provecho. La agricultura impuso un sedentarismo más o menos estable, ya que la agricultura itinerante no fijaba a la población en campos que se trabajarán y cultivarán permanentemente. En cualquier caso, ambos tipos de agricultura, la itinerante y la sedentaria, como ciclo vital de la planta cultivada, implicaron una nueva relación de los humanos con el medio ambiente.

El incremento de la población obligaba a seleccionar las plantas más útiles como fuente de alimentos y por sus propiedades medicinales, las fibras que suministraban, los colorantes que se extraían y otras utilidades. Al mismo

tiempo, para satisfacer las necesidades crecientes de las poblaciones humanas en ascenso, se desarrollarían prácticas agrícolas más intensas para producir más en la misma superficie y roturar tierras de bosque y matorral para extender los cultivos. La expansión de la agricultura se hace, pues, a expensas de los ecosistemas naturales (bosques, matorrales, estepas, humedales, etc.), fragilizándolos y ocasionando, a veces, la extinción de especies vegetales y animales, es decir, alterando la **biodiversidad**, unas ocasiones degradándola y otras preservándola como fuente de riqueza y utilidad.

El cultivo de una sola planta en un campo ocasiona que el suelo esté desprotegido de cubierta vegetal durante períodos más o menos dilatados de tiempo mientras se practican las labores agrícolas, germina y madura la semilla. La sustitución de una cubierta vegetal natural variada y permanente por otra intermitente con predominio de una o dos especies ocasiona que el suelo quede expuesto a los distintos tipos de erosión (pluvial, hídrica y eólica), notoriamente en laderas en pendiente. Para evitar estos problemas de degradación, percibidos tempranamente por las primeras culturas, éstas pusieron en práctica algunas técnicas de prevención y corrección, como el aterrazamiento de laderas, la alternancia de cultivos y la agrosilvicultura.

Las intervenciones agrarias provocaron modificaciones en los ecosistemas naturales, originando paisajes que cada vez reflejaban más la huella del hombre. La actividad agrícola permitió el aumento de la población y la aparición de aglomeraciones cada vez más grandes y, finalmente, ciudades. Este proceso dio lugar a las primeras civilizaciones, surgiendo, sobre todo, allí donde la agricultura era más productiva.

La fuerte demanda de madera y combustible que las nuevas tecnologías exigían (construcción de vivienda,

templos, metalurgia, alfarería, navegación, etc) se satisfacía a expensas del bosque. El resultado fue la deforestación de extensas áreas, lo que no sólo alteraba la diversidad biológica, sino que dejaba al suelo desnudo y expuesto a la erosión. La explotación abusiva de los bosques y de los suelos aceleró el proceso de erosión y la desertificación en muchos lugares, y cuando declinó la producción agrícola, debido a la degradación de los suelos, decayeron también las civilizaciones; a veces, éstas desaparecieron del todo.

De los cuatro requisitos fundamentales para que prosperase una civilización en la Antigüedad, suelos fértiles, abastecimiento de agua, buenos suelos en terrenos relativamente llanos dotados con precipitaciones suficientes y buen uso del suelo, probablemente el último factor era (y sigue siendo) el más importante. Abundantes testimonios indican que la erosión del suelo contribuyó al derribo de civilizaciones, al margen de los avatares militares.

En las tierras ribereñas del mar Mediterráneo, especialmente del norte de África, que fue durante siglos uno de los graneros del Imperio Romano, la deforestación y la consiguiente erosión del suelo destruyó tierras agrícolas antaño productivas e hicieron avanzar el desierto desde el sur. Las huellas en los países del Magreb son numerosas. En tiempos del Imperio Romano, su población se alimentaba con cereales y hortalizas llevadas de lo que hoy son los países de Túnez, Argelia, Israel, Palestina, Siria, Turquía y España; en la actualidad, extensas áreas de estos territorios son desérticas o semidesérticas.

En el centro de África, en las tierras del río Níger, un día floreció el imperio *Kanem-Bornu*, poblado por *haussas*, *songhay* y sus descendientes, los *zermá*. La deforestación, la erosión y el viento *harmattan* lo asolaron

todo, y allí donde florecieron bosques de cipreses, donde había inmensas praderas en las que pacían grandes rebaños, hoy se extiende un implacable desierto, el del Teneré (García Fajardo, 1999), en el corazón del Sahara. Lo que fue un lago extenso, profundo y lleno de vida, ahora es un lago residual que ve reducir su extensión constante y alarmantemente: el Chad.

Investigaciones arqueológicas sugieren que la acelerada decadencia, abandono y derrumbe de la brillante civilización maya en Guatemala (que contaba 1700 años de antigüedad) a partir del siglo X de la presente era, se produjo por razones análogas. El crecimiento demográfico de los mayas estuvo acompañado del desmonte de las laderas para roturar nuevas tierras de labranza y extender el cultivo del maíz. A mayor presión demográfica, roturación de tierras cada vez más escarpadas. Largos períodos de intensas sequías entre los años 750 y 850 y la erosión de los suelos en fuertes pendientes menoscabaron su productividad e hicieron quebrar y desaparecer la estructura económico-social. Las poblaciones no pudieron subsistir en esas zonas y emigraron a otros territorios. Hoy sólo quedan ruinas abandonadas que han sido invadidas por la selva en un proceso de recuperación del suelo (FAO, 1983). El conjunto monumental de Tikal, en El Petén, una de las mayores ciudades del imperio maya, es un magnífico ejemplo de lo que fue esta civilización. Desde hace varios siglos, sin presión demográfica, el bosque tropical ha ido recuperando el territorio y, en la actualidad, tras intensos trabajos arqueológicos de desmonte, la gran plaza y algunos de los

» Glosario

Biodiversidad. Riqueza de especies animales y vegetales de un territorio. Cuanto mayor sea, mayor estabilidad y capacidad de autorregulación tienen los ecosistemas.

templos-pirámide y otros edificios pueden ser de nuevo contemplados.

El Negev, al sur de Israel, un territorio de notable aridez desde los tiempos postwurmienses, estuvo habitado por una importante población que, desde el Neolítico, practicaba una agricultura de regadío en pequeñas parcelas. La posterior ocupación beduina practicó un pastoreo abusivo que arruinó la vegetación protectora del suelo, incrementó la aridificación y erosión del suelo y contribuyó a la conversión del territorio en desierto. El declive de algunas civilizaciones surgidas en torno a los ríos Tigris y Éufrates, en el Oriente Medio y el valle del río Indo, parece que también se produjo, entre otras causas, por la degradación del suelo por erosión.

Dos testimonios escritos, de la Antigüedad clásica, describen la importancia del fenómeno de la erosión en época tan temprana. En el siglo IV a. C., Platón describía cómo la destrucción de los bosques desencadenaba avenidas y fuertes pérdidas de suelo por erosión, que arruinaban las laderas del Ática: "Muchas y singulares avenidas se han producido... la masa del suelo que descendió vertiginosamente de los lugares altos no se extendió en terrazas... se perdió en la profundidad. Desde entonces lo que permanece es la imagen de un cuerpo que una enfermedad ha convertido en esqueleto. Una vez que todo lo que la tierra tiene de provecho y delicado ha abandonado los huesos, sólo el cuerpo descarnado permanece..." (*Critias*, 111, b-d).

Durante la época romana se registró una fuerte crisis erosiva debido, fundamentalmente, a la acción humana (deforestaciones, roturaciones de tierras en pendiente, sobrepastoreo, etc.), como lo atestiguan muchos escritores de la época. Mientras Virgilio y Plinio recomendaban las buenas prácticas agrarias, lo que hoy se conoce como

agricultura de conservación, Columela (siglo I), en una carta a su amigo Publio Livio, describía que el hombre era el principal factor de la erosión: "Con frecuencia oigo a los hombres de nuestra ciudad culpar, unas veces, a la esterilidad de los campos y, otras, a la intemperie que se nota en el aire desde mucho tiempo acá, como perjudiciales a los frutos... tales motivos tengo por seguro que están muy lejos de ser verdaderos, en vista de lo cual, pienso que todas estas cosas no han sucedido por la intemperie del aire, sino más bien por nuestra culpa".

La ciudad de Sardis, en el oeste de Turquía, mencionada en la *Iliada* de Homero como una de las siete ciudades de Asia, resistió terremotos, sequías, hambrunas, inundaciones, asedios, invasiones...; pero no resistió los efectos de la tala de los bosques de las montañas del entorno que se realizó durante el período de ocupación romana.

Varias centurias más tarde, en el código del emperador Teodosio (438 d.C), existen numerosas referencias a los *agri deserti* o zonas degradadas y abandonadas a causa de su escasa productividad o bien a consecuencia de las campañas militares. Muchos siglos después, el mismo proceso de erosión del suelo (y algunos más) que contribuyó al declive de civilizaciones del pasado, sigue vigente en la actualidad. De hecho, las fuerzas de la naturaleza siguen erosionando y configurando, continuamente, los paisajes de la Tierra; pero desde tiempos recientes, los humanos hemos alcanzado la magnitud de fuerza geológica, transformando alrededor del 40 % de la superficie del planeta a causa de las masivas deforestaciones y diversas actividades que degradan el suelo y los ecosistemas, afectando a los ciclos del agua y del carbono a través del sistema climático. Al mismo tiempo, se han abierto una serie de interrogantes respecto a cómo responderán los ecosistemas de bosque, matorral, herbazal, agrosistemas y otros a la tendencia del calentamiento global.

La erosión en el espacio y en el tiempo

Todos los sistemas que operan en la naturaleza, ya estén gobernados por principios físicos o por principios biológicos, actúan dentro de un rango de escalas tanto espaciales como temporales. Cada una de estas escalas puede ser considerada como un nivel de funcionamiento que se halla conectado, de una u otra forma, con su inmediato superior e inferior. De este modo, cualquier cambio o perturbación en el comportamiento de uno de estos niveles afectará a los que se encuentren más próximos. La trabazón entre los diferentes niveles o sistemas es, pues, dinámica.

Para entender el funcionamiento de cualquier sistema, en este caso el de erosión, se precisa conocer cómo se comporta en un rango de escalas. Este conocimiento permite establecer pautas que puedan explicar los mecanismos por los que se rige el sistema.

De lo dicho puede deducirse que siempre ha habido y habrá erosión, el proceso que tiene lugar en un **● sistema abierto** (sistema de proceso-respuesta, porque el flujo de masa o energía-proceso causa cambios en el sistema: erosión, formas, modelado) y es uno de los aspectos del constante cambio que se registra en los paisajes terrestres. El conjunto de fenómenos implicados en la erosión está caracterizado por sus discontinuidades o escalas espaciales y temporales. La erosión del suelo, como problema, varía enormemente en el espacio y en el tiempo tanto en magnitud como en el tipo. Esto se debe a las variaciones de los procesos que intervienen y a la importancia relativa de los procesos individuales.

Variaciones espaciales de la erosión

Las acciones erosivas afectan generalmente de manera más o menos uniforme a extensas áreas. Sin embargo, los procesos no intervienen sobre todo el conjunto del sector considerado en el mismo momento, sino sobre una parte del mismo. En un tiempo determinado, toda el área puede ser afectada.

Los estudios espaciales de la erosión suelen realizarse a tres escalas: ladera, cuenca y región. A escala de ladera, se destacan la forma, la longitud y la pendiente como variables importantes, ya que influyen en el tipo y eficacia de los flujos hídricos que sobre ella se desplazan, en la infiltración y en la magnitud total de la erosión. Si la fuerza de tracción de la corriente de agua excede un valor crítico de resistencia de las partículas del suelo, entonces se origina erosión.

Las acciones localizadas no afectan más que a un sector limitado; es el caso de un aguacero de tormenta, que puede producir una importante erosión por salpicadura en un área reducida o la escorrentía concentrada que se genera, capaz de producir regatos en una ladera.

A escala de cuenca hidrológica, el flujo superficial y la erosión que puede producir se generan a partir de la precipitación que se abate sobre áreas parciales, que pueden saturarse si las lluvias son abundantes o frecuentes. Estas áreas a menudo actúan como depósitos de arena cuya ubicación está controlada por las condiciones topográficas e hidrológicas. Se expanden o contraen tanto durante las estaciones del año como durante las tormentas y son, en parte, responsables del mecanismo de flujo superficial y de producción de sedimentos. En condiciones ambientales áridas y semiáridas, la erosión y el transporte de sedimentos en ladera es complejo, puesto que con frecuencia las

escorrentías se colapsan antes de llegar a la base o al curso fluvial inmediato. Todo depende de la magnitud e intensidad de los aguaceros generados por las tormentas y de las características geomorfológicas y edáficas de los relieves. No es extraño ver que algunos sectores de cuencas fluviales presentan abundantes cárcavas y que otras áreas adyacentes están prácticamente intactas.

A escala regional, la variante espacial más importante es el clima que controla tanto la vegetación natural como la erosión del suelo. Su significado radica en determinar el equilibrio hidrológico en la superficie por efectos de la precipitación y la evaporación (Thornes, 1984). Estos controles climáticos se han deducido, en su mayor parte, del aforo de sedimentos transportados por los ríos. Como ya se trató anteriormente, Langbein y Schumm (1958), apoyándose en observaciones, expresaron gráficamente la relación entre la producción de sedimentos y las precipitaciones, deduciendo que alrededor de los 300 mm de lluvia se podían registrar las mayores tasas de sedimentos y, por ende, de erosión (Fig. 46). Por debajo de este umbral, los flujos hídricos superficiales son mucho más débiles o faltan, y por encima, la importancia de la vegetación obstaculiza la erosión. En general, los modelos regionales de producción de sedimentos parecen confirmar la validez de este modelo.

Después del clima, son las características geomorfológicas de la región y el impacto de las actividades humanas los factores espaciales más importantes en la susceptibilidad a la erosión. Con frecuencia se observan contraste muy fuertes, en distancia cortas, entre áreas erosionadas y otras que no lo están, que reflejan el manejo que los humanos hacen de los recursos básicos, suelo, agua y vegetación. Estudiar la erosión necesita, pues, conocer su velocidad de acción en un área o lugar, sus ritmos de intervención y los períodos de tiempo que la caracterizan.

La escala temporal de la erosión

Con el transcurso del tiempo, tanto el tipo como la importancia de los procesos de erosión pueden variar considerablemente, conduciendo a cambios en el patrón y la magnitud de la erosión. En territorios diferentes, con condiciones morfológicas distintas y en largos períodos de tiempo, a escala geológica, pueden identificarse períodos de activa erosión y otros de calma erosiva. O dicho con otras palabras, ha habido períodos de estabilidad de los sistemas naturales con suelos bien desarrollados y protegidos por la vegetación, alternando con períodos de inestabilidad en los que se producía una disminución o desaparición de la cobertura vegetal y, consecuentemente, el suelo era fuertemente erosionado. Unos y otros períodos poseen escalas temporales, intensidades y frecuencias variables. Estas discontinuidades fueron subrayadas por Ehrart (1956) en su teoría conocida como ● *bio-rexistasia*.

Ehrart, estado de biostasia

Ehrart define un estado de ● *biostasia* como un período estable, ligado a la presencia de una cubierta vegetal eficaz en la protección del suelo (fitostasia), que se opone a un estado de ruptura geomorfológica en el que se activan los fenómenos erosivos de naturaleza mecánica. Este estado de equilibrio, biostasia o ● *edafogénesis* no excluye ni impide los ataques químicos y bioquímicos al material original.

Estas situaciones de estabilidad pueden cambiar; en este caso, una ruptura se produce, un umbral es franqueado, más allá de lo cual se establece una nueva dinámica, la de predominio de los procesos erosivos o fase de ● *rexistasia*. Esta

noción de *umbral* fue resaltada por Baulig (1950), quien hablaba del profundo significado de los valores críticos, de los umbrales a partir de los cuales un mismo fenómeno revela aspectos netamente diferentes.

Las rupturas que se registran al traspasar los umbrales revelan, en diversos grados, las modificaciones o alteraciones climáticas, vegetales, geomorfológicas y ● *antrópicas*; las segundas son, normalmente, consecuencia de las modificaciones climáticas y antrópicas. La detención brusca en el funcionamiento de un proceso indica un umbral de extinción. Un umbral de inver-

sión traduce, por el contrario, un cambio de sentido en la evolución morfodinámica.

Ciertos fenómenos modifican un área sin que sea posible volver a una situación próxima a la de partida, lo que indica la elasticidad del sistema. A veces, el retorno a una situación próxima a la anterior puede sobrevenir después de un tiempo más o menos largo. Conocer el tiempo necesario para encontrar un estado próximo a la situación inicial es a veces indispensable. Es el caso, por ejemplo, de evaluar la eficacia de las medidas de lucha contra la erosión, que normalmente

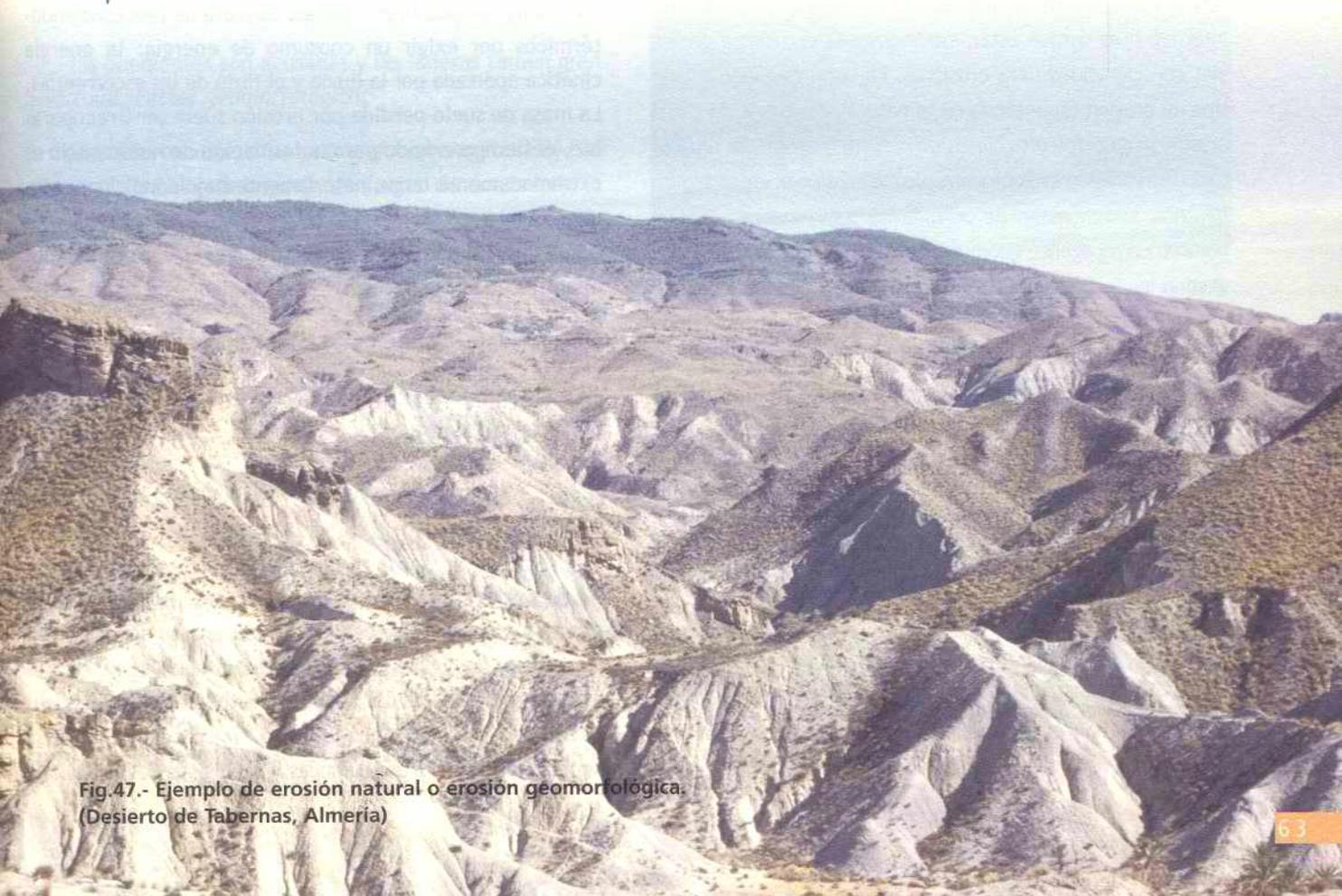


Fig.47.- Ejemplo de erosión natural o erosión geomorfológica.
(Desierto de Tabernas, Almería)

requieren un tiempo bastante dilatado, varias generaciones, antes de que el medio sea *restaurado*, si es que no se ha traspasado el umbral de la irreversibilidad, y el recurso se haya perdido para siempre.

Los procesos de erosión no evolucionan constantemente y con los mismos ritmos a través del tiempo.

Los rasgos básicos que presentan son:

-*Relativamente lentos, intermitentes, aunque recurrentes a lo largo del tiempo.* Sin embargo, pueden ser relativamente rápidos en relación con la velocidad de formación, como ocurre en los ambientes semiáridos en la actualidad. Intermitentes porque están asociados a la existencia de lluvias con capacidad para erosionar. En contraposición a este tipo de erosión espontánea en la naturaleza, conocida como *erosión geomorfológica* o *erosión natural* (Fig. 47), se ha acuñado la expresión *erosión antrópica* o *erosión acelerada* para describir el fenómeno de pérdida de suelo inducido por el hombre como agente geomorfológico (Fig. 48). Un uso y una gestión inadecuados de los recursos suelo y vegetación suele producir importantes pérdidas de suelo, desencadenando grandes alteraciones en breves períodos de tiempo. Los dominios mediterráneo y tropical están cuajados de dramáticos ejemplos de este tipo de erosión.

-Si bien los factores ligados a las condiciones ambientales naturales son el origen de la erosión en la mayor parte de los dominios bioclimáticos terrestres, los factores agro-socio-económicos son los que han acelerado el proceso. La separación entre erosión natural y erosión antrópica resulta, con frecuencia, artificial y poco consistente, ya que en una y otra tienen lugar los mismos procesos, sólo que al intervenir el ser humano como nuevo agente de erosión los procesos naturales se intensifican.

-En todo el mundo, los fenómenos de erosión *son procesos milenarios*, acelerados en los últimos decenios por un deficiente manejo del recurso suelo, componente fundamental de la naturaleza.

-*Constituyen procesos progresivos.* El dismantelamiento de los materiales más superficiales va dejando al descubierto los más profundos. En el caso de los suelos, las consecuencias son graves y sus efectos son muy notorios en períodos de tiempo cortos. Cuando el suelo es erosionado (*muere*) las piedras y el material parental afloran en superficie (*nacen*) y el terreno se hace improductivo (Fig. 49).

-*Son procesos irreversibles.* Se trata de procesos endotérmicos por exigir un consumo de energía: la energía cinética aportada por la lluvia y el flujo de las escorrentías. La masa de suelo perdida por erosión suele ser irrecuperable, el tiempo exigido para la formación de nuevo suelo es extremadamente largo, notoriamente bajo condiciones bioclimáticas poco favorables. La escala temporal de los procesos que forman suelo es de orden secular o milenario, mientras que para los erosivos es de algunos años, décadas o a lo sumo de siglos.

Factores implicados en la erosión

Los principales factores que afectan a la erosión hídrica dependen, por un lado, de unas fuerzas activas determinadas por la física de la lluvia, la geomorfología del terreno, las propiedades hidrológicas del suelo y las actividades humanas inadecuadas. Por otro dependen de resistencias debidas a las propiedades físicas, químicas y ecológicas del suelo, a la

cubierta vegetal y a las prácticas de conservación del suelo. De la dominancia de unos u otros factores dependerá la estabilidad o inestabilidad del suelo frente a la erosión hídrica.

Normalmente, las ● **tasas de erosión del suelo** son elevadas cuando:

-las lluvias son intensas o de larga duración. Es el *factor climático* de la erosión por agua;

-las escorrentías generadas son amplias y rápidas (*factor hidrológico*). Dependen de los factores climático, geomorfológico y de la cubierta vegetal;

-la erosionabilidad del suelo es alta. *Factor edáfico*;

-las pendientes son acusadas y las laderas tienen gran desarrollo. *Factor geomorfológico*;

-la cubierta vegetal es pobre (*factor vegetación*). La vegetación es el más importante factor de control de la erosión del suelo. Depende del clima, geomorfología, suelo y actividad humana;

-y las actividades humanas sobre el suelo son inadecuadas o depredadoras (► **factores antrópicos**).

Estos factores son integrados en el más famoso modelo de estimación de la erosión: la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) definida por Wischmeier y Smith (1958). El modelo fue diseñado para ser utilizado a escalas locales y en áreas donde la erosión era producida, esencialmente, por *flujo hortoniano*, es decir, por aquellas escorrentías que se generan con tormentas o aguaceros de alta intensidad y en el transcurso de los cuales se rebasa la capacidad de infiltración del suelo.

Clima y geomorfología, intervención humana y estado de la cubierta vegetal son los factores dominantes impli-

Factores antrópicos. Son fenómenos debidos a la acción del ser humano. La pérdida de suelo y degradación causada por malas prácticas agrícolas es una erosión antrópica.



Fig.48.- Ejemplo de erosión antrópica o erosión acelerada.



Fig.49.- Cuando el suelo muere (es erosionado), las piedras nacen.

cados en la erosión del suelo. El uso y gestión del suelo que realice el hombre tiene una vital importancia en la conservación o degradación del recurso. Una mala o deficiente explotación del suelo que degrade la cubierta vegetal, especialmente en ecosistemas frágiles, va a producir altas tasas de pérdida de suelo por su erosión acelerada (Fig. 50), lo que contribuye a una degradación generalizada del territorio o desertificación.

Mecanismos de generación de escorrentías

Las características y el comportamiento hidrodinámico de suelos y formaciones superficiales tienen destacada importancia en los procesos de erosión. El conocimiento preciso de los mecanismos que gobiernan las relaciones suelo-agua es básico para analizar los balances de agua, así como para la com-



Fig.50.- Flujos causa-efecto implicados en las tasas de erosión hídrica del suelo que influyen en la desertificación.

presión de muchos procesos geomorfológicos y el funcionamiento de los **geosistemas** (Martínez Fernández y López Bermúdez, 1996). La variabilidad espacial y temporal de la humedad del suelo explica, entre otros aspectos, la evolución de las zonas saturadas, la forma de los hidrogramas, la estabilidad estructural, la compactación del suelo, su erosionabilidad y la distribución de las fuentes de sedimentos.

Los flujos de agua que discurren por la superficie del suelo o cerca de ella tienen una función destacada en el transporte del material removido por meteorización y por splash y en las diferentes formas de incisión por agua. En ausencia de escorrentías, las partículas y agregados del suelo no son desplazadas muy lejos de sus áreas fuente.

Los mecanismos de formación del excedente de agua o de generación de escurrimiento tras la lluvia vienen determinados por el tipo de lluvia, vegetación, características de la superficie del terreno, velocidad de infiltración, capacidad de almacenamiento de agua y conductividad hidráulica. A escala local, los usos del suelo también tienen una destacada importancia. Pueden ser de tres tipos (Fig.51):

a) *Flujo por exceso de agua precipitada* conocido como *flujo hortoniano*. Este tipo de escurrimiento se establece durante aquellas tormentas que generan unas lluvias copiosas que superan la tasa de infiltración de los suelos. Esto ocurre, por ejemplo, en áreas con vegetación pobre y en áreas perturbadas por la acción humana,

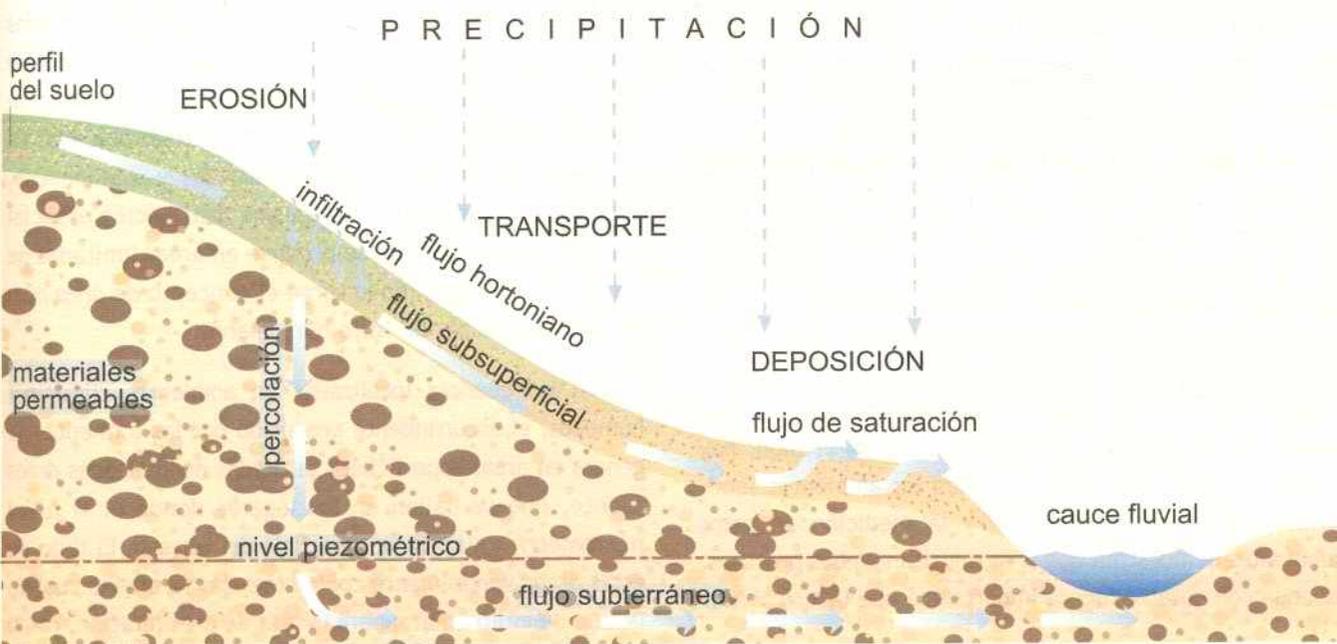


Fig.51 - Posibles caminos de circulación del agua en una ladera: tipos de flujos hídricos y procesos de erosión/sedimentación, según el modelo clásico de Horton.

principalmente en regiones semiáridas. El volumen de agua que se genera en la superficie del terreno depende a la vez de la intensidad y duración de las precipitaciones. En una ladera, este modelo de formación de flujo presenta las siguientes situaciones (Fig.52):

1. en la parte alta, próxima a la divisoria de aguas, sólo se registra el impacto de las gotas de lluvia que origina la erosión por *splash*. No hay flujo y, por ello, no se produce erosión laminar;

2. la intensidad de la lluvia, al superar la velocidad de infiltración, origina una fina lamina de agua más o menos uniforme (flujo laminar) en la banda de ladera aguas debajo de la primera;

3. al aumentar la cantidad de agua, la rugosidad del terreno y, posiblemente, la geometría de la ladera, el flujo laminar se concentra paulatinamente (flujo concentrado), produciendo incisiones que evolucionan a formas mayores ladera abajo;

4. finalmente, la parte basal de la ladera es un área de depósito de los sedimentos transportados por los flujos. Una ruptura de pendiente cóncava favorece el depósito. Con la escasa pendiente, el flujo pierde velocidad y capacidad de transporte y deposita los materiales.

La suposición general, del convencional y didáctico modelo de Horton, de que en las áreas más elevadas de una ladera no se registran flujos hídricos ni erosión, hay que ponerla en duda, al menos para los ambientes semiáridos, ya que la observación y la medición en estos ambientes demuestran que sí se registran ambos procesos, aunque con notable menos importancia que ladera abajo;

- b) *Flujo de saturación o de Dunne*. Se produce cuando la capacidad de infiltración y almacenamiento del

suelo es sobrepasada. Un suelo saturado empieza a rebotar y a expeler el exceso de agua. Este tipo de flujo es muy frecuente en aquellos suelos en los que sus características hidráulicas no son transmisivas y donde las pendientes del terreno son suaves y convergentes. La saturación se alcanza primero en la parte baja de la ladera, ya que, además de la lluvia directa, recibe el flujo de las partes altas. También suele producirse por ascenso del *nivel freático* o por flujo subsuperficial;

- c) *Flujo subsuperficial*. Se genera cuando la capacidad de infiltración es elevada, si la zona próxima a la superficie del terreno tiene un alto valor de conductividad hidráulica, es decir, es muy transmisiva del agua pluvial y de la de los flujos superficiales. Las fuertes pendientes del terreno favorecen este tipo de flujo.

Originariamente se consideraba que las escorrentías generadas durante las tormentas se debían al flujo que se producía en toda la cuenca hidrográfica. Se ha comprobado que en muchas cuencas, sobre todo las ubicadas en ambientes climáticos áridos, semiáridos y subhúmedos, en los que los aguaceros tienen una distribución espacial muy desigual, este flujo se produce en áreas limitadas de las mismas. De este modo surge el concepto de *área parcial* de generación de flujo hortoniano.

En las cuencas localizadas en ambientes climáticos húmedos, el escurrimiento producido por las tormentas se genera en áreas superficiales saturadas denominadas *áreas fuente*, que se hallan en los lugares donde el **● nivel piezométrico** alcanza la superficie del terreno. El flujo de estas *áreas parcialmente contribuyentes* se origina cuando la tasa de infiltración supera la tasa de precipitación, como ocurre en zonas con importante vegetación de las regiones templado-húmedas.

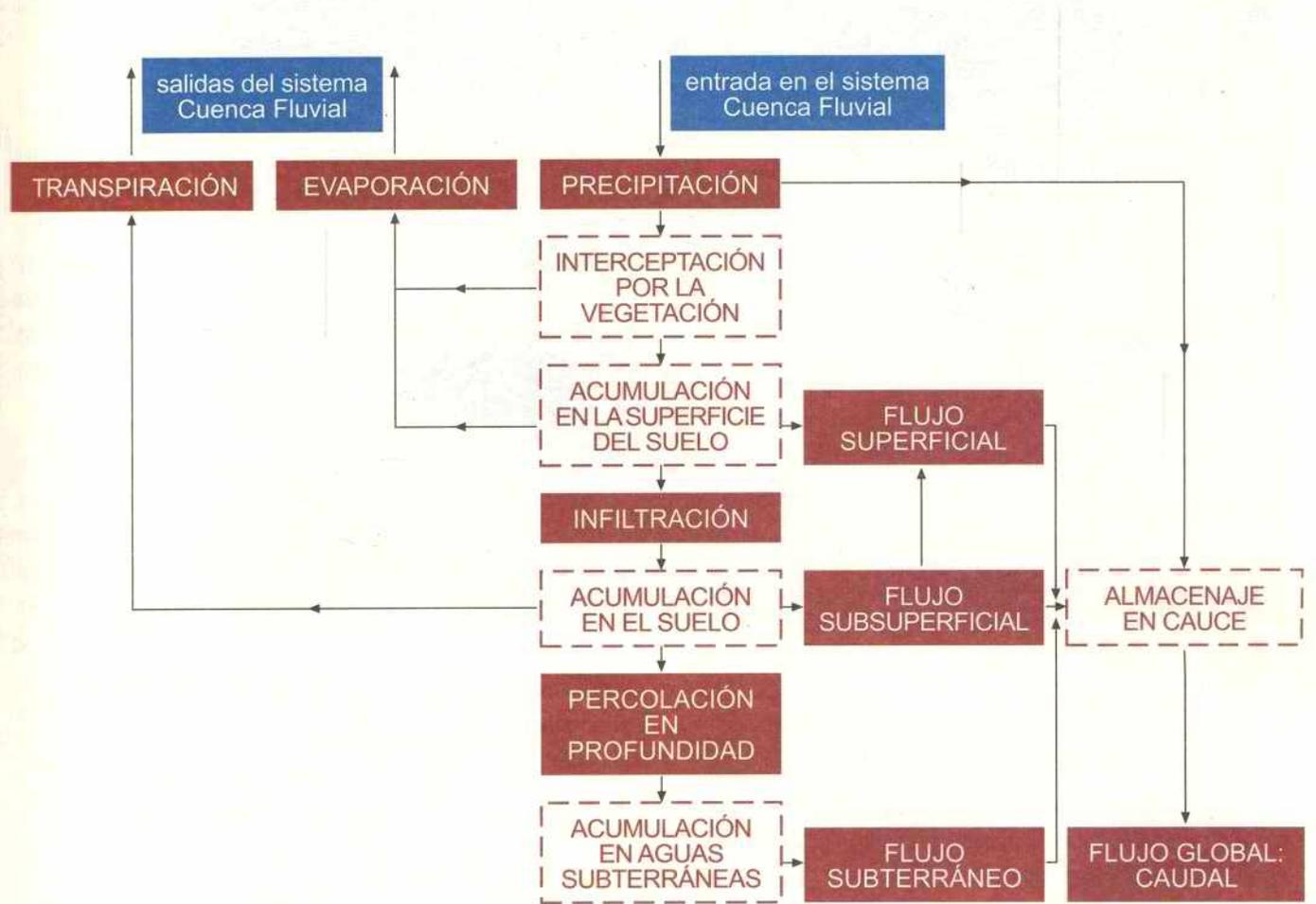


Fig 52. Los factores que determinan los tipos de flujos hídricos en una cuenca fluvial y el caudal global resultante se expresan en el diagrama. Aquellos encuadrados en rojo son factores de transmisión hidráulica, mientras que los rodeados por una línea discontinua son de almacenaje temporal del agua. Como puede verse, los factores que causan los flujos hídricos y los procesos erosivos que desencadenan son diversos y complejos, dependen básicamente del clima, la cubierta vegetal, la litología, la morfología del terreno y los suelos.

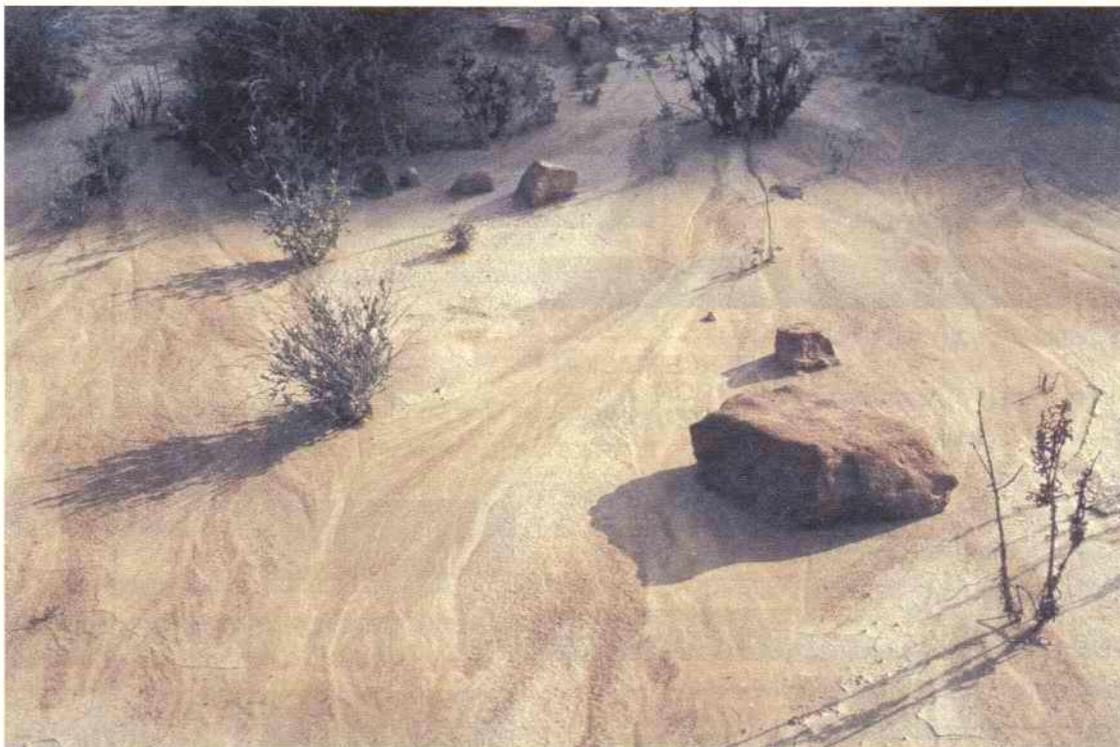


Fig. 53.- Cono de materiales finos (arcillas y limos) depositado por la escorrentía laminar durante un aguacero.

Los tipos de escorrentía y sus efectos erosivos

Atendiendo a los mecanismos de generación de flujos o escorrentías y a las formas de erosión resultantes, es posible diferenciar los siguientes:

Escorrentía laminar

Este tipo de flujo hídrico también es conocido como *escorrentía embrionaria* o *difusa* (*sheet-flood* en inglés; *ruissellement* en francés). Es la forma de erosión más común. Aparece bajo la forma de un conjunto de hilillos o filetes de agua entrelazados, cambiantes, frecuentemente divididos por los obstáculos de la superficie del suelo, reunidos después

y originando una delgada lámina de agua. Se inicia tras las precipitaciones y converge ladera abajo. Las partículas de aquellos suelos mal protegidos por la vegetación son removidas por la acción del viento o por el impacto de la lluvia.

La eficacia geomórfica es débil o moderada, redistribuye y transporta partículas finas liberadas por la salpicadura o *splashes* de la lluvia. Su acción es visible, por un lado, por un rebajamiento del nivel de la superficie del suelo, por el hecho de aparecer más o menos limpios los elementos gruesos en superficie, por contribuir a la formación de pedestales en los que las raíces de la vegetación protectora resistente retienen una porción de suelo que, con el tiempo, acaba siendo también desmantelado.

Finalmente, este tipo de escorrentía y erosión laminar se manifiesta en la presencia de depósitos o mantos coluviales y aluviales al pie de la ladera (Fig. 53).

Escorrentía concentrada

El engrosamiento del caudal ladera abajo y las irregularidades del terreno transforman la escorrentía laminar en *escorrentía concentrada*, capaz de reunir importantes volúmenes de agua. Su eficacia geomórfica es importante, ya que su energía no sólo moviliza partículas y agregados, sino también elementos gruesos de una amplia gama de tamaños, que, además, originan incisiones en el terreno (Fig. 54).

Elemento fundamental de este tipo de escorrentía es el **cauce**, lugar donde la energía y la materia se concentran y por donde discurren los flujos hídricos y la carga de sedimentos; sus dimensiones suelen variar ampliamente, y los investigadores (Strahler, 1968; van Zuidam, 1977; Riou, 1990; Perles Roselló, 1997; Senciales, 1999) no siempre coinciden en las dimensiones que caracterizan a cada tipo.

Escorrentía subsuperficial o en túnel

Este tipo de escorrentía y el proceso de erosión conocido como sifonamiento, sufosión, erosión en túnel o **● piping** tienen un gran significado geomorfológico. Consiste en la formación de conductos o túneles (*pipes*) naturales en el suelo o en otros depósitos no consolidados por eluviación o por procesos de erosión diferencial subsuperficial. Por estos conductos hipodérmicos, es fácil la remoción y el transporte y la evacuación de materiales finos, como arcillas, limos y arenas. El agua, al arrastrar las partículas de menor calibre de una formación detrítica, origina una oquedad que es ensanchada progresivamente por la entrada de nuevos flujos hídricos en el suelo. El proceso finaliza con el hundimiento de la bóveda y la formación de cárcavas en diverso grado de evolución (ver Fig. 59 en pág. 75).

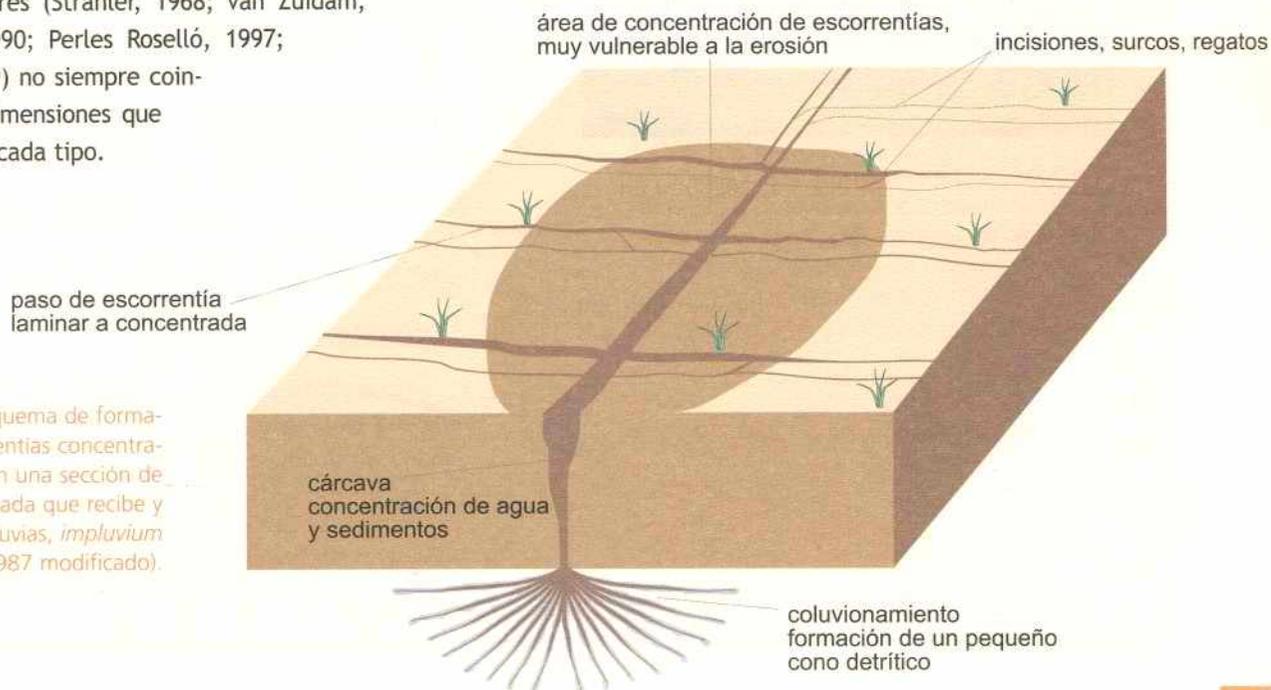


Fig. 54.- Esquema de formación de escorrentías concentradas y surcos en una sección de ladera cultivada que recibe y concentra lluvias, *impluvium* (Auzet, 1987 modificado).

Escorrentía concentrada y cauces

Arroyada en surcos o en regueros (*rill wash* en inglés, *rigoles* en francés). Este tipo de flujo y erosión es uno de los procesos más importantes de la erosión hídrica; están constituidos por incisiones elementales, temporales, que aparecen durante el aguacero a continuación de una concentración local del agua canalizada por el microrrelieve, matas de gramíneas, matorral, arbustos, labranza en el sentido de la pendiente, etc (Fig. 55). Cuando los surcos son numerosos y profundos, la cantidad de suelo que es erosionado resulta muy importante.



Fig.55.- Incisión generalizada por escorrentía concentrada en surcos, favorecida por el sistema de labranza. Estos tipos de regueros contribuyen a alimentar incisiones más importantes.

Las dimensiones son moderadas:

Profundidad: de algunos centímetros a 40 – 50 cm.

Perfiles en V

Anchura: de algunos decímetros a 2 metros

Longitud: escalas métricas y decamétricas

La anchura de este tipo de incisiones depende de la pendiente, la longitud de la ladera, la rapidez de la escorrentía y, sobre todo, la intensidad de la lluvia y la densidad de la cubierta vegetal; la intervención humana puede incrementar el proceso. La aparición jerarquizada indica una intensificación de la erosión vertical y una estabilización de las entalladuras, que por lo general desemboca en la formación de cárcavas.

Arroyada en cárcavas o torrenteras (*stream flood gullies* en inglés, *ruissellement en ravines* en francés). Este tipo de flujo e incisiones manifiesta un alto grado de agresividad erosiva, debido a una fuerte concentración, una mayor velocidad de las escorrentías y la supresión de la cubierta vegetal (Fig. 56). En efecto, cuando las incisiones se profundizan suficientemente y adquieren un carácter permanente, su evolución no depende únicamente de las características de las escorrentías: la cabecera y los bordes de estos regueros pueden evolucionar hacia movimientos en masa por el socavamiento de la base (Fig. 57). La eficacia geomórfica es muy importante.

Las cárcavas más numerosas y fuertemente entalladas aparecen en áreas degradadas; sus dimensiones, variables, pueden ser ya importantes:

Profundidad: de 0,5 a 2 metros con perfiles en V y U según el grado de evolución;

Anchura: de 5 a 10 metros. En ocasiones suele aparecer un minicauce en el lecho;

Longitud: de 20 a 100 metros o más

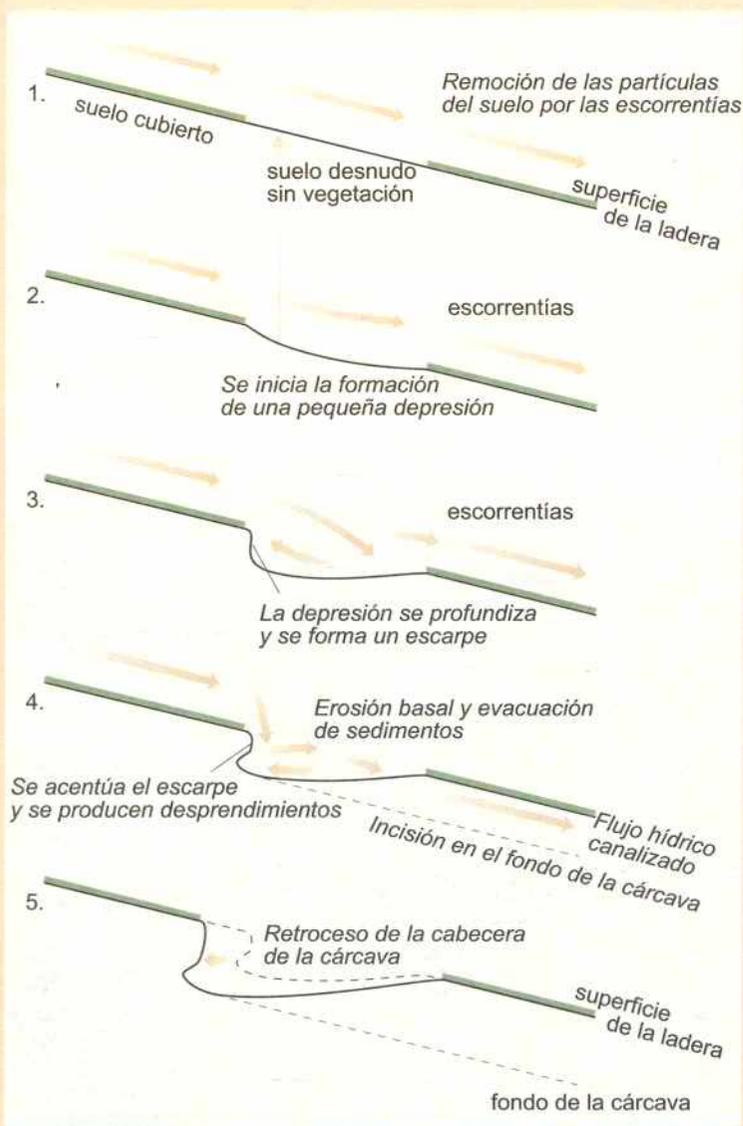


Fig.56.-Secuencia en la formación y evolución de una cárcava (Morgan, 1980, modificado).

Arroyada en barrancos (*gullies*, arroyos en inglés, *ruissellement en ravins* en francés).

Es la más obvia y dramática demostración de la erosión. Este tipo de flujo y erosión aparece cuando los tipos precedentes se agravan, cuando las incisiones se profundizan y ensanchan considerablemente. En muchas áreas expresa la degradación total del suelo. Aparece en territorios muy degradados, frecuentemente por intervención humana inadecuada. La supresión de la cubierta vegetal por incendios y roturaciones de tierras marginales en pendiente suele acarrear este tipo de degradación generalizada del paisaje. Es usual denominar a estos espacios de abarrancamiento generalizado con el vocablo anglosajón de **badlands** (Fig. 58). Normalmente, el mecanismo empieza con la escorrentía y erosión laminar seguida con la formación de surcos y su progresión hasta alcanzar importantes tamaños.

Las dimensiones de estas geoformas de erosión hídrica pueden ser espectaculares:

Profundidad: más de 2 metros, llegando incluso a 10 o más;

Anchura: de 10 a 20 metros;

Longitud: de uno a varios centenares de metros hasta desarrollos kilométricos. >>>

Escorrentía concentrada y cauces



Fig. 57.- Las cárcavas son geformas mayores de erosión hídrica. La erosión basal y la remontante las van ensanchando y profundizando. Las tierras de cultivo se reducen al tiempo que los umbrales se estrechan.

En los ambientes semiáridos mediterráneos, las geformas mayores de los barrancos pasan a ser conocidas como ● **ramblas**. Los perfiles pueden ser muy variados, con pronunciados escarpes, pasando del perfil original en V al U por una amplia gama de formas mixtas o más o menos complejas. Origina densas redes de drenaje y están ampliamente extendidos por los dominios climáticos semiáridos y tropicales que han sido deforestados. Con frecuencia, suele asociarse este tipo de paisaje con la desertificación del territorio.

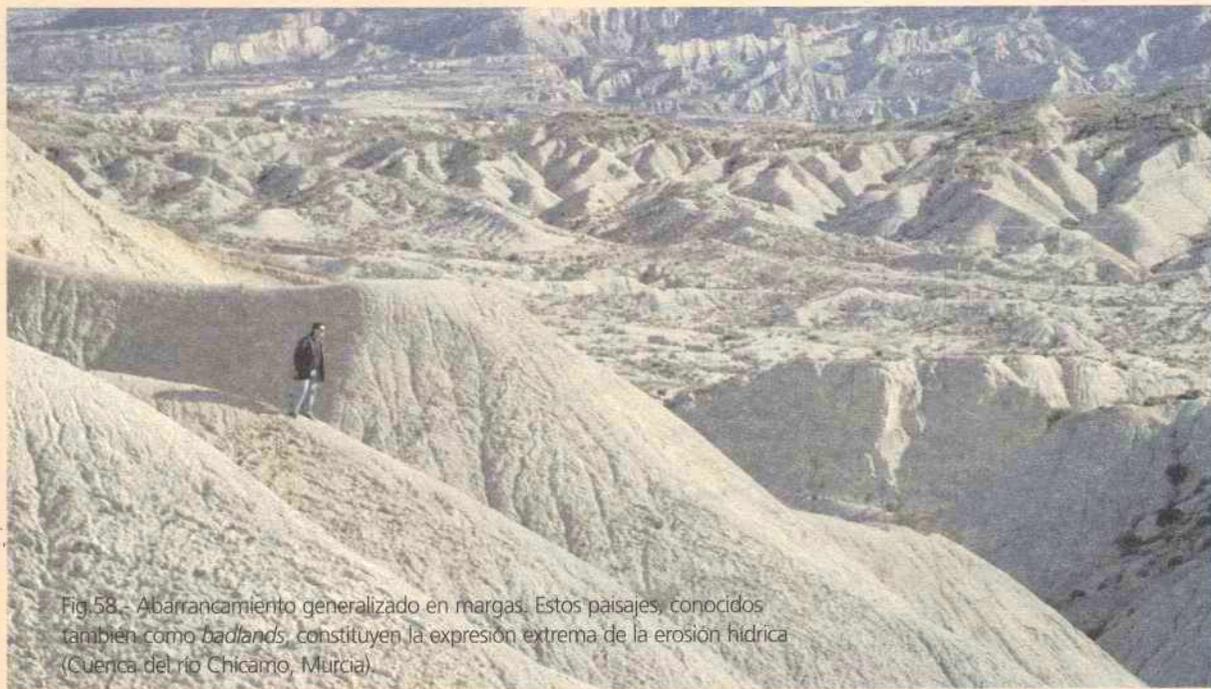


Fig. 58.- Abarrancamiento generalizado en margas. Estos paisajes, conocidos también como *badlands*, constituyen la expresión extrema de la erosión hídrica (Cuenca del río Chicamo, Murcia).

Este mecanismo se encuentra en casi todos los dominios climáticos; sin embargo, es en la regiones semiáridas donde alcanza mayor desarrollo. Los principales factores que intervienen en su génesis inicial son:

1. condiciones climáticas semiáridas con lluvias esporádicas e intensas que originan importantes gradientes hidráulicos;
2. materiales finos y amplios períodos sin lluvias y cálidos que des sequen y agrieten los suelos;

3. alta susceptibilidad de suelos y formaciones detríticas finas a ciertos fenómenos físicos y químicos tales como inestabilidad estructural, pérdida de cohesión, dispersión y perforación. Los suelos con altos contenidos en arcillas hinchables y limos son muy vulnerables al proceso;

4. diferente erosionabilidad y permeabilidad en las distintas capas del suelo y el subsuelo;

5. suelos con alto contenido en sales solubles que ofrezcan una capacidad de cambio de bases elevada, par-

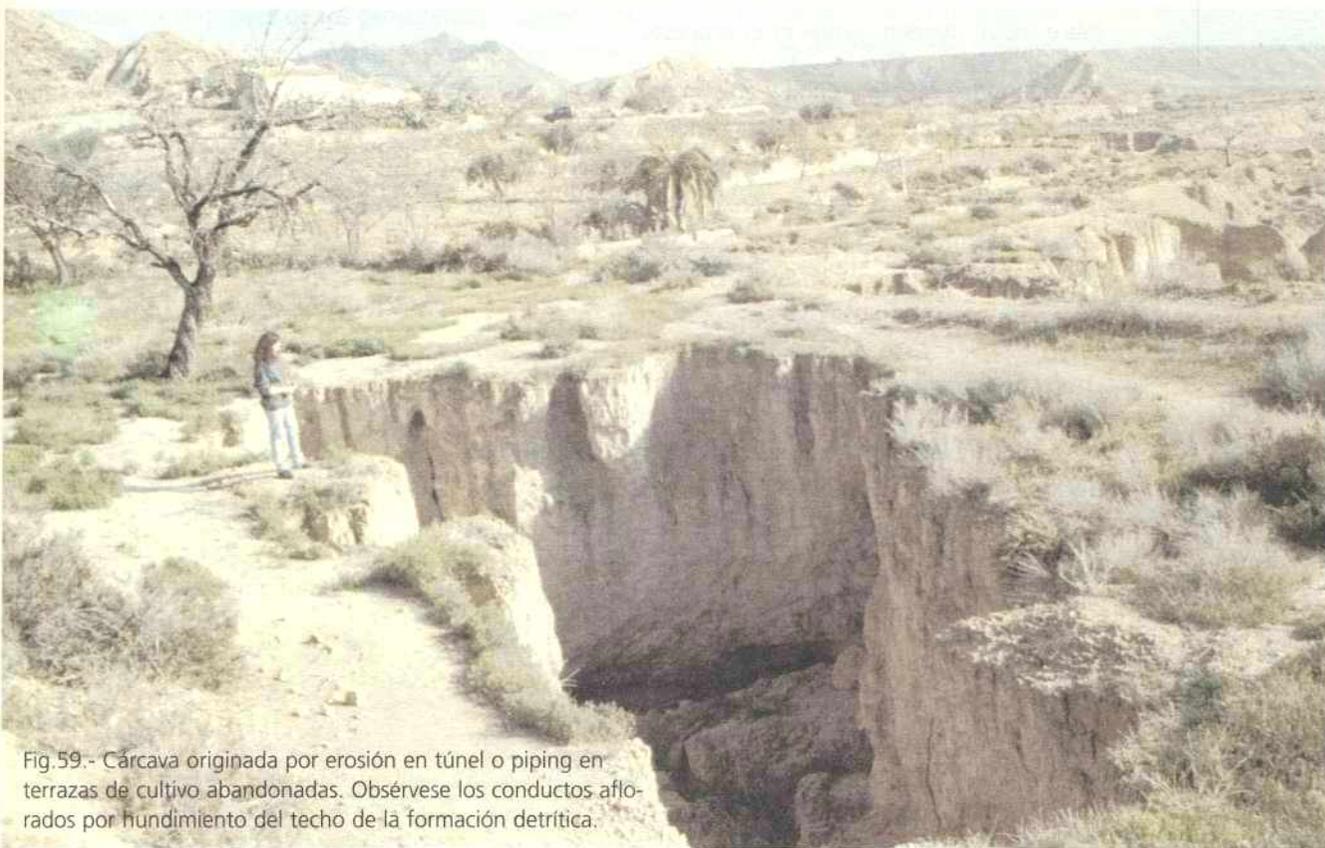


Fig. 59.- Cárcava originada por erosión en túnel o piping en terrazas de cultivo abandonadas. Obsérvese los conductos aflorados por hundimiento del techo de la formación detrítica.



ticularmente con el sodio, que dispersen el material y faciliten su remoción y transporte por los flujos hídricos;

6. en sistemas de terrazas escalonadas los túneles aparecen en el límite inferior de la parcela, coincidiendo con sectores cóncavos o con salto topográfico;

7. la vegetación degradada favorece el proceso;

8. determinadas acciones humanas tales como la deforestación, sobrepastoreo, abandono de terrazas de cultivo de secano, etc., también tienen repercusiones en el mecanismo;

9. la acción biológica de raíces y animales (roedores sobre todo), pueden favorecer el proceso.

Esta forma de escorrentía y erosión aparece en amplios sectores de las regiones semiáridas donde el frágil equilibrio natural ha sido perturbado por usos del suelo inadecuados. La rápida erosión hídrica de estas áreas, productoras de altas tasas de sedimentos, origina un modelado de disección y hundimientos que desemboca en la formación de cárcavas y contribuye al abarrancamiento del territorio.

En agronomía, es frecuente utilizar una jerarquía diferente a la expuesta; así, el *reguero* es aquella incisión que se borra con técnicas de cultivo simples, por ejemplo con una labranza superficial. La *cárcava* requiere para su desaparición el uso de medios tecnológicos más potentes, mientras que el *barranco* es prácticamente irrecuperable y, si se quiere corregir, demanda importantes medios técnicos y monetarios.

Finalmente, estos distintos tipos de escorrentía y de erosión se combinan en el tiempo y en el espacio; en ellos intervienen de manera compleja diferentes factores medioambientales, sobre todo las características de las lluvias, el suelo, las condiciones geomorfológicas y la cubierta vegetal.

5

Señales o síntomas de la erosión sobre el terreno

La primera manifestación del proceso de erosión y una de las causas desencadenantes de otros fenómenos de degradación es la pérdida de suelo. La erosión del suelo acarrea una disminución de la productividad porque reduce su profundidad, su capacidad de retención de humedad y el contenido en materia orgánica y nutrientes, es decir, la fertilidad. La respuesta de los geosistemas y suelos a los procesos de erosión hídrica se expresa de múltiples y diversas maneras:

a) entre los efectos directos e inmediatos, está la pérdida del capital suelo, base de sustentación de las raíces de las plantas, naturales y cultivadas, pues él retiene y almacena la humedad. Esta pérdida del recurso puede ser, en casos extremos, acelerada e irreversible;

b) con el tiempo, el suelo, lugar fundamental de transferencias, transformaciones y tránsito de los componentes de los sistemas naturales, puede perder completamente su capacidad productiva, destruyéndose de este modo y en pocos años lo que la naturaleza tardó y tardará miles de años en formar de nuevo;

c) pérdida de nutrientes naturales o añadidos con los fertilizantes al suelo, y arrastre y pérdidas de semillas o plantas aún poco desarrolladas. Estos procesos causan efectos negativos inmediatos sobre los rendimientos y la producción (Fig. 60);

d) aumento de la pedregosidad y el afloramiento en superficie de capas más profundas del suelo, incluso del sustrato rocoso subyacente;

e) la decapitación y ablación del suelo por erosiones laminar o difusa producidas por las escorrentías de superficie produce transferencias de partículas y nutrientes de las partes altas de las laderas a las bajas.

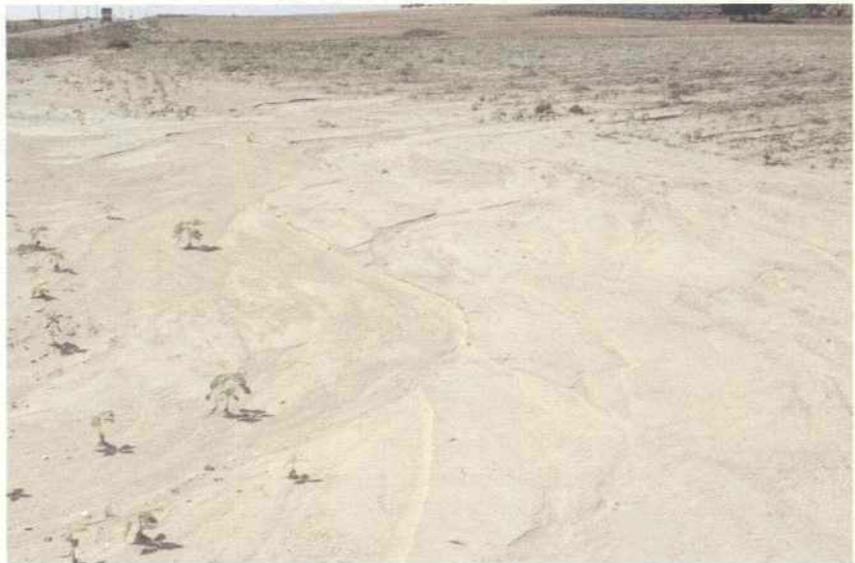


Fig.60.- Aterramiento de una plantación joven de girasol por los sedimentos producidos por la erosión de las partes altas del campo cultivado.

Fig. 61.-
Descalzamiento y
puesta al descubierto
del sistema radicular
de un naranjo, por
erosión hídrica.



Este proceso se manifiesta, por un lado, en la presencia de una gama de colores de diversos tonos, que corresponden a estratos más profundos del suelo y regolito, y por otro, en los cultivos, por su menor desarrollo y densidad, incluso ausencia, en las partes más expuestas a la erosión, como son las somitales y convexas;

f) la erosión del suelo se refleja también en la escasez de vegetación, incluso en su ausencia. En la sustitución de especies arbóreas espontáneas (encina y alcornoque, por ejemplo) por el matorral y la estepa. Además, por la puesta al descubierto de las raíces de árboles, arbustos y matorrales (Fig. 61). La invasión de especies vegetales específicas de suelos degradados es otro indicador;



Fig. 62.- Las ramblas son unos poderosos sistema hidrológicos de erosión y transporte de sedimentos en los ambientes secos y, a la vez, elementos destacados de los paisajes

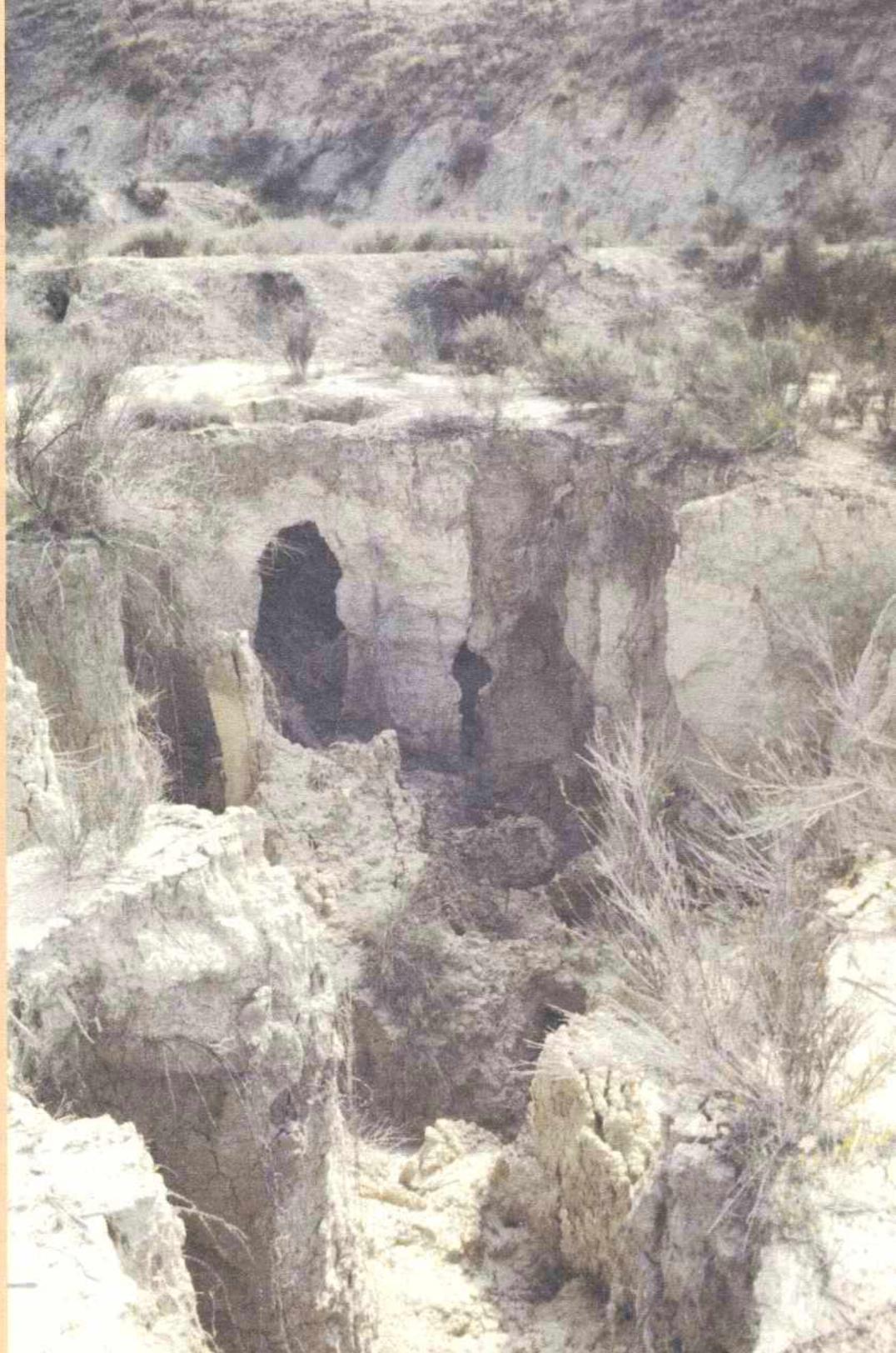


Fig. 63.- El proceso de erosión por piping es frecuente en los suelos en los que no se llevan a cabo prácticas de conservación o se han abandonado.



Fig. 64.- Las coladas de barro son otra expresión de la erosión hídrica cuando los horizontes superiores del suelo se saturan y debilitan las fuerzas de cohesión.

g) las escorrentías concentradas, tanto en flujos turbulentos o no, constituyen procesos fundamentales en la morfogénesis de las zonas erosionadas. Incisiones de diversa magnitud aparecen en el terreno: surcos, regatos, cárcavas, barrancos, torrenteras, ramblas (Fig. 62) y la generalización de la topografía abarrancada o *badlands* son las geoformas más frecuentes en este tipo de erosión;

h) hundimientos y socavones por remoción, y evacuación de materiales por conductos debajo de la masa de suelo y regolito. Proceso bastante extendido por todo el ámbito de la España mediterránea y conocido, genéricamente, como *sufosión*, erosión en túnel o *piping* (Fig. 63);

i) la acción del agua en profundidad, en conjunción con la gravedad, también es responsable de movimientos en masa como las coladas de barro, producidas cuando se registran lluvias abundantes y los horizontes superiores del suelo se saturan y pierden cohesión (Fig. 64);

j) creación de microestructuras superficiales, que determinarán, a su vez, los efectos del *splash* y de las escorrentías del siguiente aguacero: costras laminares, partículas o agregados de suelo dispersos por la superficie, arenas litadas, presencia de *pedestales* o *montículos* de erosión, empedrados de cantos y gravas, más o menos densos y discontinuos, micro *cheminées de fée* (columnas de arcilla rematadas por una piedra o canto que las ha protegido de la erosión), etc.;

k) aparte de los efectos en el mismo sitio o lugar donde ocurre la pérdida de suelo por erosión, este proceso provoca también efectos indirectos, fuera del área afectada directamente, por incrementar las escorrentías superficiales y los caudales punta de las avenidas que causan inundaciones. Además, si los sedimentos producidos por el desmantelamiento del suelo alcanzan los ríos, ocasionan una reducción de la calidad del agua debido a las partículas en suspensión que ocasionan turbidez y por la acumulación de materia orgánica y nutrientes que pueden dar origen a problemas de eutrofización. Por otro lado, los sedimentos producidos por la erosión pueden acumularse al pie de laderas, en vaguadas, llanuras, lechos fluviales, canales de riego y de drenaje, vías de comunicación, áreas urbanas e industriales y embalses. Estos últimos son aterrados implacablemente, reduciendo su vida útil y perdiendo funcionalidad (Fig. 65). Las cuencas hidrográficas de España, en particular las mediterráneas, ofrecen significativos ejemplos de embalses colmatados por sedimentos, e incluso abandonados;

y l) finalmente, cuando un suelo está degradado y sus capacidades físicas y químicas están empobrecidas, muchas importantes funciones ecológicas no se realizan o lo hacen muy disminuidamente (Fig. 66). Los ecosistemas con suelos erosionados son siempre sensibles y frágiles.

Todas estas señales y síntomas impresos en los paisajes de la mayor parte de las tierras semiáridas y tropicales constituyen manifestaciones o indicadores relevantes, quizás los que más, de los impactos ambientales de la erosión hídrica. Globalmente constituyen un paradigma del fenómeno de erosión y, a la vez, muestran los caminos hacia el futuro, de lo que se debe y no se debe hacer.

Para los territorios mediterráneos, el problema es particularmente agudo, ya que, después de los ecosistemas tropicales, los mediterráneos son los más frágiles del globo

por sus características y condiciones ambientales, tales como la aridez, las precipitaciones irregulares e intensas, las frecuentes y fuertes sequías, la erosión del suelo, la recurrencia y extensión de los incendios, la salinización de suelos y aguas, el deterioro de la estructura del suelo y de la cubierta vegetal, etc. Todo ello genera una alta sensibilidad a los procesos de degradación por erosión y desertificación, los más importantes riesgos ambientales.

Del análisis de la evolución de los paisajes erosionados parece desprenderse que las causas físicas que provocan la



Fig. 65.- Las colmataciones de embalses son manifestaciones de la erosión del suelo que registran las cuencas fluviales aguas arriba de donde se halla ubicada la presa.



Fig. 66.- Un suelo erosionado ha perdido total o parcialmente su capacidad para producir. Los ecosistemas que soporta son frágiles y suelen estar muy degradados.

erosión de los suelos son potenciadas y aceleradas por acciones humanas relacionadas con causas socioeconómicas. De este modo, el carácter de unas lluvias insuficientes y con frecuencia torrenciales, la aridez, las sequías, la escasa cubierta vegetal, las condiciones geomorfológicas, etc., favorecen los procesos de erosión. Esto ha desembocado en la actualidad en un estado preocupante, en algunos casos grave, de buena parte de los geosistemas.

6

Métodos de medida y evaluación de la erosión hídrica

Los métodos de evaluación o estimación de la erosión tienen como objetivo su cuantificación. La evaluación de la erosión es necesaria para conocer el contexto espacial en el que se producen los procesos de erosión y para cuantificar la pérdida de suelo que se produce, para identificar las causas y proponer recomendaciones o soluciones fiables y eficaces de prevención del proceso, para implantar medidas de restauración y rehabilitación, cuando no se hayan traspasado límites que hagan imposible la recuperación del recurso. Cuantificar tasas de erosión es útil, y la gestión sostenible del suelo requiere conocer el riesgo de su pérdida bajo determinadas condiciones ambientales. La eficacia de la aplicación de remedios para prevenir la erosión del suelo y mitigar sus efectos requiere conocimientos y diagnósticos precisos para cada caso y tratamientos que integren medidas complementarias.

Sin embargo, la cuantificación de la erosión del suelo presenta un conjunto de problemas técnicos y metodológicos en relación a las escalas espaciales y temporales, porque los procesos de erosión se manifiestan en tasas, grados y frecuencias variables en el tiempo y en el espacio. A diferentes escalas concurren e interaccionan distintos procesos, lo que plantea serias dificultades cuando se desean establecer comparaciones entre medidas realizadas a distintas escalas y se llega a interpretaciones diferentes. Por otro lado, la propuesta de índices de erosión del suelo plantea algunas dificultades por el carácter multifactorial que controla el proceso,

por la variación que el fenómeno tiene en el tiempo y en el espacio y por la dificultad de diferenciar las pérdidas de suelo por procesos naturales de aquellas inducidas por las actividades humanas.

Las técnicas de cuantificación y los modelos de evaluación de la erosión del suelo se han desarrollado a lo largo de muchos años como resultado de la creciente preocupación y comprensión del proceso. Las primeras estimaciones datan de principios del siglo XX; fueron, sobre todo, de naturaleza cualitativa e ilustraban cómo diversas prácticas de cultivo arrojaban resultados distintos para controlar la pérdida de suelo. Conforme se iban disponiendo de más datos de observaciones de campo, empezaron a formularse ecuaciones que integraban los factores que producían el fenómeno erosivo; las formulaciones empíricas de Zingg (1940), Smith (1941), Smith y Whitt (1947), Musgrave (1947) y otros, son algunos ejemplos. Estos análisis culminaron en la ecuación de mayor uso sobre la erosión hídrica del suelo: la ecuación universal de pérdida de suelo (Universal Soil Loss Equation, U.S.L.E), definida por Wischmeier y Smith (1958). A partir de entonces una gran profusión de métodos de evaluación de la erosión hídrica se han desarrollado, pudiéndose agrupar en cualitativos y cuantitativos. El límite entre ambos tipos de métodos no es claro. Con frecuencia, para estimar la importancia del proceso erosivo por medio cualitativo es preciso aplicar el método cuantitativo y viceversa.

La intensidad de la erosión

Los métodos de evaluación de la erosión expresan los resultados en las siguientes expresiones:

a) la tasa o intensidad de erosión del suelo es usualmente expresada como pérdida de suelo por unidad de superficie y por intervalo de tiempo; por ejemplo, $1 \text{ kg/m}^2/\text{año} = 10.000 \text{ kg/ha/año} = 10 \text{ t/ha/año} = 7,7 \text{ m}^3/\text{ha/año} = 0,00077 \text{ m/año} = 0,77 \text{ mm/año}$ de suelo denudado, asumiendo que la densidad del suelo erosionado (determinada con el picnómetro) sea de 1300 kg/m^3 , valor muy frecuente;

b) los valores de las tasas de erosión suelen compararse con el factor de tolerancia a la erosión o de pérdida de suelo para saber si las pérdidas de suelo son excesivas y deben tomarse medidas para su conservación. El factor de tolerancia a la erosión alude a

la capacidad de un suelo de soportar la erosión en función de su estado, naturaleza y profundidad. Depende, entre otras características, de la tasa de meteorización o de formación del suelo. Por ejemplo, una tasa de tolerancia de $1 \text{ mm/año} = 13 \text{ t/ha/año}$ para un suelo profundo y perfil bien desarrollado, puede ser aceptable; sin embargo, para un suelo de escasa potencia y débilmente estructurado, tan frecuente en el ámbito semiárido mediterráneo, esa tasa es excesiva e inadmisible, ya que la velocidad de formación de suelo es muy inferior;

c) por otro lado, la profundidad del suelo (distancia entre la superficie y la base del perfil, en contacto con el material parental) y la textura sirven para establecer clases de erosionabilidad:

Clases de erosionabilidad según la textura y la profundidad del suelo

Clase	Descripción	Textura	Profundidad (cm)
1	Ligeramente erosionable	C, SC, ZC	> 75
2	Moderadamente erosionable	SCL, CL, ZCL, LS, S	25 - 75
3	Muy erosionable	L, ZL, Z, SL	< 25

Fuente: USDA, CORINE, 1992.

C: arcillosa; SC: arcillo-arenosa; ZC: arcillo-limosa; SCL: franco-arcillo-arenosa; CL: franco-arcillosa; ZCL: franco-arcillo-limosa; S: arenosa; LS: arenoso-franca; SL: franco-arenosa; L: franca; ZL: franco-limosa; Z: limosa

Métodos de evaluación cualitativos

Estos métodos se basan en el análisis de las formas de erosión (surcos, regueros, cárcavas, barrancos, etc.), en las de deposición (conos o abanicos coluviales y aluviales, aterramientos, etc.) y en la identificación de estados o *grados de erosión* para clasificar las pérdidas de suelo registradas en el territorio y su posterior cartografía. Formas y grados de erosión pueden ser determinados mediante la observación por sensores remotos (fotografía aérea e imágenes de satélites) y trabajos de campo. Se han propuesto diversos intervalos de pérdida de suelo por erosión hídrica, siendo los más conocidos y utilizados los siguientes:

Grado de erosión hídrica del suelo

Nivel	Pérdida de suelo	
	t/ha/año	mm/año
Ninguna o ligera	< 10	0,6
Moderada	10 - 50	0,6 - 3,3
Alta	50 - 200	3,3 - 13,3
Muy alta	> 200	> 13,3

Fuente: FAO/PNUMA/UNESCO, 1979

Clases de pérdida de suelo

Nivel	Pérdida de suelo
	t/ha/año
Ninguna o ligera	< 10
Baja	10 - 25
Moderada	25 - 50
Acusada	50 - 100
Alta	100 - 200
Muy alta	> 200

Fuente: ICONA (1982)

En España, el desaparecido ICONA (Instituto para la Conservación de la Naturaleza, del Ministerio de Agricultura) propuso una clasificación de la erosión con intervalos más reducidos para una más detallada representación cartográfica de pérdida de suelo por erosión hídrica:

Otros criterios ampliamente utilizados son los propuestos por el Departamento de Agricultura de EE.UU.(USDA):

Erosión leve, pérdida de menos del 25 % del horizonte A del suelo;

Erosión moderada, si se ha perdido hasta el 75 % del horizonte A;

Erosión fuerte, pérdida de todo el horizonte A y hasta el 25 % del B;

Erosión muy fuerte, aparición de cárcavas y barranqueras.

Para establecer estas evaluaciones las herramientas y métodos más utilizados son:

a) La fotografía aérea

Esta importante fuente de información permite una apreciación directa de las huellas de la erosión, además de poder definir los elementos físicos más relevantes (topografía, microcuencas, cuencas, etc.); la vegetación (tipo, grado de recubrimiento del suelo); en terrenos cultivados (el parcelario y su grado de afección); las áreas de incisión (regatos, surcos, cárcavas, etc.); redes de drenaje; zonas de sedimentación y evolución de los usos del suelo. La fotointerpretación, pese al cierto grado de incertidumbre y de subjetividad que presenta, permite identificar los factores más destacados de la erosión y la importancia que el proceso de degradación del suelo tienen en un período de



Fig. 67.- La fotografía aérea es una eficaz herramienta para identificar huellas de erosión y realizar estimaciones de pérdida de suelo. (Páramo de La Alcarria, Guadalajara).

tiempo determinado (Fig. 67). Los resultados deben validarse con el trabajo de campo.

Suelen ser utilizados tres tipos de fotogramas: blanco y negro, color e infrarrojo, cada uno de los cuales permite identificar aspectos diferentes aunque comple-

mentarios; el blanco y negro es el más usual. Por otro lado, las escalas disponibles registran un amplio rango; sin embargo, es preferible utilizar las escalas grandes, ya que permiten distinguir fácilmente la vegetación, las zonas de suelo desnudo, la incidencia de los tipos de cultivo y técnicas empleadas, la evolución del paisaje, las redes de drenaje o de circulación del agua, las huellas de la erosión, etc. Una manera práctica de obtener estimaciones satisfactorias de la erosión hídrica consiste en comparar fotogramas aéreos de una misma área, obtenidos durante una serie de años, y combinar con tareas de campo la información extraída.

b) ● Teledetección por imágenes de satélites

La teledetección, como tecnología de percepción remota de la realidad biofísica, es una formidable herramienta que reúne muchas de las características que se requieren en el seguimiento, evaluación y control de la erosión del suelo y de la desertificación. La teledetección mediante imágenes de satélites es una fuente de información muy valiosa que permite una apreciación directa de la erosión a la vez que ofrece nuevas perspectivas sobre los procesos de degradación. El proceso, tratamiento e interpretación de los datos que envían los satélites permiten una investigación más eficaz de los parámetros geofísicos que definen los ecosistemas, y de hecho originan nuevas metodologías para abordar los estudios de observación del planeta Tierra (Gutiérrez de la Cámara, 1995).

La información que suministra, incorporada a los sistemas de información geográfica (● SIG), ha revolucionado los procedimientos de observación del planeta, de la erosión y de la desertificación, a escalas global y local, aportando a los métodos convencionales de estudio una serie de ventajas, tales como:

1. una visión sintética, integrada y uniforme de las áreas afectadas y de las que potencialmente puedan estarlo;

2. la repetitividad en la observación y en las medidas de procesos, en cualquier territorio, que evolucionan en escalas temporales diversas;

3. la calidad geométrica que, a través de tratamientos informáticos, permite actualizar cartografías topográficas y temáticas automáticamente;

y 4. la enorme riqueza de información sobre un mismo espacio afectado por procesos de degradación, al ser registrado su comportamiento en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético, mediante diversos sensores (radiómetros, ● **espectrómetros**, ● **espectrorradiómetros**, radares, etc.) que miden a distancia la temperatura de todos los materiales ● **abióticos** y ● **bióticos** de la superficie del complejo planeta terrestre y sus variaciones, permitiendo la identificación de sus características y de su evolución temporal y espacial.

Estados Unidos, Rusia, Francia, Japón, la Agencia Espacial Europea (ESA) y la India son los países que tienen en órbita alrededor de la Tierra una serie de satélites para la observación de la Tierra. Por la calidad e interés de las imágenes, destaca la utilización del satélite francés *Spot* y el reciente (2002) satélite *Envisat* de la ESA y, sobre todo, la constelación de satélites estadounidenses: la serie *Landsat*, el sistema de observación de la superficie terrestre por satélite más antiguo de los Estados Unidos, se inició en julio de 1972. El último, con el número 7, puesto en órbita el 17 de abril de 1999, observa los mismos territorios cada 16 días, en una órbita a 705 km de altitud y con una resolución espacial de 30 metros; registra 250 escenas cada día, por lo que casi 8000 nuevas imágenes de alta resolución de la superficie de la Tierra pueden ser adquiridas cada mes. Estas imágenes son de gran utilidad para todas las ciencias de la Tierra.

La serie *Landsat* se inserta en el programa Sistema de Observación de la Tierra (Earth Observation System, EOS), pieza maestra del Programa de Ciencias de la Tierra de la NASA. EOS es un conjunto de sistemas espaciales y de estudios científicos interdisciplinarios destinados al progreso del conocimiento y comprensión del cambio global, en el que los procesos de pérdida de suelo y de desertificación tienen una destacada influencia.



Fig.68.- Satélite *Terra* (imagen cortesía del SeaWiFS Project. NASA/Goddard Space Flight Center y Orbimage).

El satélite *Terra* (Fig. 68), puesto en órbita el 18 de diciembre de 1999 y activado en febrero de 2000, también tiene gran interés para el estudio de los sistemas naturales de la Tierra; a bordo cuenta con un conjunto de sensores (en particular el espectrorradiómetro MODIS de alta precisión) capaces de dar imágenes de gran detalle de la atmósfera y de la superficie terrestre (Fig. 69). Nuevos tipos de información, de gran interés científico y aplicado, son suministrados por los satélites *Galileo*, *Goes*, *OrbView-2*, *Space Shuttle*, *Topex/Poseidon*, *QuikSCAT*, *TRMM* y otros. El nuevo programa Millennium de la NASA es un ambicioso programa de observación espacial de la Tierra con las más avanzadas tecnologías. El 21 de noviembre de 2000 fue



Fig.69.- Satélite escaneando la atmósfera y superficie de la Tierra (NASA/Goddard Space Flight Center).

lanzado y puesto en órbita a 705 km de altitud el primer satélite de esta nueva misión de observación del planeta, el *Earth Observing-1* (EO-1), que suministra información de gran calidad, utilidad y alta frecuencia, para una amplia gama de usos, sobre los océanos, cambios en la atmósfera, bosques, humedales, desertificación, desastres naturales tales como inundaciones, erupciones volcánicas, grandes tormentas y sus impactos ambientales, usos del suelo, cambios en la cobertura vegetal, procesos litorales y sistemas interactivos a escala planetaria, entre otros.

Las imágenes captadas por los satélites están sirviendo para conocer mejor la complejidad de nuestro planeta y no sólo son de extraordinaria utilidad para todas las ciencias de la Tierra, sino también como base de datos para la documentación técnica, programas de políticas ambientales y educativas, agricultura, planificadores urbanos y cambio climático regional y global.

La misión del *Endeavour*

De gran interés es también la cartografía de la Tierra desde el espacio, realizada por el transbordador *Endeavour*, lanzado el 11 de febrero del 2000 desde cabo Cañaveral y situado en órbita a 233 km de altura. Durante once días, la misión tomó datos para realizar un detallado mapa, por radar, de casi toda la superficie emergida terrestre. El *Endeavour* captó imágenes en 159 vueltas a la Tierra mediante dos radares; el haz fijo de uno de ellos escaneaba una superficie de 50 km de ancho; el otro, móvil, hacía un barrido sobre una banda de 225 km. De la combinación de los datos registrados por ambas antenas, cuyo procesamiento requerirá unos dos años, se obtendrán mapas topográficos, con sombreado, tridimensionales y en perspectiva.

Así, pues, la teledetección mediante imágenes de satélite ofrece atractivas y eficaces perspectivas para el seguimiento, evaluación, modelización y lucha contra la erosión del suelo y la desertificación, así como para la gestión ambiental de los territorios vulnerables a estos tipos de degradación.

c) Método de erosión-deposición

Este método es útil para suelos cultivados en pendiente. Las laderas cultivadas en pendiente suelen registrar pérdida de suelo en la mitad superior y acumulación de sedimentos en la base. La erosión se manifiesta en regueros y surcos que son eliminados por las labores de campo. Sin embargo, la acción en el tiempo

de las escorrentías laminar y concentrada va eliminando los horizontes superiores del suelo (los más fértiles) y haciendo aflorar los inferiores. La evidencia de esta pérdida de suelo se manifiesta en la degradación del perfil edáfico y en el mosaico de colores que, con el tiempo, aparece en superficie; normalmente, los tonos claros corresponden a la puesta en superficie de niveles inferiores, mientras que los tonos oscuros corresponden a áreas con débil o nula erosión, o a las zonas de acumulación de sedimentos en la base de la ladera.

Las plantas cultivadas responden a esta situación: en la parte superior se desarrollan con dificultad, aparecen raquíticas e incluso pueden desaparecer por falta de suelo, humedad y nutrientes; mientras que, en la parte inferior, donde se acumulan la humedad, los sedimentos y los nutrientes, las plantas crecen vigorosas, ofrecen un buen porte y buenos rendimientos (Fig. 70). Estas observaciones permiten confeccionar una cartografía de la erosión del suelo en zonas de cultivo.

Este método también se aplica a la presencia de montículos o *pedestales de erosión* en las áreas que presentan el problema. Estas microtopografías se deben a la protección del suelo que ejercen las plantas (sobre todo matorral y arbustos), las costras superficiales y los cantos o bloques de piedra, y a la acentuación de la erosión en suelo desnudo, sin protección. Las diferencias entre los niveles topográficos de ambas superficies, la protegida y la desnuda, permiten estimar tasas de erosión (Fig.71).



Fig. 70.- En suelos cultivados en pendiente, la erosión del suelo se caracteriza por el escaso porte o desaparición de las plantas y aparición de colores de tonos claros en la parte superior de la ladera, y por la lozanía y buen porte de las plantas que crecen en la parte inferior. (Viñedo de Tobarra, Albacete).



Fig. 71.- Los pedestales de erosión y los espacios entre ellos permiten estimar tasas de erosión. Estas microtopografías son muy frecuentes en ambientes semiáridos y áridos.

Métodos de evaluación cuantitativos

Estos métodos evalúan la erosión del suelo de modo directo mediante la medición en el campo o de manera indirecta mediante la estimación de las tasas de erosión a partir de modelos físicos, estadísticos o paramétricos. La cuantificación de la pérdida de suelo se realiza a distintas escalas, desde el nivel de ● **pedón o pedión** (de 1 a 10 m²) al de ladera (de varias decenas de m² a varios centenares) y cuenca fluvial (desde algunas hectáreas a miles de km²).

Evaluación directa

Las observaciones y mediciones directas sobre el terreno son las más reales y sirven para evidenciar la importancia del proceso de degradación y para su cuantificación. Sin embargo, plantean algunos problemas de método, así como el largo período de tiempo requerido de mediciones para que sea representativo y su elevado coste en dinero. Las medidas directas de la erosión pueden ser efectuadas a varias escalas espaciales mediante registros continuos en parcelas, microcuencas y cuencas; a partir de experimentos con lluvia simulada; con mediciones volumétricas mediante perfiladores microtopográficos, piquetas y agujas de erosión y por medida de parámetros asociados a los sedimentos o al suelo (materia orgánica, fósforo, Cs 137, etc.).

a) Las parcelas de erosión

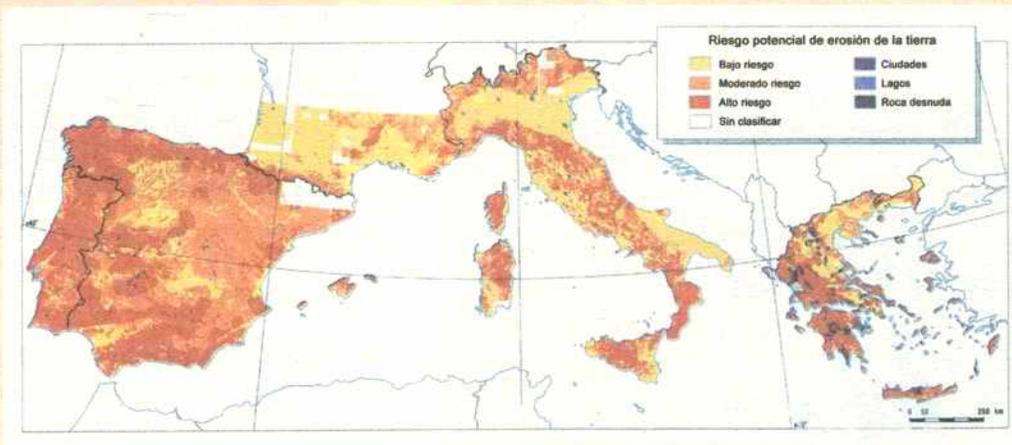
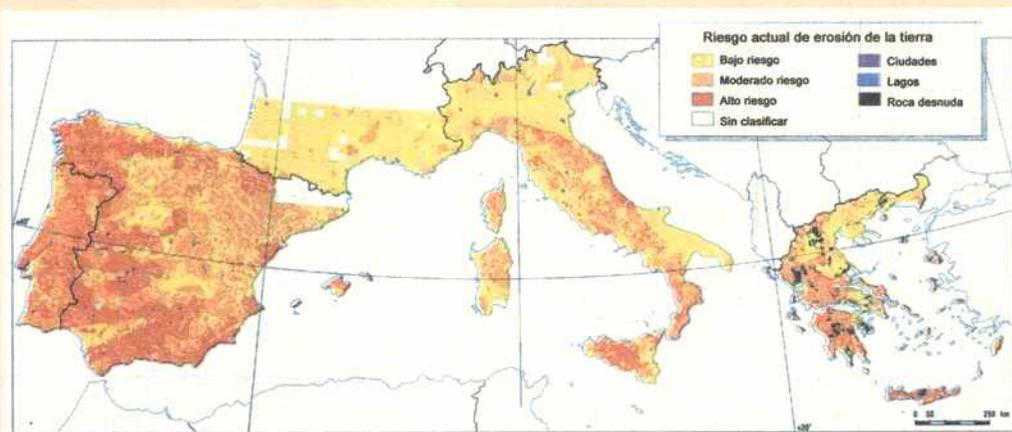
Son uno de los métodos más ampliamente utilizados para el seguimiento y evaluación de la erosión por agua (López Bermúdez *et al.*, 1993; Alba, 1997; Paz y Taboada,

Programa CORINE

Desarrollado por la Comunidad Europea (1992) con el objetivo global de crear un sistema de información del estado de los recursos naturales y del medio ambiente en los países miembros. Se halla estructurado en grandes temas: una base Geográfica, Naturaleza, Tierra, Aire, Agua y Aspectos Socioeconómicos, y dentro de ellos, diversos proyectos. En el tema Tierra se halla el proyecto "Riesgos de erosión de suelos y evaluación de tierras", con los siguientes objetivos específicos: a) recopilar información sobre la calidad del suelo y los riesgos de erosión en los países mediterráneos de la Unión; b) integrar esta información en un sistema de información geográfica que permita evaluar y cartografiar aquellas características a una escala útil para los gestores de la política ambiental; (c) desarrollar un modelo de evaluación de tierras y riesgos de erosión. Se delimitaron, mediante la aplicación de un sistema de información geográfica, 180000 áreas homogéneas de las regiones meridionales de la Comunidad (áreas mediterráneas).

La evaluación de la erosión hídrica del suelo se establece mediante la integración de las características básicas de este último (textura, profundidad, pendiente y pedregosidad), del clima (erosividad de la lluvia y grado de aridez) y de la cubierta vegetal. Con estos datos se obtienen unos índices de riesgos de erosión real y de erosión potencial del suelo. El primero corresponde a las condiciones actuales de uso del suelo y del estado de la cubierta vegetal. El segundo indica la vulnerabilidad que el suelo tiene a la erosión en función de las características ambientales; se obtiene de la siguiente manera:

Fig.72.- Mapas de la erosión actual y potencial de las tierras mediterráneas de la Unión Europea, según el programa CORINE de la UE (1992)



Índice del riesgo potencial de erosión del suelo = índice de erosionabilidad x índice de erosividad x pendiente

El producto final del modelo es una cartografía a escala 1:1000000 (Fig.72) de la erosión real y potencial que, en primera aproximación al problema, es útil para identificar aquellas áreas en las que el alto riesgo de pérdida de suelo, actual y potencial, exige medidas urgentes de control de la erosión y conservación, y aquellas otras que, por los bajos índices de erosión, tanto potencial como real, no requieren medidas específicas de lucha contra la pérdida de suelo.

1998). Pueden ser de dos tipos: abiertas y cerradas. Entre las primeras, los colectores Gerlach han sido muy usados. Consisten en un canalón que recoge las escorrentías y sedimentos producidos en una ladera por una tormenta. Los datos obtenidos tienen sólo un interés parcial por no delimitarse el área contribuyente, pero si se instalan diversos colectores, sirven para conocer el mecanismo de erosión hídrica y la producción y transferencia de sedimentos a lo largo de una ladera.

Las parcelas cerradas son las más ampliamente utilizadas en todo el mundo. Suelen instalarse, en número muy variable, en campos experimentales, y tales instalaciones son, en ocasiones, bastante complejas. En España, los estudios sobre erosión del suelo tienen su antecedente en las parcelas cerradas (modelo USLE) que el profesor Carlos Roquero instaló a partir de 1959. Esta iniciativa, por diversos problemas, no tuvo continuidad hasta principios de la década de los ochenta, pero desde entonces se extendió y



Fig. 73.- Conjunto de parcelas experimentales para el registro de escorrentías, erosión del suelo y producción de sedimentos. (Cuenca de Mula, Murcia).

multiplicó este sistema de evaluar la erosión bajo diversas condiciones ambientales, notoriamente bajo las semiáridas mediterráneas.

El cerramiento de este tipo de parcelas se realiza con diversos tipos de materiales (mampostería, chapa, fibrocemento, etc.) con dimensiones y áreas confinadas variables. El modelo-tipo diseñado por Wischmeier era rectangular, con las siguientes dimensiones: longitud, 72,6 pies (22,13 m); anchura, 6 pies (1,83 m); superficie 0,01 acres (40,5 m²); pendiente, 9 % en sentido longitudinal. A partir de estas características y en función de las características del terreno, las dimensiones cubren un amplio rango; no obstante, las más utilizadas son las de 8 x 2; 10 x 2; 15 x 5; 20 x 4; 25 x 5; 20 x 10; 40 x 8 y 60 x 20. Las superficies controladas varían ampliamente, entre los 16 y los 1200 m², y en ocasiones más (Fig. 73).

Las parcelas han aportado mucha información sobre las tasas de erosión en las laderas; sin embargo, los resultados obtenidos son difíciles de extrapolar a territorios amplios con diferentes condiciones ambientales. Los cambios de escala son un problema mayor no resuelto.

b) Cuenca y microcuencas

Cuenca y microcuencas fluviales (depende de su extensión) constituyen unidades hidrológicas naturales que pueden suministrar información de calidad sobre flujos de agua y sedimentos, si cuentan con sensores adecuados. Las estaciones de aforo bien instrumentalizadas cumplen bien estos objetivos (Fig. 74). Los sedimentos transportados (en suspensión y como carga de fondo) pueden determinarse a través de una sección de control, que puede coincidir o no con la salida de la cuenca. En estas unidades hidrológicas se estudian conjuntamente los procesos erosivos, la emisión de sedimentos en suspensión y los arrastres por la corriente. Con frecuencia, también se contempla la deposición de tales mate-

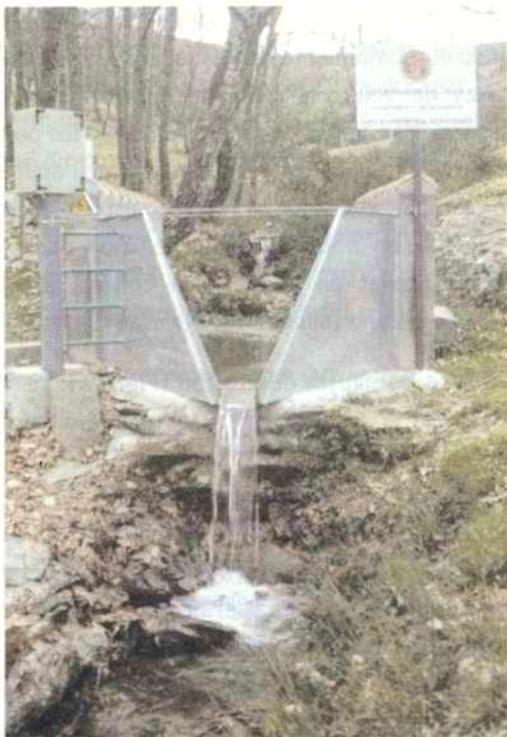


Fig. 74.- Estación de aforo en una microcuenca de estudio de erosión del suelo y producción de sedimentos (La Rinconada, Sierra de Francia, Salamanca)

riales, cuando la capacidad de transporte del flujo disminuye por debajo del límite inferior que le permite seguir manteniendo los sedimentos en suspensión.

La *degradación específica* o aporte de sedimentos (volumen de transporte sólidos y sustancias disueltas producidos y exportados) de una cuenca vertiente permite integrar gran número de datos. Son valores medios por unidad de superficie (t/ha/año), indicadores de un balance de erosión que, sin embargo, no permite distinguir con precisión los sectores de la cuenca más afectados por la erosión.

Aquellas cuencas que cuentan con embalses suelen suministrar buena información sobre la degradación específica que registran. Los embalses, sea cual fuere su capacidad, son trampas de sedimentos; por ello, si se realizan batimetrías con cierta regularidad, se pueden obtener tasas de colmatación y valores de la erosión que la cuenca registra aguas arriba de donde esté ubicada la presa (Fig. 75).

c) Experimentos con lluvia simulada

En condiciones climáticas áridas y semiáridas, la lluvia es un meteoro poco frecuente y aleatorio, así que para conocer el modo como se produce la erosión y las tasas de pérdida de suelo por unidad de superficie y con diferentes tipos de cobertura del suelo, se recurre a la lluvia simulada, con lo que no es necesario esperar a que se produzcan precipitaciones. Es una técnica ampliamente utilizada en los ambientes secos.

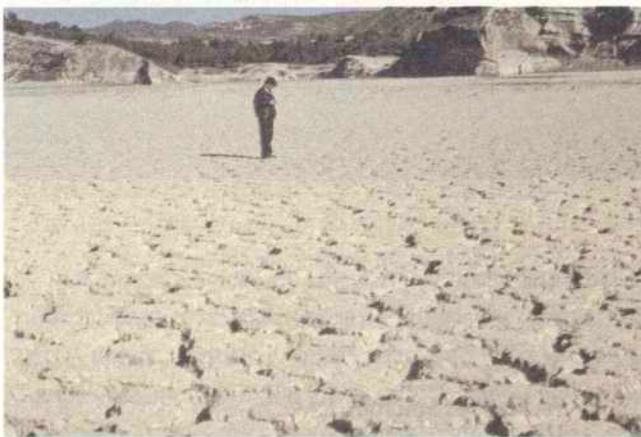


Fig. 75.- El aterramiento que sufren los embalses es un indicador de la erosión y producción de sedimentos que la cuenca vertiente registra. La vida de estas costosas obras hidráulicas puede ser corta (unas cuentas decenas de años) si las pérdidas de suelo por erosión son elevadas. (Embalse de Puentes, río Guadalentín).

La versatilidad de los simuladores de lluvia permite estudios precisos sobre erosión pluvial (por salpicadura o *splashes*) y erosión hídrica (generada por escorrentías) en ambientes con condiciones ambientales distintas (Fig. 76). Este método presenta, sin embargo, algunos inconvenientes, tales como que durante un experimento siempre se mantiene constante la intensidad (por ejemplo: 10, 30, 50, 80, 100... mm/hora), circunstancia que en un aguacero real no se da. Por otro lado, los valores no deben extrapolarse a condiciones distintas a las del experimento.



Fig.76.- La simulación de lluvias es un experimento muy difundido y valioso para conocer cómo se produce la erosión en distintos tipos de litologías y de suelos con diferentes coberturas.

d) Mediciones volumétricas

La rugosidad de la superficie del suelo suministra información de interés para conocer la formación de escorrentías y para evaluar y prevenir la erosión. El cálculo del volumen de suelo erosionado o registro volumétrico puede realizarse mediante sencillos instrumentos, como son los perfiladores microtopográficos, piquetas, varillas, estacas,

clavos y agujas de erosión. Las tasas de erosión se evalúan analizando el rebajamiento de una ladera o de un suelo, las variaciones de volumen y las microformas resultantes. Tanto las técnicas de agujas de erosión como los perfiladores constituyen metodologías de rápida y fácil aplicación y de bajo costo (Sancho *et al.*, 1991). Son especialmente útiles al aplicarlas en áreas de rápida evolución, como son las áreas abarrancadas en laderas con cultivos arbóreos y arbustivos de secano (almendros, olivos, viñedos).

Mediante las agujas de erosión (Fig.77a), se pueden obtener datos que representan las variaciones medias de rebajamiento y/o acreción de la superficie, así como modificaciones de micromodelados. Sin embargo, el perfilador microtopográfico (Fig. 77b) registra con mayor precisión los cambios de microformas; son muy útiles para obtener perfiles seriados de regatos, surcos y pequeñas cárcavas y para conocer su evolución en el tiempo. Ambas técnicas son complementarias y su utilización conjunta permite apreciar con bastante rigor las tasas de erosión y las modificaciones temporales del microrrelieve en breves períodos de tiempo (Sancho *et al.*, 1991; Benito *et al.*, 1991); además, en algunos casos pueden servir como modelos que permitan la extrapolación de la evolución de las geoformas a escalas espaciales y temporales más amplias.

e) La técnica del Cs 137

La técnica del cesio 137, basada en un método de aplicación física universal, presenta un gran interés para cuantificar la erosión. Las radiaciones gamma emitidas por diversos radionucleidos han sido usadas frecuentemente para estudios de erosión del suelo, sedimentos transportados y depositados. Esta técnica de evaluación de la erosión utiliza, sobre todo, el isótopo

Cs 137 (vida media de 30,2 años), producido por las pruebas termonucleares realizadas entre 1954 y 1983, y también el liberado por el accidente nuclear en la ciudad ucraniana de Chernobil en 1996. Este radioisótopo, reconocido como un trazador efectivo del movimiento del suelo (Ritchie y McHenry, 1990), se distribuyó por toda la atmósfera y, posteriormente, fue arrastrado y depositado en la superficie terrestre por las precipitaciones y acumulado en el perfil del suelo.

El uso de esta técnica asume que la incorporación del Cs 137 en el sedimento es rápida y que la migración postdeposición es insignificante. En la mayoría de los ambientes está fuertemente ligado a los minerales de arcilla y a la materia orgánica del suelo. Las velocidades de erosión y depósito en un área y la proporción de suelo erosionado transportado fuera de ella se pueden determinar si se establece una relación cuantitativa entre la pérdida y la ganancia de Cs137 y la cantidad de erosión y depósito (Navas, 1995).

El potencial de utilización de la técnica del Cs137, a la que se recurre profusamente en Estados Unidos, Australia y Europa, permite identificar y comparar las áreas con erosión activa o más sensibles al proceso, que a su vez son fuentes de sedimentos, con aquellas otras sin erosión. Permite discriminar los tipos de usos del suelo y las perturbaciones introducidas por las técnicas de laboreo, cuantificar y determinar la **velocidad de erosión** o de depósito de sedimentos, determinar los balances de sedimentos a escala de cuenca, calcular las tasas de sedimentos acumulados en las llanuras aluviales, lagos y zonas húmedas, valorar la relativa importancia individual de los procesos de erosión por escorrentías laminares y flujos concentrados en surcos y cárcavas. Por último, puede ser utilizada para la formulación y validación de modelos de erosión.



Fig. 77 - Aguja de erosión y perfiladores microtopográficos. a) La sencilla técnica de las agujas, varillas, piquetas o estacas de erosión es útil para medir pequeños cambios en la superficie del suelo, bien por rebajamiento (erosión) o por acreción (acumulación de sedimentos); b) El perfilador microtopográfico permite obtener perfiles de cauces de diversa envergadura y hacer estimaciones sobre tasas de erosión hídrica.

Mediciones indirectas: los modelos

La modelización es una de las principales herramientas para investigar la erosión hídrica y para planificar y diseñar políticas adecuadas de conservación de suelos. Las metodologías desarrolladas han evolucionado desde formulaciones meramente descriptivas, que sirvieron para identificar causas y efectos de la erosión, hasta modelos matemáticos muy complejos basados en las leyes físicas que rigen los procesos integrados en el fenómeno erosivo, pasando por ecuaciones empíricas que, con un fundamento físico, determinan los valores de pérdida de suelo de modo experimental.

Los modelos son sistemas artificiales contruidos mediante analogías con los sistemas reales, son representaciones simplificadas de la realidad extraordinariamente útiles para el análisis, comprensión y gestión de los sistemas naturales. El *modelo* imita un fenómeno natural del que interesa hacer predicciones acerca de su comportamiento, de un modo más efectivo que si se observara el sistema real. Esta efectividad obliga a una simplificación de los componentes del sistema y de sus relaciones, simplificaciones que, a veces, van en detrimento de la exactitud de los resultados obtenidos (Castillo, 1992). En el caso de sistemas muy complejos, como son los sistemas naturales, la utilización de modelos matemáticos empíricos presenta importantes inconvenientes, sobre todo cuando se quieren extrapolar las conclusiones extraídas a condiciones diferentes de aquellas para las que han sido diseñados y validados.

En general, el modelo debe responder a un objetivo, ajustarse a los datos disponibles de la realidad y responder a las necesidades de los usuarios. En el caso particular de los modelos de erosión, su desarrollo y su evolución han estado influenciados por la expansión de los ordenadores, ya que la informática ayuda a manejar grandes volúmenes de datos requeridos por la modelización de la erosión: topografía, geología, geomorfología, escorrentías, sistemas de drenaje, suelos, cubierta vegetal, usos del suelo, etc.

Existe una gran variedad de modelos para el estudio de la erosión por agua, fruto de la labor investigadora de las últimas décadas. Los planteamientos conceptuales son cada vez más rigurosos, pero a la vez demandan mayores cantidades de información. Por otro lado, la aplicación práctica para la resolución de problemas de conservación de suelos bajo diferentes condiciones biofísicas y socioeconómicas de uso, hasta el presente no deja de ser una aproximación, en ocasiones, distante de la realidad.

Para comprender el mecanismo de funcionamiento de los modelos, se recurre a la clasificación de los mismos atendiendo a criterios que describen aspectos importantes de los parámetros y variables que se identifican. En los estudios sobre erosión, se suelen manejar diversos criterios para clasificar los tipos de modelos:

Atendiendo a la base del modelo:

1. *Empíricos*. También llamados modelos de función respuesta, como son las ecuaciones de regresión lineal. Se sustentan en la identificación de relaciones estadísticamente significativas entre ciertas variables que se asumen como esenciales y suficientes para modelar el comportamiento del sistema.

2. *De base física*. Elaborados con ecuaciones matemáticas complejas derivadas de leyes físicas. Tratan de describir los procesos involucrados en el modelo, teniendo en cuenta las leyes de conservación de masa y energía. Una de las ventajas de estos modelos frente a otros es que la mayoría de los parámetros incluidos en los **algoritmos** son variables físicas y, en consecuencia, no precisan calibración.

Con relación a su aleatoriedad:

1. *Deterministas*. Se basan en la suposición de que un dato de entrada dado produce siempre un mismo resultado, de modo que no se considera la existencia de aleatoriedad.

2. *Estocásticos*. Cuando los resultados son, al menos, parcialmente aleatorios.

Considerando la distribución de variables en el espacio:

1. *Agregados*. Cuando las variables que definen el sistema analizado son promediadas en el espacio, o bien los

cálculos se efectúan para un punto único, sin dimensiones en el espacio. En los estudios sobre erosión, no consideran ni la distribución espacial de las variables de entrada ni la variación en el espacio de los parámetros y variables de las ecuaciones que se utilizan para modelizar los procesos físicos implicados.

2. *Distribuidos*. Si se conoce la distribución espacial y temporal de las variables de entrada y salida, se pueden calcular en función del espacio y del tiempo. Los sistemas de información geográfica, la geoestadística y otras herramientas informáticas han tenido gran influencia en el desarrollo de este tipo de modelos, ya que permiten trabajar con grandes volúmenes de datos de entrada. En los estudios sobre escorrentías y erosión, este tipo de modelos incorporan datos concernientes a la distribución espacial de variables y parámetros, así como algoritmos que permiten evaluar la influencia que tienen las características espaciales en el comportamiento de los procesos simulados.

En relación a la duración en el tiempo:

1. *Continuos*. Cuando el modelo simula largos períodos de tiempo las variables estudiadas. Se admite que la precisión de las condiciones iniciales tenga menos importancia. Estos modelos pretenden representar la evolución del sistema sin interrupción durante largos períodos de tiempo y sin tener en cuenta las características individuales de cada tormenta o aguacero.

2. *Eventos*. Simulan variables tales como la escorrentía, la erosión por golpeteo y la erosión en regueros, en intervalos de tiempo cortos, es decir, durante un episodio tormentoso o inmediatamente después. Estos modelos permiten caracterizar la respuesta hidrológica y la pérdida de suelo tras un aguacero de duración, volumen e intensidad determinadas. En estos casos es

muy importante conocer, con precisión, las condiciones iniciales de la ladera y el suelo.

Otras clasificaciones, más simples, suelen agrupar a los modelos en tres grandes conjuntos:

1. *Modelos estadísticos*. La bondad del ajuste se determina por medio de la estadística;

2. *Modelos paramétricos*. Intentan representar las relaciones entre *variables* (propiedades mensurables del sistema cuyas magnitudes varían en el tiempo) y *parámetros* (cantidades temporalmente invariables que caracterizan el sistema). Estos modelos son formulaciones empíricas que relacionan los factores ambientales con la pérdida de suelo y producción de sedimentos. Su uso generalizado y con frecuencia indiscriminado, con independencia de las condiciones específicas para las que se desarrollaron, puede dar resultados desviados de la realidad.

3. *Modelos físicos*. Tratan de emular el comportamiento del sistema natural que se desea estudiar. Se basan en el análisis de los procesos que ocasionan la erosión y producción de sedimentos. Se validan con mediciones y datos del sistema natural y se simula la respuesta del sistema, el de erosión en este caso, a modificaciones en los factores que lo controlan.

Lo normal es que los diferentes modelos estén elaborados por distintos enfoques metodológicos y que dirijan sus soluciones a objetivos o alternativas concretas. En este sentido, tres tipos de análisis pueden realizarse: *Caja negra* (estocásticos o inductivos puros) si sólo se estudian y conocen las entradas y salidas principales de materia y energía en el sistema, sin conocer como actúa y evoluciona el proceso. *Caja blanca* (deterministas o deductivos), si se conocen y explican todos los detalles del comportamiento del

sistema. *Caja gris* (mixto), si sólo se conocen algunos de los procesos desencadenados por las entradas de materia y energía en el comportamiento del sistema (Fig. 78). En función del objetivo que se desea conseguir, del grado de detalle requerido y de la información disponible para alimentar al modelo, se hace la elección del mismo. La mayoría de los modelos de hidrología (como ocurre con el binomio lluvias-escorrentías en una cuenca) y erosión del suelo pertenecen al grupo de caja gris.

El uso de modelos ha mostrado ser una poderosa herramienta predictiva de la erosión. Con ellos se puede estimar una amplia gama de aspectos relacionados con el proceso: conocer los complejos mecanismos de la erosión e identificar las variables que controlan el fenómeno; estimar las consecuencias de los procesos erosivos; evaluar pérdidas de suelo y predecir tasas de erosión; determinar los límites tolerables de pérdida de suelo; detectar las áreas problema, es decir, aquellas que registran pérdidas de suelo no admisibles; evaluar la superficie afectada por la erosión; integrar diversos procesos hidrológicos y erosivos; evaluar erosiones en cauces y zonas inundadas; evaluar la erosión en cuencas

hidrográficas; estimar la vida útil de un embalse cuya cuenca de recepción registre una erosión más o menos intensa; la localización de aquellas áreas más vulnerables a la erosión en una cuenca hidrográfica para efectuar medidas de corrección; ordenar y seleccionar los usos del suelo aconsejables para minimizar la erosión en un territorio o cuenca; proponer actuaciones de previsión, recuperación y conservación de suelos para una gestión sostenible de ecosistemas y agrosistemas, y estimar la erosión potencial que puede registrar un territorio en función de las características biofísicas y socioeconómicas.

Los modelos tienen muchas ventajas, pero también limitaciones; algunos problemas que plantea la erosión no tienen, por ahora, respuesta satisfactoria. En definitiva, la utilidad y el alcance de un modelo depende de: los objetivos y la amplitud que pretenda abarcar; los parámetros variables y coeficientes que utilice; el rigor en las mediciones de estos parámetros y variables; la disponibilidad de datos de aforos y otro tipo de información obtenida en las mediciones prácticas de campo y los coeficientes de ajuste obtenidos de la experiencia.

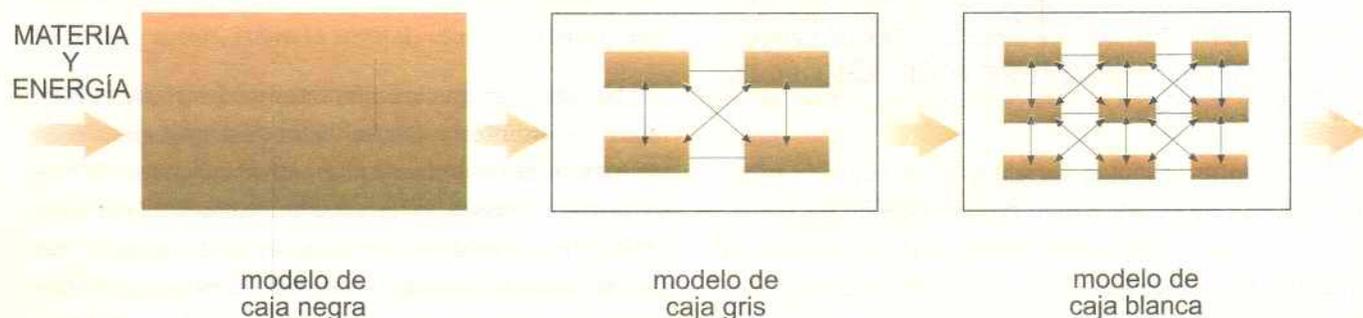


Fig. 78. - Tipos de modelos en función del grado de conocimiento de los procesos que intervienen

Los modelos más conocidos para evaluar la erosión en el marco de cada uno de los tres grandes grupos son:

a) Ejemplo de modelo estadístico

El método estadístico más sencillo y generalizado para la evaluación directa de la degradación específica de una cuenca hidrográfica es el de Fournier (1960). Tras haber estudiado numerosas cuencas de más de 2000 km² por todo el mundo, este modelo establece como parámetros representativos del fenómeno de la erosión hídrica el clima y el relieve:

1. *Índice de agresividad del clima*, definido por la relación p^2/P ; siendo p la precipitación en mm del mes más lluvioso del año y P la precipitación total anual (mm). Esta evaluación del factor climático se complementa con el tipo de clima de la cuenca, utilizando la **clasificación de Turc**;

2. Para el relieve se emplea el *coeficiente orográfico*, expresado por $h \cdot tg \alpha$ siendo h la altura media del relieve de la cuenca en metros y $tg \alpha$ el coeficiente de masividad de Martonne ($tg \alpha = h/S$, siendo S la proyección horizontal de la superficie de la cuenca en km²). El coeficiente de masividad de Martonne es el resultado de dividir la altura media de una cuenca fluvial o hidrográfica por su superficie; alcanza sus mayores valores en cuencas pequeñas que presentan grandes desniveles topográficos, y los menores en cuencas grandes de topografía suave. Tras evaluar estos parámetros y aplicar varias ecuaciones de regresión se llega a la expresión de la degradación específica que registra la cuenca (cantidad de sedimentos producidos por unidad de superficie y tiempo):

$$De = 0,0275 (p^2/P)^{2,65} \cdot (h \cdot tg \alpha)^{0,46} \text{ t/km}^2 \text{ año}$$

en la que se puede comprobar la importancia que el factor precipitación tiene en los procesos de erosión de una cuen-

ca, ya que el parámetro que lo define (índice de agresividad del clima) aparece afectado por un exponente más de cinco veces superior al factor relieve (coeficiente orográfico). La expresión más conocida del índice de agresividad climática de Fournier (F) es:

$$F = p^2/P$$

este factor debe aplicarse a cuencas grandes (con superficies superiores a dos mil kilómetros cuadrados). Si se aplica en condiciones climáticas semiáridas, es aconsejable hacerlo de año a año y no con valores medios plurianuales, con el fin de atenuar las fuertes variaciones estacionales que se registran en aquellos ambientes.

b) Ejemplo de modelo paramétrico

A pesar de la polémica que ha suscitado, el modelo de predicción de pérdida de suelo con mayor aceptación y de más amplia utilización es la ecuación universal de pérdida de suelo (Universal Soil Loss Equation, USLE). Puede considerarse como el más representativo de los modelos de evaluación de la erosión. Es un modelo empírico basado en los datos proporcionados por más de 10000 parcelas repartidas por un gran número de localidades de los Estados Unidos, en terrenos agrícolas con distintas características de clima, suelo, relieve y cultivo. Las dimensiones de las parcelas eran reducidas y estaban sometidas, exclusivamente, a procesos de erosión hídrica laminar y en regueros; no considera estados de erosión más avanzados, tales como la erosión en cárcavas, barrancos, erosiones en masa y en cauces, y no estima el transporte de sedimentos a través de la red fluvial. El modelo tiene, pues, limitaciones, que siempre han de tenerse en cuenta. Además, la evaluación de los parámetros es experimental, por lo que su extrapolación a condiciones ambientales diferentes es problemática.

Wischmeier y Smith investigaron cuidadosamente la importancia y significación de los parámetros que intervienen en la USLE, ecuación que ha ido perfeccionándose de forma continua hasta tiempos recientes. Por ello, la fiabilidad de este modelo paramétrico depende del rigor con que los seis multiplicandos que componen la ecuación reproduzcan las condiciones del medio (Almorox *et al.*, 1994). El modelo es sencillo y de fácil aplicación, de ahí su enorme atractivo. La formulación que presenta es:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

siendo

A, la pérdida de suelo, en (t/ha.año)

R, el factor de erosividad de las precipitaciones o índice de erosión pluvial, en (J.cm/m².hora)

K, el factor de erosionabilidad del suelo, en (t.m².hora/ha.J.cm)

L, el factor longitud de la ladera

S, el factor pendiente de la ladera

C, el factor cubierta vegetal, cultivos y manejo del suelo

P, el factor de control de la erosión mediante prácticas de conservación

El cálculo de cada uno de estos factores es laborioso y con frecuencia complejo. De modo muy resumido:

1. **La erosividad de las lluvias (R)** representa la potencia del aguacero para erosionar el suelo. Es un índice de torrencialidad. Viene definida como el producto de la energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad en 30 minutos, dividido por cien;

2. **La erosionabilidad (K)** expresa la susceptibilidad y respuesta del suelo al proceso de erosión, o sea, determina la pérdida media de suelo por unidad de erosividad. Su valor numérico manifiesta la aptitud potencial del suelo ante el fenómeno erosivo en relación con su **tolerancia**, sin considerar prácticas de conservación. Su cálculo es costoso y complicado, ya que la erosionabilidad de un suelo varía de acuerdo con los siguientes factores: textura, temperatura, contenido en humedad, tipo de labores agrícolas, contenido en materia orgánica, cubierta vegetal y microfauna. Por ello, hay que recurrir, bien a medidas experimentales en parcelas durante largos períodos de tiempo, con el fin de minimizar la variabilidad temporal de la frecuencia e intensidad de los eventos lluviosos, bien a ecuaciones de regresión múltiples formuladas a partir de las propiedades físicas y químicas del suelo expresadas en nomogramas;

3. **Factor topográfico (L S)**. Bajo esta denominación suelen reunirse los dos factores que integran el efecto del relieve en la pérdida de suelo (longitud y pendiente de la ladera). Se calcula aplicando una ecuación obtenida por Wischmeier y Smith (1978) del análisis estadístico de los datos en laderas de pendiente uniforme y con el mismo tipo de suelo y vegetación. En el caso de pendientes irregulares o cambiantes a lo largo de la ladera, deben utilizarse factores correctores propuestos por Foster y Wischmeier (1975) o utilizar otras formulaciones que pueden encontrarse en la bibliografía especializada;

4. **Factor cubierta vegetal, cultivos y manejos del suelo (C)**. Es un factor de compleja determinación, ya que depende de la secuencia y el tipo de cultivo, de su eficacia para proteger el suelo y de las prácticas de manejo que se llevan a cabo en las distintas tareas. Se define como la relación entre el valor medio de las pérdidas de suelo en un campo cultivado o con vegetación y las que se pierden en

una parcela en barbecho continuo, en idénticas condiciones de lluvia, suelo y topografía para ambas situaciones. Tienen importancia los estados del suelo y de la cubierta vegetal en el momento de producirse las lluvias. Este factor se determina experimentalmente para cada estación o período vegetativo más significativo a lo largo del año; se definen cinco períodos:

período F: labores preparatorias para la siembra: barbecho;

período 1: siembra y hasta que el cultivo haya desarrollado una cubierta del 10 %, aproximadamente un mes después de la siembra;

período 2: establecimiento, desde el final del período anterior, hasta que el cultivo alcanza el 50 % de la cubierta;

período 3: período vegetativo de crecimiento y maduración, desde el final de período anterior hasta la recolección;

período 4: rastrojo que se mantiene desde la cosecha hasta la labranza para un nuevo cultivo.

Los valores C para cada uno de estos períodos y para los distintos cultivos, secuencias de rotación, productividad y formas de manejo, deducidos de experiencias realizadas para cada caso, se obtienen de las tablas publicadas por Wischmeier en manuales de agricultura y pueden ser utilizadas siempre que haya similitud de características en cultivo y manejo (Mintegui, 1985). Para cubiertas de vegetación natural, pastizales, matorral, formaciones arbustivas y arbóreas, se han publicado, también, tablas de los valores C, obtenidos en experimentaciones de campo. En España, el ICONA (1988) propuso unas adaptaciones de estas tablas, y Moreira (1991), otra interesante adaptación aplicada a las

alternativas de uso y cubierta vegetal del sector central del valle del Guadalquivir.

Por otro lado, Almorox y otros (1994) realizan una útil recopilación de diversas tablas propuestas por distintos autores, con porcentajes de pérdida de suelo para diferentes rotaciones de cultivo y manejo, permanencia de cultivos y tipos de operaciones, pérdidas de suelo en barbecho, valores de C para usos forestales, arbustivos, pastos y terrenos baldíos, etc., así como otros métodos de evaluación de C.

Factor prácticas de conservación (P). Este factor expresa la relación entre la cantidad de suelo erosionado, utilizando prácticas de conservación, y el suelo que se perdería labrando en el sentido de la máxima pendiente. Como prácticas de conservación, se consideran los cultivos a nivel, cultivos en fajas y cultivos en terrazas. Otras prácticas conservacionistas, tales como la rotación de cultivos herbáceos, uso de cubiertas artificiales, empleo de fertilizantes, etc., se consideran dentro del factor C como labores propias de los cultivos y manejo del suelo. Los valores de P fueron calculados experimentalmente por Wischmeier y Smith (1978) para distintas prácticas de conservación y en diferentes pendientes de ladera.

Al aplicar la USLE, conviene tener en cuenta que, pese al calificativo de *universal*, es sólo un modelo de estimación de la erosión hídrica laminar y en regueros, por lo que su aplicación a grandes superficies con condiciones diferentes a las de su diseño suele dar valores más abultados que los obtenidos directamente en el campo, sobre todo en condiciones mediterráneas. No obstante, es un modelo generalizado y útil para estimar la degradación del suelo por procesos de erosión hídrica, para la cartografía del riesgo y para la planificación y ordenación del territorio en áreas amenazadas.

c) Ejemplo de modelos físicos

Los modelos físicos son modelos matemáticos que describen los procesos de erosión, transporte y sedimentación mediante ecuaciones que describen los procesos. Son modelos predictivos de procesos-respuesta, es decir, que toda causa (el fenómeno erosivo) tiene una repercusión o consecuencia que se plasma en el sistema natural o humanizado (degradación, sedimentación...). Estos modelos registraron un gran impulso a partir de la década de 1980, siendo los más conocidos los desarrollados en el marco de los proyectos ANSWERS-Areal (Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation; Beasley *et al.*, 1981); CREAMS (Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems; Knisel, 1980); WEPP (*Water Erosion Prediction Project*; Foster y Lane, 1987); EUROSEM (*European Soil Erosion Model*; Morgan *et al.*, 1998); LISEM (Limburg Soil Erosion Model; De Roo *et al.*, 1995, 1996) y MEDALUS (*Mediterranean Desertification and Land Use*; Brandt y Thornes, 1996; Kirkby *et al.*, 1996), este último de particular importancia para las condiciones mediterráneas.

El modelo europeo de erosión del suelo (EUROSEM) es un modelo de predicción de las pérdidas de suelo por erosión hídrica con base física cuyo diseño parte de unas consideraciones previas: a) el modelo debe ser capaz de valuar los riesgos de pérdida de suelo por erosión; b) debe ser operativo a diferentes escalas espaciales; c) debe proporcionar estimaciones reales de las pérdidas de suelo que permitan compararlas con los niveles estándares de tolerancia y establecer las necesidades de implantar medidas de control; d) debe ser útil para analizar los efectos indirectos de la erosión; y e) debe facilitar el diseño y comparación de las distintas alternativas de conservación de suelos (Chisci y Morgan, 1988; Morgan *et al.*, 1999).

El modelo simula eventos simples y permite predecir la erosión del suelo por el agua a escala de parcela o de cuenca, así como evaluar la eficacia de las medidas de protección y conservación del suelo. Tiene una estructura tipo modular (Fig. 79), con capacidad para profundizar en el conocimiento e incorporar nuevos módulos en versiones posteriores conforme se vaya ampliando el conocimiento de los complejos procesos de erosión.

d) Otros modelos derivados de la USLE

Al introducir otros métodos de estimación de los diferentes factores del modelo USLE, se obtuvo una versión revisada: la RUSLE (Dissmeyer y Foster, 1983). Y al tratar de extender la USLE a las cuencas hidrográficas, se obtuvieron una serie de expresiones matemáticas incluidas en lo que se ha denominado *modificaciones de la ecuación universal de pérdidas de suelo (Modified Universal Soil Loss Equation; MUSLE)*. Este modelo, diseñado a partir de los datos suministrados por 18 cuencas, evalúa las pérdidas de suelo y volumen de sedimentos producidos en una cuenca hidrográfica, a través de la red de drenaje, durante un episodio lluvioso. La pérdida total anual de suelo y sedimentos liberados será la suma de todos los aguaceros registrados en el año.

La expresión de la MUSLE (Williams, 1975; Williams y Berndt, 1977) es:

$$Y = 11,78 (Qq_p)^{0,56} K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

donde

Y: sedimentos producidos por una tormenta aislada (t);

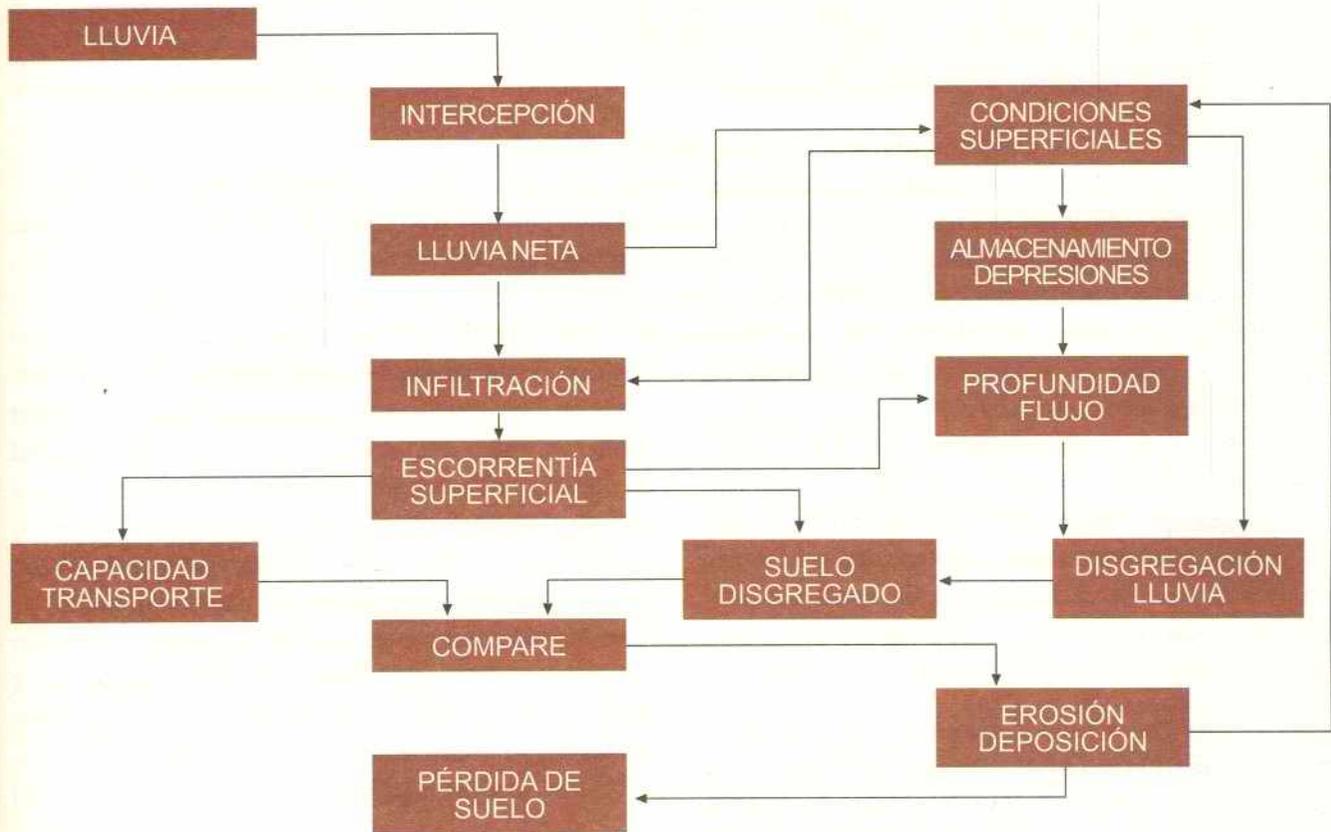
Q: volumen de escorrentía (m³);

q_p: caudal máximo instantáneo o caudal punta (m³/sg);

K: erosionabilidad del suelo (t/ha).(m².hora/hJ.cm);

L·S: factor topográfico;

Fig. 79.- Modelo EUROSEM.



C: factor de cultivo;

P: factor prácticas de conservación del suelo.

Dos son los enfoques diferenciadores de la MUSLE respecto de la USLE: la destacada importancia que tiene la escorrentía en la determinación de la global de la capacidad erosiva del aguacero y que la unidad de estudio y actuación es la cuenca fluvial, y dentro de ella, los caudales de avenida resultan de la suma de los caudales parcia-

les de las diferentes subcuencas que integran la cuenca principal objeto de estudio. El modelo ofrece algunas dificultades, como es el cálculo del volumen de escorrentía y el caudal máximo instantáneo si la cuenca carece de estación de aforo. Por otro lado, su aplicación es problemática, pues integra factores variables y superficies heterogéneas que registran respuestas hidrológicas y erosivas distintas, sobre todo en cuencas grandes. No obstante, como en el



caso de la USLE, es un método que presenta gran interés, puesto que permite estimar la degradación específica, la emisión de sedimentos y la erosión total de una cuenca, además de facilitar el diseño de obras hidrológicas de corrección y lucha contra la erosión.

En España, el proyecto de *lucha contra la desertificación en el Mediterráneo español* (LUCDEME) del ICONA, durante los pasados años ochenta y principios de los noventa, adaptó y aplicó la USLE y la MUSLE a las grandes cuencas hidrográficas españolas, dando como resultado unas memorias y cartografías específicas para cada una de ellas.

7

La erosión del suelo en España

El suelo constituye la base funcional de los ecosistemas terrestres y además es el soporte físico de casi todas las actividades humanas. Requiere muchos años para formarse, por ello se le considera un recurso natural no renovable en gran parte de las tierras emergidas del planeta. Cuidar el buen desempeño de las funciones productivas y ambientales del suelo es imprescindible para el desarrollo durable. En aquellos **▶ biomas** que mantienen una cubierta vegetal importante y unas condiciones naturales respetadas, el proceso de edafogénesis y regeneración del suelo suele ser más rápido que la erosión. En estos ambientes, el suelo es un recurso renovable. Sin embargo, cuando los factores naturales de formación del suelo no son favorables, el riesgo de erosión alto y la tolerancia baja, como en las regiones áridas y semiáridas, y la gestión y uso del suelo y la vegetación son con frecuencia inadecuados, el recurso se hace no renovable y su pérdida es para siempre.

De modo general, una tasa de 1 kg/m^2 (10 t/ha.año) se acepta ampliamente como la máxima pérdida anual de suelo que es tolerable (Mitchell y Bubenzer, 1980; FAO, 1988; Mintegui *et al.*, 1993); mantener la pérdida de suelo por debajo de esta tasa significa que la formación de nuevo suelo puede reemplazar al perdido sin mermar la productividad. Este valor, sin embargo, parece alto a un buen número de expertos; por ello, a menudo se utilizan valores máximos más bajos. Por ejemplo, en aquellas áreas, como las mediterráneas, donde los suelos son delgados y se forman lentamente, el máximo admisible es de $0,5$

$\text{kg/m}^2/\text{año}$ (Smith y Stamey, 1965) y de $0,2 \text{ kg/m}^2/\text{año}$ en aquellos espacios donde los suelos son erosionados severamente (Hudson, 1971). Otras investigaciones realizadas en Europa establecen que la mayor parte de los suelos cultivados presentan un umbral de tolerancia de alrededor de $0,1 \text{ kg/m}^2/\text{año}$ (Graziani, 1987), es decir, 1 tm/ha/año . Tasas de pérdida de suelo en tierras agrícolas comprendidas entre $4,5$ y $45,0 \text{ kg/m}^2/\text{año}$ son clasificadas como de erosión acelerada (Morgan, 1986). Estas tasas de referencia son ampliamente superadas en muchas regiones del mundo, en particular en el ámbito semiárido mediterráneo. Suele aceptarse que la degradación del suelo es irreversible, cuando una generación (25 años) no es capaz de rehabilitar el deterioro que se ha causado en un tiempo igual.

Los daños causados por la erosión del suelo son por lo general difíciles de reparar, tanto por el tiempo requerido como por los altos costos. A veces, incluso son imposibles de corregir por el carácter irreversible de algunos procesos de degradación. Por ello, toda estrategia o plan que tenga por objetivo proteger recursos escasos y finitos como son el suelo, el agua y la vegetación debería ser más de carácter

▶ Glosario

Bioma. Unidad de clasificación del paisaje según criterios climáticos y de predominio de una o otra formación vegetal. Ejemplos: desierto, bosque caducifolio, selva tropical, etc.

preventivo que curativo. El uso correcto de los recursos es el mejor medio para su conservación y evitar su degradación y pérdida.

El caso español

En el territorio español, los fenómenos de erosión de los suelos por la lluvia y las escorrentías que ésta genera, han constituido un serio problema, en particular allá donde el vigor del relieve o la agresividad del clima han creado condiciones particularmente favorables. Sin embargo, las mayores crisis erosivas, en el pasado lejano y en el reciente, han estado ligadas, por un lado, a las deforestaciones y roturaciones para extender las superficies cultivadas en los períodos de prosperidad, crecimiento demográfico y expansión urbana, y, por otro, al abandono y regresión de los cultivos en muchas tierras arables, en períodos de guerras, grandes epidemias y depreciación de la tierras y sus productos.

Es conocido que los suelos ibéricos han registrado crisis erosivas y de desertificación desde tiempos prerromanos. La dominación romana de Hispania supuso una importante merma en la superficie arbolada (Rubio, 1987) para extender los campos de cereales y para atender el comercio con Roma, que exigía importantes recursos madereros para la construcción de embarcaciones y para los hornos de cerámica donde se obtenían las ánforas que, llenas de aceite y vino, eran enviadas a la urbe.

Las invasiones, continuas guerras y la táctica de la tierra quemada durante la Edad Media, especialmente durante la Reconquista cristiana, de casi ocho siglos de duración, tuvieron desastrosos efectos sobre los montes de la penín-

sula. La expresión castellana *emboscada* significa el ataque por sorpresa desde los tupidos bosques en donde se podía esconder el adversario. Para evitar emboscadas, se talaron, roturaban o quemaban los bosques. Además, la caballería podía operar mejor en terreno abierto, sin árboles. La deforestación de las tierras castellanas de Toro y de Campos se debe, en gran parte, al rey Alfonso I de Asturias (739-757). La *Crónica de Albelda* relata que las tropas del rey, después de una expedición contra los musulmanes, "convirtieron la tierra en un yermo hasta el Duero".

Otro período crítico de embate al bosque se registra en el último tercio del siglo XV y durante el XVI, con el auge que adquirió el Honrado Consejo de la Mesta, según Ley de 1501 promulgada por los Reyes Católicos. Esta ley impulsó el auge de la ganadería lanar e industrial trashumante de ella derivada, pero al mismo tiempo dañó la agricultura y los bosques. Las disposiciones dictadas produjeron un efecto catastrófico para la agricultura y para la cubierta vegetal. Fue un momento decisivo para la historia forestal de España y para la desolación de extensos territorios forestales del reino (Klein, 1936, Bauer, 1991). A la Mesta se le concedieron vastas extensiones de territorio en Andalucía, Extremadura y Castilla. El suelo, privado de la vegetación por roturaciones y perjudicado por el fuego para obtener mejores pastos, quedó desnudo, degradándose a consecuencia de la erosión y por el endurecimiento y compactación ocasionados por el pisoteo de los grandes rebaños. La expulsión de los moriscos, también en el XVI, provocó el abandono de los campos de cultivo, que sin los cuidados necesarios para la conservación del suelo fueron deteriorados por la erosión hídrica.

En las *Relaciones de los pueblos de España*, cuya realización fue ordenada por Felipe II entre 1570 y 1580, se hallan cuestiones referentes a los bosques, en las que

se constata que en la mayoría de las provincias de Madrid y Toledo escaseaba la leña. La madera para la construcción había que traerla de Cuenca, Segovia y otras provincias donde la masa forestal aún no estaba excesivamente esquilmada. A pesar de ello, Felipe II y sus sucesores siguieron dando facilidades para roturar bosque a favor de la ganadería de ovejas y cabras; el suelo sufría las consecuencias. La acusada disminución de la cubierta vegetal desencadenó una fuerte erosión en las laderas de los montes y violentas inundaciones, sobre todo en la vertiente mediterránea.

Durante el siglo XVIII, la política forestal de los Borbones estuvo influida por el deseo de fomentar las marinas de guerra y mercante; dictaron disposiciones y leyes con el fin de conservar y remediar los daños en los montes de marina y plantar árboles. Los montes particulares o de comunidades tenían que ser cuidados y conservados como los comunes y reales. Sin embargo, estas disposiciones no pudieron solucionar el problema forestal. Los bosques continuaron disminuyendo a causa del aumento de la población y de las necesidades de madera y leña. La política marítima de los Borbones demandaba grandes cantidades de madera, sobre todo de la mejor clase (roble, haya, pino, castaño, nogal, álamo negro...), y la minería, la metalurgia y las herrerías exigían abultadas masas de madera y carbón vegetal. Además, como el estado no facilitaba dinero con destino al establecimiento de viveros indispensables para repoblar y pagaba mal a los empleados de los montes, parte de la población rural cortaba clandestinamente la madera de viejas y nuevas plantaciones para venderla (Bauer, 1991). La desaparición de grandes extensiones de bosque y su conversión en baldíos activaron, una vez más, los procesos de erosión y degradación de los suelos, así como la frecuencia y las afecciones del desbordamiento de los ríos y sus correlativas inundaciones. Sólo en las montañas más

altas y alejadas de las ciudades y del litoral se conservaban respetables masas forestales.

En el siglo XIX, las guerras napoleónicas dañaron severamente el bosque por talas fraudulentas y usurpaciones de montes públicos. La *desamortización*, iniciada por las leyes liberales de 1812 y 1820-1823 y, sobre todo, las de 1837, 1855 y 1859-1862, ordenaron la venta a particulares y la roturación de montes comunes, de propios, de realengos (montes públicos y de las comunidades) y de la iglesia, que en gran parte era superficie de bosques, dehesas y pastos. Fue sobre todo la burguesía adinerada la que se aprovechó de la venta, talando los bosques y creando nuevos y vastos latifundios, a la vez que el número de braceros aumentaba y la incertidumbre y desasosiego crecían en la población rural. La consecuencia de la desamortización fue la destrucción forestal más grave de toda la historia de España. Miles de hectáreas de suelo cubierto por bosques fueron devastadas por los nuevos propietarios de los montes, que buscaron el mayor beneficio en el más corto plazo; más de cuatro millones de hectáreas desaparecieron (Bauer, 1991). La venta de montes públicos y de la iglesia hicieron de España uno de los países con más baja proporción de propiedad forestal pública. Esta falta de montes públicos iba a tener importantes consecuencias en las políticas de reforestación de la segunda mitad del siglo XX.

Por otro lado, la fuerte presión demográfica del XIX, que estimuló la expansión de las superficies dedicadas a los cereales para satisfacer sus necesidades crecientes, y el aumento del ganado ovino y caprino, entre cuyas funciones se hallaba la de contribuir a la fertilidad de las zonas cultivadas, dejaron vastas superficies de suelo desnudo y expuesto a procesos de erosión que arrastraron millones de toneladas de sedimentos, además de incrementar las escorrentías y la gravedad de las inundaciones en los años siguientes,

como las registradas en 1869 y 1982 en el río Júcar; 1879, 1948 y 1982 en el río Segura; 1957 y 1982 en el río Turia; 1962 en el río Llobregat; 1973 en el río Guadalentín, además de las masivas avenidas registradas por otros cursos fluviales torrenciales menores, como son los ríos-rambla y las ramblas. Las comisiones enviadas para investigar los desastres comprobaron que la causa más destacable, aparte de la magnitud e intensidad de las lluvias, había sido la destrucción de los bosques de las cuencas hidrográficas, por lo que aconsejaron su inmediata repoblación.

Después de algunos decenios, se ha producido una nueva crisis erosiva, relacionada con las transformaciones registradas por la agricultura ibérica a partir de la década de 1960. La modernización y motorización excesiva permitieron incrementar notablemente la superficie cultivada, el rendimiento y la productividad de la tierra, pero a costos muy altos en términos de daños a los ecosistemas. Además, los incendios forestales se multiplicaron en número y superficie afectada. En los paisajes, las consecuencias de estos y otros factores se aprecian en los efectos insidiosos y acumulativos de los procesos de degradación: erosión y modelados correlativos, pérdida de suelo, degradación biológica, salinización y contaminación. La percepción y la evaluación de esta nueva crisis erosiva y de degradación resultan fundamentales para el establecimiento de programas de conservación de suelos y de lucha contra la desertificación, el mayor riesgo ambiental de las tierras mediterráneas de España.

La estimación de la erosión del suelo en España ha sido realizada, mayoritariamente, por un buen número de grupos de investigación encuadrados en las universidades y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y en el marco de proyectos de investigación; se han utilizado los diversos métodos de evaluación cualitativa y cuantitativa a distintas escalas: aplicando

la USLE y la MUSLE, con mediciones directas en laderas, parcelas y microcuencas experimentales, mediante simulaciones de lluvia, midiendo la producción de sedimentos y los cambios volumétricos producidos por episodios torrenciales y en general por lluvias de alta energía, utilizando las informaciones batimétricas disponibles en muchos embalses, estimando la **fragilidad erosiva** en áreas problema y evaluando la erosionabilidad del suelo en laboratorio.

Por otro lado, los períodos de observación y las condiciones ambientales bajo las que se realizan las evaluaciones son muy variadas: áreas incendiadas con distintos períodos de recurrencia, pinar, matorral, herbáceas, suelo desnudo, litologías diversas (margas, arcillas, areniscas, calizas...), áreas acarcavadas, terrazas, laderas, tierras cultivadas con diversos períodos de abandono, suelos con diferentes usos y manejos, suelos con enmiendas orgánicas y cubiertas vegetales, y suelos con adición de lodos de depuradora, entre otros. De todo ello se deduce la heterogeneidad de la información obtenida y la gran dificultad de ofrecer datos contrastados y homogéneos globales para un territorio tan diverso como es el español. No obstante, la abultada información disponible permite ofrecer una visión general de la importancia de la erosión.

Según el programa CORINE (1992), de todos los países mediterráneos de la Comunidad Europea, España y Portugal son los que presentan un mayor riesgo de erosión actual y potencial. El alto riesgo de erosión actual lo registra casi un tercio de la superficie nacional. La pérdida potencial de suelo incrementa notablemente este valor, al 41 % del territorio. La siguiente **❖** tabla especifica los diversos grados de erosión:

Riesgo de erosión potencial y actual en España

	Alto		Moderado		Bajo		Áreas excluidas		Total (km ²)
	(km ²)	%	(km ²)	%	(km ²)	%	(km ²)	%	
Potencial	202101	41	205157	41	69662	14	20598	4	497518
Actual	145494	29	219908	44	111518	23	20598	4	497519

Fuente: CORINE, 1992. No están consideradas las islas Baleares ni las Canarias. En las áreas excluidas de erosión se hallan los espacios urbanos, los lagos y áreas de rocas desnudas.

Para el conjunto de España, pérdidas de suelo, aproximadas, superiores a 10 kg/m²/año, afectan a unos 13 millones de hectáreas, y tasas entre 5 y 10 kg/m²/año, a otros 14 millones. Globalmente, unas 27 millones de hectáreas, el 53 % del territorio español, sufre remoción o pérdida de suelo que puede calificarse de apreciable a alarmante, especialmente el 18 % que está afectado por problemas de erosión alta, muy alta o extrema. Destaca la importancia de la erosión en los cultivos leñosos de secano en ladera y marginales (almendro, olivar y viñedo). Una superficie aproximada de un millón de hectáreas ha perdido el suelo agrícola o forestal en su totalidad, y casi siete millones más corren riesgo de llegar a desertificarse en un plazo no demasiado largo si no se las rehabilita y protege (ICONA, 1988; MOPU/SGMA, 1990; López Bermúdez, 1992). La tasa media de pérdida de suelo por erosión hídrica se estima en unas 27 t/ha/año para la totalidad de España (ICONA, 1987/90), pérdidas muy por encima de lo admisible y que, en consecuencia, crean condiciones favorables a la expansión de la desertificación. En estas áreas erosionadas, los surcos, los regatos, las cárcavas, los barrancos, la pedregosidad e incluso la aparición

del sustrato rocoso son manifestaciones evidentes de la erosión, omnipresentes en los paisajes.

Estos datos de pérdida de suelo son aproximados, ya que la mayoría de ellos han sido estimados aplicando el modelo USLE, que sobredimensiona los datos reales obtenidos por trabajos de investigación llevados a cabo en parcelas, campos experimentales y microcuencas, como puede verse en la ❖ tabla de la página siguiente.

Las tasas de erosión obtenidas en parcelas experimentales oscilan ampliamente en función de las características y los usos del suelo. Todas las experiencias para el seguimiento y control de la erosión destacan la cubierta vegetal como factor determinante de la pérdida de suelo. Es habitual encontrar altas tasas de erosión cuando el suelo está desnudo y bajas o casi nulas cuando el suelo está bien protegido. De modo global, los datos obtenidos en mediciones directas de la erosión no son tan altos como los estimados por la USLE. No obstante, las tasas obtenidas por este modelo son útiles para ser tenidas en cuenta en la planificación y ordenación del territorio, pero no para extrapolar sus resultados a valores reales, al menos bajo condiciones climáticas mediterráneas.

Tasas de erosión del suelo obtenidas en parcelas experimentales

Área	Lugar	Uso del suelo	Pérdida de suelo	
			t/ha/año	Fuente
Pirineo Central	(Huesca)	Campos abandonados	0,5–46,0	García-Ruiz <i>et al.</i> , 1991
Cal Parisa	(Alto Llobregat)	Terrazas abandonadas	19–42,0	Llorens <i>et al.</i> , 1992
Valle del Ebro	(Sector central)	Suelo desnudo	10,7–18,1	González Hidalgo <i>et al.</i> , 199
Cuenca del Ebro	(S. central)	<i>Badlands</i>	55,0–160,0	Benito <i>et al.</i> , 1991
Lanaja	(Huesca)	Suelo arcilloso desnudo	133,1–206,2	Gutiérrez Elorza <i>et al.</i> , 1995
Las Bardenas	(Navarra)	Suelo arcilloso desnudo	81,0–118,5	Gutiérrez Elorza <i>et al.</i> , 1995
La Puebla de Alfinden	(Zaragoza)	Suelo yesífero con vegetación natural	16,8	Gutiérrez Elorza <i>et al.</i> , 1995
Gavarres	(Girona)	Bosque cerrado	0,12	Úbeda <i>et al.</i> , 1995
Gavarres	(Girona)	Bosque incendiado	30,6	Úbeda <i>et al.</i> , 1995
Masquela	(Barcelona)	Campo cultivado	9,5	Marqués, 1991
La Rioja		Terrazas reforestadas	2,4–21,6	Ortigosa, 1991
La Higuera	(Madrid)	Barbecho	0,93	Alba <i>et al.</i> , 1995
La Higuera	(Madrid)	Avena/girasol	0,23	Alba <i>et al.</i> , 1995
Guadalperalón	(Cáceres)	Dehesa	4,34–12,35	Gómez-Amelia <i>et al.</i> , 1998
Porta-Coeli	(Valencia)	Suelo desnudo	0,21	Rubio <i>et al.</i> , 1990
Porta-Coeli	(Valencia)	Matorral abierto	0,05	Rubio <i>et al.</i> , 1990
Serra Grossa	(Valencia)	Suelo forestal incendiado	3,6–7,3	Calvo Cases <i>et al.</i> , 1988
Valencia	(área norte)	Replacación con pino	0,3–6,2	Herrero-Borgoña <i>et al.</i> , 1994

Área	Lugar	Uso del suelo	Pérdida de suelo	
			t/ha/año	Fuente
Requena	(Valencia)	Suelo desnudo	9,0	Bochet, 1996
Requena	(Valencia)	Suelo con esparto	1,0	Bochet, 1996
Lliria	(Valencia)	Pinar incendiado	4,1	Gimeno <i>et al.</i> , 2000
Benidorm	(Alicante)	Pinar incendiado	2,6	Bautista, 1999
Alicante		<i>Badlands</i>	>10	Cerdá y Navarro, 1997
Alicante	(área sur)	Repoblación en terrazas	0,7–3,6	Chirino, 1987
Elche	(Alicante)	Repoblación con pinos	1,00–6,55	Sánchez <i>et al.</i> , 1995
C. río Chícamo	(Murcia)	Suelo con vegetación	0,39	Albaladejo <i>et al.</i> , 1991
C. río Chícamo	(Murcia)	Suelo desnudo	5,60	Albaladejo <i>et al.</i> , 1990
El Ardal, Mula	(Murcia)	Vegetación natural	0,06	López Bermúdez <i>et al.</i> , 1991
El Ardal, Mula	(Murcia)	Labrado en pendiente	1,18	López Bermúdez <i>et al.</i> , 1991
El Ardal, Mula	(Murcia)	Suelo desnudo	3,98	López Bermúdez <i>et al.</i> , 1991
El Ardal, Mula	(Murcia)	Suelo con anuales	0,50	Romero Díaz <i>et al.</i> , 1995
El Ardal, Mula	(Murcia)	Cultivo cebada	0,27	Romero Díaz <i>et al.</i> , 1995
Cuenca de Mula	(Murcia)	Secano abandonado	1,78–3,18	Francis, 1986
Ujigar	(Granada)	Desnudo	36,9–94,6	Scoging, 1982
Córdoba		Olivar con laboreo	1,21	Giráldez <i>et al.</i> , 1990
Córdoba		Olivar sin laboreo	0,27	Giráldez <i>et al.</i> , 1990

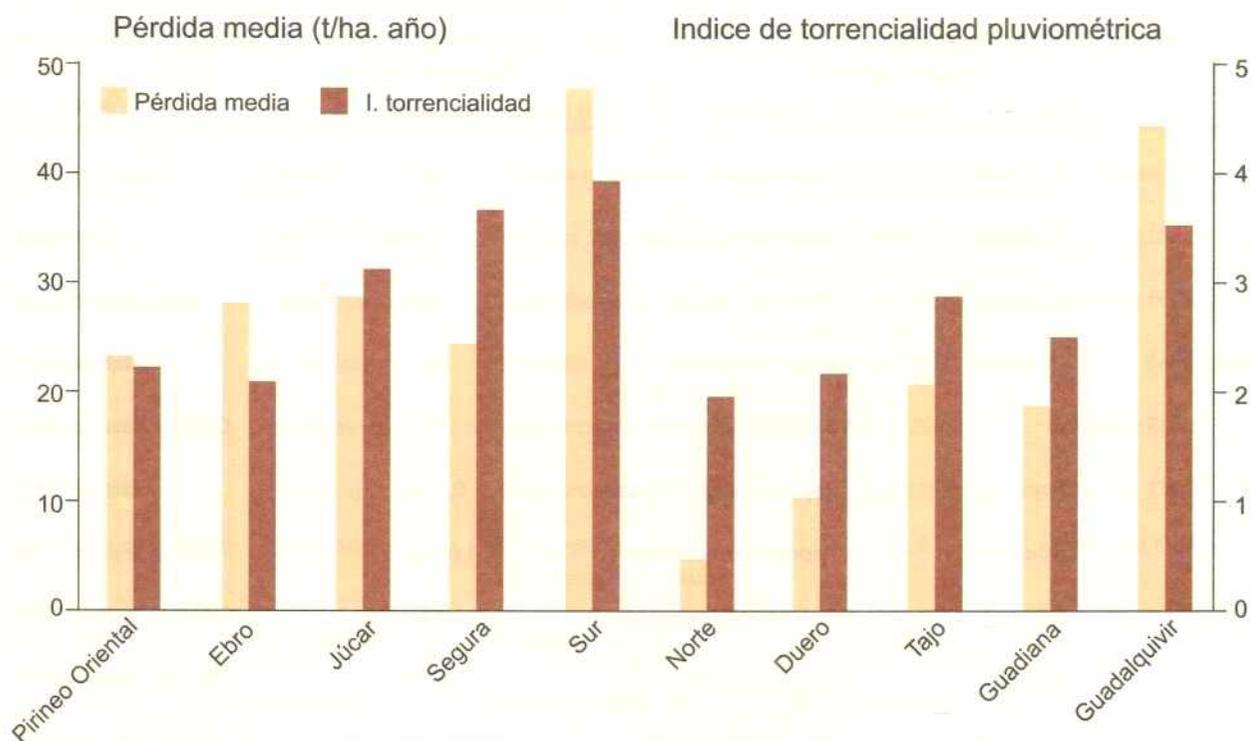


Fig 80.- Índice de torrencialidad de la lluvia y pérdidas de suelo en las principales cuencas hidrográficas de España.

De la información disponible para toda la península Ibérica, el sureste aparece como el área con más alto riesgo de erosión de Europa, a causa de la conjunción de factores que favorecen el proceso, tales como las condiciones climáticas de semiaridez extrema, litologías y suelos sensibles a la erosión, topografía frecuentemente escarpada y una milenaria actividad humana responsable de crisis erosivas por roturaciones de tierras marginales, sobrepastoreo, deforestaciones, incendios y prácticas de cultivo a veces inadecuadas. De hecho, en el sureste de España se halla la mayor parte de los

145000 km² de suelos con alto riesgo de erosión de la península Ibérica.

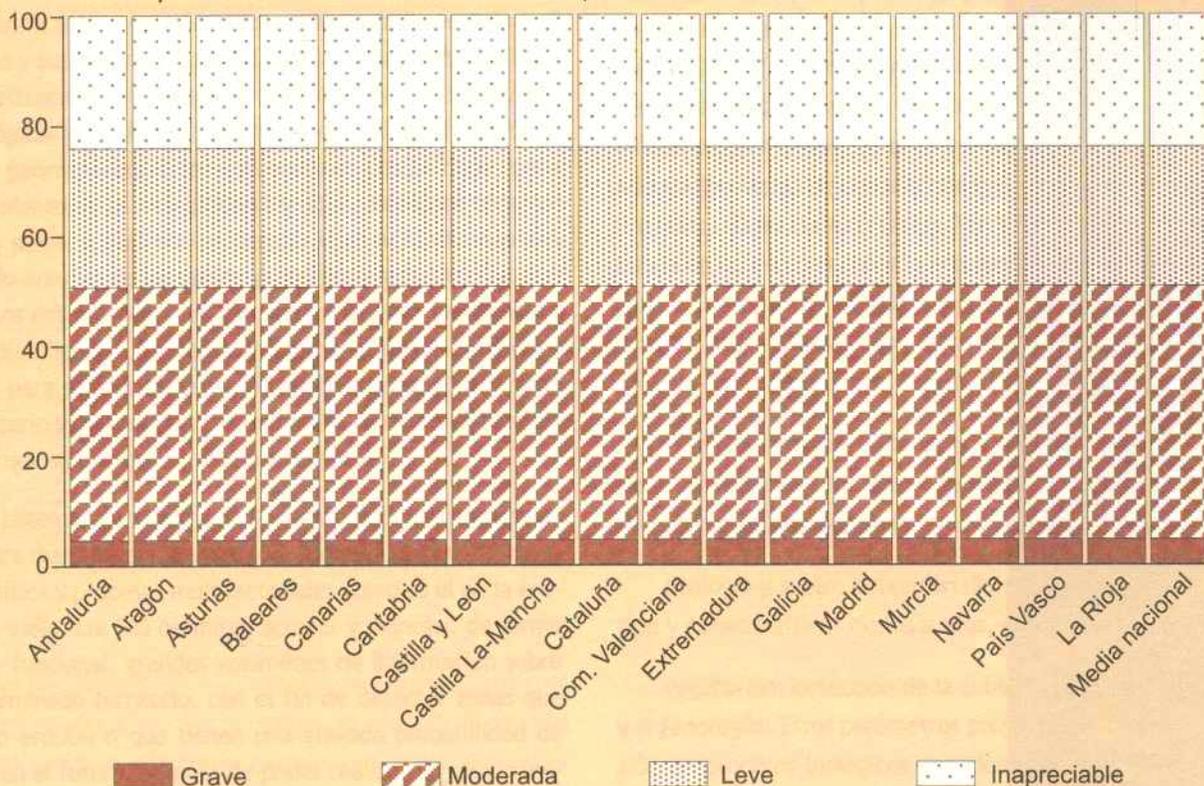
Las cuencas hidrográficas más afectadas por la erosión del suelo y, a la vez, las de mayor riesgo por el proceso de degradación son las cuencas del sur, Guadalquivir, Segura, Júcar y amplias zonas de la del Ebro (Fig. 80). Por comunidades autónomas, las de Murcia, Andalucía, Valencia, Castilla-La Mancha y Aragón son las que mayores pérdidas de suelo registran (Fig. 81). Si bien el grado de degradación de los ecosistemas por erosión y desertificación está relacionado con las condiciones climáticas

Albedo. Es la medida de la cantidad de energía reflejada al espacio por la superficie de la Tierra y todos los cuerpos que hay sobre ella. La emisividad de la superficie depende de la longitud de onda y del carácter de la superficie. Es cercana a la unidad para los océanos, superficies húmedas y superficies oscuras que pueden atrapar radiación de onda larga. Es mucho menor, por ejemplo, para los suelos secos con bajo contenido en materia orgánica, muy susceptibles a la erosión.

Fig. 81.-Grados e importancia de la erosión del suelo en las distintas Comunidades Autónomas de España (Elaborado con datos del MOPU, 1990).

GRADO DE EROSIÓN EN ESPAÑA

Tanto por ciento de territorio afectado por la erosión





semiáridas de estos territorios, especialmente con las escasas precipitaciones, la recurrencia de las sequías, la elevada evapotranspiración y el fuerte **albedo**, la degradación del suelo está ligada, básicamente, a unos sistemas de uso y gestión de los recursos naturales que, con frecuencia, no permiten su conservación.

8

Los sistemas de información geográfica (SIG) como instrumentos de integración de factores de erosión y elaboración de cartografías

La aparición de los sistemas de información geográfica y su rápida evolución han aportado a las ciencias de la Tierra y a las ciencias socioeconómicas grandes avances para el análisis, planificación, gestión y toma de decisiones sobre el territorio y sus recursos. Los SIG son una eficaz herramienta de modelización que parten de informaciones en formatos ● *analógico* y ● *digital*, permitiendo construir bases de datos ● *georreferenciadas* con enormes posibilidades para el tratamiento de la variabilidad espacial. Mediante tecnologías SIG pueden elaborarse cartografías actualizadas del ● *estado erosivo* de los suelos y modelos predictivos de erosión de los mismos. También son una importante herramienta para la planificación ambiental y la ordenación del territorio, es decir, para señalar los usos más apropiados para cada zona del territorio y usar los recursos naturales de modo sostenible, a la vez que se protege el medio ambiente.

Los sistemas de información geográfica tienen gran capacidad para manejar parámetros y variables de expresión espacial analítica y procesos multifactoriales como es el de la erosión del suelo. Los SIG permiten acopiar y manejar, de forma rápida y funcional, grandes volúmenes de información sobre un determinado territorio, con el fin de detectar zonas que registran erosión o que tienen una elevada probabilidad de tenerla en el futuro, además de poder realizar un seguimiento de la evolución de esos espacios.

La correcta elaboración de un SIG permite incorporar información procedente de series históricas o de mapas temáticos: geológicos, topográficos, geomorfológicos, de suelos, de cubierta vegetal y de usos y aprovechamientos; información fiable al estar apoyada, con frecuencia, en rigurosos muestreos de campo. Por otro lado, uno de los pilares fundamentales de los SIG es la teledetección, que permite la adquisición rápida de datos actualizados de extensas áreas del territorio. Estas características han propiciado el cambio de escala en los estudios sobre la erosión y en los modelos de predicción, pasando de la ladera o pequeña cuenca hidrográfica a zonas muy extensas, con la posibilidad de realizar seguimientos casi permanentes del estado del suelo y sus usos.

Entre los distintos factores que intervienen en los procesos erosivos y sobre los que se puede obtener información por teledetección para ser incorporada a un SIG, destacan tres:

litología y suelo: detección del tipo de material rocoso, tipo y características de los suelos, contenido en humedad;

vegetación: detección de la cubierta vegetal, ● *biomasa* y ● *fenología*. Estos parámetros propician, a la vez, la inclusión de procesos biológicos que tienen repercusión sobre la degradación de la cubierta vegetal y la erosión, como son el

estado fitosanitario de la vegetación (predicción y seguimiento de plagas forestales), la potencialidad de los incendios y los procesos asociados a la regeneración de las áreas quemadas, la evolución de tierras marginales.

hidrología superficial: análisis de las redes de drenaje; detección, medida y clasificación de los cauces de drenaje activos y de los que no lo son. Localización y características de zonas húmedas, embalses.

La superposición automática de las capas de información disponible de los factores que determinan la erosión, permite obtener una estructuración espacial del grado de vulnerabilidad de los suelos a la erosión, confeccionar cartografías y, en consecuencia, priorizar las áreas de actuación para mitigar y rehabilitar suelos degradados y prevenir el proceso erosivo (Fig. 82). La aplicación de metodologías que combinen el uso de los modelos de erosión con los SIG son

muy útiles para evaluar la erosión hídrica, conocer las variaciones temporales de los modelos erosivos, analizar y mantener actualizada la gran cantidad de información requerida, normalizar y comparar metodologías y obtener representaciones gráficas; asimismo, sirven de punto de partida para la realización de estudios hidrológicos y de planificación (De Antonio, 1994; Almorox *et al.*, 1994).

La función, pues, de los sistemas de información geográfica aplicados a las materias relacionadas con la erosión, y también con la desertificación, es mejorar la capacidad para tomar decisiones. Además, las herramientas SIG se pueden utilizar para numerosas finalidades, tales como realizar análisis de sensibilidad de los modelos mediante la manipulación de las variables o estudiar una cuenca hidrográfica, a distintas escalas o resoluciones, para conocer la exactitud de la predicción de los modelos. Por último, una ventaja importante de la utilización de una herramienta SIG

sería el considerable ahorro de tiempo y costo para realizar estudios sobre gestión de recursos naturales y procesos de erosión y desertificación en **zonas afectadas** por estos procesos de degradación.

Clasificación de la DESA

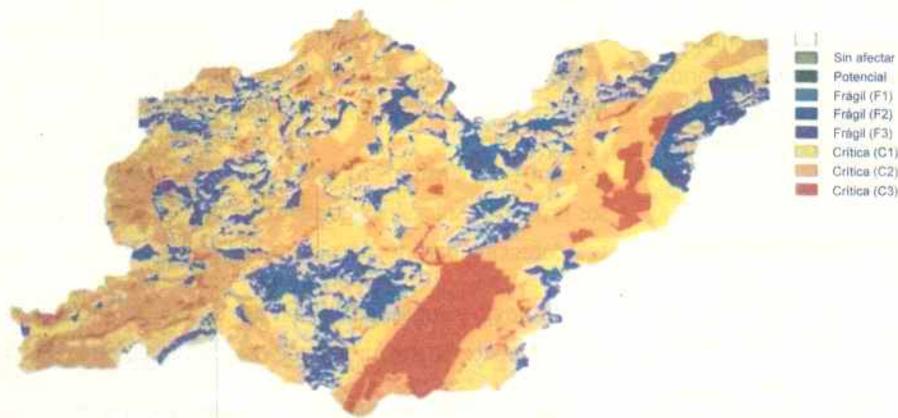


Fig. 82.- La integración de la información sobre precipitaciones, topografía, drenaje, humedad y usos del suelo, vegetación, pérdida de suelo, etc. en un SIG permite la identificación de las áreas en las que debe actuarse con mayor o menor rapidez para prevenir o corregir los efectos de la pérdida de suelo. Áreas sensibles a la degradación, cuenca del Guadalentín (Murcia).

9

Conclusión: la erosión, la peor amenaza para el suelo y el factor más destacado de la desertificación

Los suelos constituyen uno de los factores más importantes en el equilibrio de la biosfera y en el funcionamiento de los sistemas naturales. El suelo es un recurso natural imprescindible para la vida, no renovable o de renovación muy difícil y costosa en casi la mitad de las tierras emergidas del planeta. En las tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas, un suelo puede tardar en formarse miles o incluso millones de años, por lo que puede considerarse un recurso natural no renovable a escala humana o de una generación. Sin embargo, de este recurso depende la mayor parte de la producción alimentaria del mundo, pese a que menos de la mitad de la superficie terrestre es cultivable. Debe ser utilizado sin llegar a superar su capacidad de aceptación y tolerancia a los diferentes usos previstos en cada caso: agricultura, pastoreo, silvicultura, paisajismo, ingeniería civil, espacios naturales protegidos y naturaleza y ocio, entre otros.

La erosión del suelo es un problema endémico y antiguo; se estima que, a escala mundial y a lo largo de la historia, la superficie de suelo perdido es mayor que la superficie cultivada en la actualidad. La degradación del suelo ha amenazado e incluso destruido civilizaciones. En el siglo XX, el rápido aumento y presión de la población en la mayor parte de los países en desarrollo ha acelerado el proceso de erosión del suelo y ha desembocado en un problema mayor, el de la desertificación. Los países mediterráneos constituyen una de

las regiones del mundo más sensibles y vulnerables al problema y España no escapa a la amenaza.

La forma más grave de degradación del suelo es la provocada por la erosión acelerada, que puede llegar al extremo de dejar al descubierto el lecho del sustrato rocoso. El suelo despojado de toda cubierta vegetal es muy vulnerable, se reseca, se resquebraja, se pierde y resulta inservible. La erosión reduce la fertilidad del suelo y su rendimiento, aumenta los costos de producción de alimentos y fibras y repercute negativamente en los recursos hídricos. La erosión laminar y la erosión en cárcavas causan estragos devastadores, ocasionando la pérdida de nutrientes, removiendo y arrastrando las capas fértiles de las tierras.

En la mayor parte de las tierras del mundo, se están perdiendo miles de millones de toneladas de suelo cada año por la erosión debida a la conjunción de una serie de factores adversos: agresividad climática; alta erosionabilidad; supresión de la cubierta vegetal debida a talas indiscriminadas, roturaciones, sobrepastoreo, incendios; malas prácticas agrícolas; excesiva mecanización; excesivo laboreo; cambios en la utilización del suelo que destinan buenas tierras agrícolas a otros usos; mala gestión forestal; abandono de la tierra y de las prácticas de conservación; desvalorización de la tierra agrícola en la sociedad industrial y postindustrial.

Fig. 83.- Dimensión, ecológica, económica y ética del recurso suelo.



La evaluación de la erosión del suelo, como fenómeno de crisis ambiental, es necesaria y está más que nunca justificada, porque hoy se tienen conocimientos más precisos de su naturaleza, sus causas, sus mecanismos, sus consecuencias y de los medios de que se dispone para evitarlos o remediarlos cuando el estado de

degradación del suelo no haya sobrepasado umbrales críticos. Conociendo los factores y procesos que intervienen en la pérdida de suelo por el agua, el hombre puede lograr que los altos valores estimados de erosión potencial que se registran en muchos países no se tornen en erosión real.

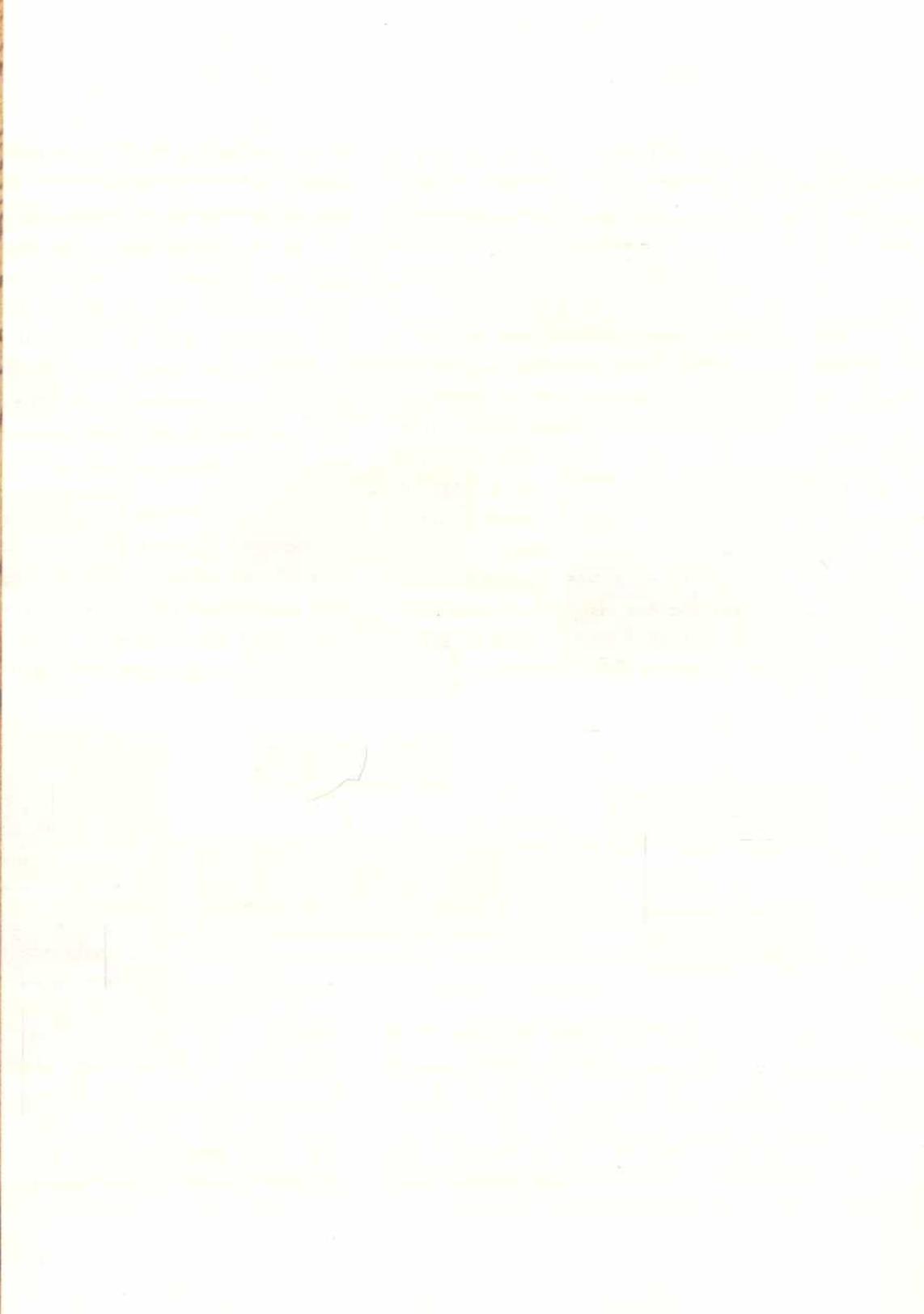
Para combatir la pérdida de suelo, se precisa una revalorización de la naturaleza y una priorización de la gestión de los recursos suelo, agua y vegetación en el marco de una concepción global. Pueden ser armas eficaces la política preventiva y la evaluación del **▶ impacto ambiental** de aquellas actuaciones que puedan ocasionar degradaciones (deforestaciones, roturaciones, expansión de regadíos a tierras marginales, incendios, cambios de uso del suelo). Para ello es preciso poner en marcha la investigación, la identificación de procesos, el análisis de causas naturales y socio-económicas, la predicción y la **● mitigación** mediante prácticas adecuadas; el desarrollo de modelos que abarquen las distintas variantes de la degradación de los recursos; la recuperación y la rehabilitación de los suelos y la cubierta vegetal degradados allá donde sea posible; evitar el abandono de las buenas prácticas de conservación del suelo incentivando a las poblaciones rurales; el fomento de una agricultura que no se

base en métodos y técnicas que destruyan y agoten los suelos. La elaboración de programas globales de conservación, la implantación de normativas legales básicas y la educación ambiental pueden constituir también pilares fundamentales para minimizar y, en parte, para evitar los negativos impactos ambientales de la erosión y la degradación del suelo, soporte fundamental de los ecosistemas terrestres; y finalmente, el reconocimiento de la dimensión ecológica, económica y ética del recurso suelo, que, junto con el agua, es el más importante del patrimonio natural de la humanidad (Fig. 83).

Uno de los mayores riesgos de degradación de la tierra aparece cuando los usuarios no aman la tierra ni se interesan por su buen estado. El riesgo aumenta cuando falta una conciencia política de la gravedad del problema y cuando los que explotan la tierra sólo ven en ella una fuente de ingresos, lo que sucede a menudo.

▶ Glosario

Impacto ambiental. La expresión se aplica a la alteración que introduce una actividad humana en el medio ambiente. El impacto ambiental se asocia a las actividades antrópicas no a las repercusiones que pueden desencadenar los fenómenos naturales.



10

La desertificación, un problema ambiental y social global

Las regiones secas y, en particular, las mediterráneas han estado desde siglos atrás bajo una gran presión ecológica. Sin embargo, es la civilización actual, con sus manifestaciones agrarias, industriales y turísticas, y sus cambios en las actitudes y los comportamientos de las personas con la naturaleza y el medio ambiente, la que ha causado más profundas alteraciones de los paisajes en toda la historia de la humanidad.

En estos territorios, muchos de los fenómenos que desencadenan los procesos degradativos son antiguos, por lo que cabe hablar de una *desertificación histórica o heredada*; pero desde la década de 1970 se han activado y emergen como problemas nuevos y ligados a importantes cambios en el uso del suelo, la drástica modificación de los balances hídricos de muchas cuencas, la extracción abusiva de las aguas subterráneas, la salinización y la contaminación de suelos y aguas, el uso abusivo de fertilizantes y pesticidas, los incendios, la erosión del suelo y el abandono rural y de las buenas prácticas de conservación del suelo que desencadenan procesos de degradación que se identifican como una *desertificación actual o funcional*.

En las tierras semiáridas y subhúmedas secas, se constata a lo largo de los tiempos una interferencia cada vez más intensa entre las acciones humanas y los equili-

brios geoecológicos que ha dañado el aspecto original de los paisajes, ocasionando, a través de un continuado proceso de deterioro, la degradación de extensas áreas abocadas hoy a condiciones próximas a las subdesérticas. La desertificación es un proceso de cambio ambiental, debido a la alteración del ecobalance por excesiva o inadecuada presión humana sobre ecosistemas fragilizados por la aridez y las sequías. La desertificación puede ser el resultado de la dialéctica hombre-medio en ambientes sensibles a la degradación de los recursos naturales básicos: suelo, agua y vegetación.

Los tres problemas medioambientales

La *desertificación*, el *cambio climático* y la *biodiversidad* constituyen los tres problemas medioambientales estrella en los inicios del tercer milenio. En realidad, salvaguardar la diversidad biológica, luchar contra la desertificación y prevenir el cambio climático albergan el mismo objetivo: asegurar un desarrollo durable. Esto significa conseguir una calidad de vida que sea socialmente deseable, económicamente viable y ecológicamente sostenible, que pueda mantenerse durante muchas generaciones.

El deterioro de los geosistemas, la pérdida de biodiversidad, la degradación de los suelos y las aguas pueden ocasionar, por un lado, una marcada disminución del potencial biológico o productivo, y por otro, introducir ecosistemas cada vez más pobres y vulnerables. La conjunción de ambos procesos puede ocasionar la ruptura de la armonía de los sistemas naturales y conducir implacablemente a una acentuación de las crisis medioambiental y socioeconómica expresadas en la desertificación del territorio. Cuando las tierras de cultivo o de pastos se han transformado y degradado, con una pérdida de productividad de entre el 10 % y el 25 %, se habla de desertificación moderada; es severa si la pérdida está entre el 25 % y el 50%, y muy severa si es mayor.

La mayor parte de la desertificación es natural en las zonas que bordean los desiertos. En períodos de sequía, los ecosistemas se deshidratan, pierden vegetación y parte del suelo es arrastrado por el viento. Sin embargo, este fenómeno natural se ve agravado por actividades humanas que debilitan el suelo y lo hacen

más vulnerable a la erosión. La observación de los paisajes de las tierras secas detecta, con frecuencia, que las acciones humanas inadecuadas potencian la tendencia y acción de los procesos naturales y viceversa; el factor humano desempeña un decisivo papel en el proceso de degradación. Actuaciones humanas inadecuadas o perniciosas pueden alterar o romper el sistema acoplado atmósfera-suelo-agua-planta. El resultado es que territorios originariamente alejados de las condiciones desérticas llegan, o pueden llegar, a parecerse con el tiempo a estos ambientes inhóspitos.

La degradación de la tierra y la escasez de agua constituyen la mayor amenaza para la sostenibilidad de los geosistemas y agrosistemas de las regiones secas. En el horizonte del nuevo milenio, estas regiones, bajo un clima semiárido de incertidumbre y de fuerte déficit hídrico, constituyen territorios donde el riesgo de desertificación es de preocupante a muy elevado y se convierte, además, en una severa y creciente amenaza.

◆ **Desertificación** es un término que viene siendo utilizado desde, al menos, 1949, cuando el botánico y ecólogo francés Aubreville publicó un libro con el título *Clima, bosques y desertificación en el África tropical*. El término, sin embargo, es complejo y de difícil conceptualización debido a lo impreciso de su significado, pero es lo suficientemente intuitivo como para ser objeto de un tratamiento mediático (Ibáñez *et al.*, 1970). Desde los años setenta del pasado siglo viene siendo un tema de amplia cobertura en los medios de comunicación porque es considerado como uno de los problemas más graves que afectan a las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas del planeta por sus implicaciones ambientales y socioeconómicas. En la orla mediterránea ha llegado incluso a ser uno de los más importantes temas ambientales en los ámbitos científicos, técnicos, políticos e incluso populares.

El concepto de *desertificación*, polisémico, controvertido, discutido con vehemencia, es incluso utilizado, con frecuencia, erróneamente. Hacia 1983 se conocían ya más de cien definiciones (Glantz y Orlovsky, 1983; Kyle, 1995). En la actualidad, se debe rebasar el centenar y medio de conceptos, la mayoría egocéntricos, por lo que no se cuenta con uno que caracterice plenamente el proceso de degradación y que sea aceptado por todo el mundo o que pueda ser usado en cualquier circunstancia.

El término es una pequeña babel conceptual para aproximarse y formular el proceso de degradación. Los científicos, los técnicos y los políticos tienen puntos de vista y necesidades diferentes; por otro lado, la población, según el país, la región y el grado de desarrollo, percibe el problema de modo distinto, y diferentes grupos sociales son desigualmente afectados por el proceso de degradación. La realidad es que tras el vocablo *desertificación* se esconde todo un conjunto de procesos interrelacionados (físicos, biológicos, históricos, económicos, sociales, culturales y políticos) que se manifiestan a diferentes niveles de resolución tanto espaciales como temporales (García Ruiz *et al.*, 1994; Ibáñez *et al.*, 1997). Normalmente, el concepto va asociado al de carencia y pobreza, aunque su impacto social depende mucho de las condiciones económicas de las

◆ Información adicional

Desertificación. Proceso de degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas.

Desertización. Alude al proceso de deterioro natural del clima hacia una mayor aridificación y aleatoriedad de las precipitaciones. También suele darse una connotación sociológica, para expresar un espacio o territorio vacío de personas.

poblaciones asentadas en zonas afectadas o amenazadas (Pou, 1988).

Desertificación es un vocablo de contenido complejo que se utiliza con distintos enfoques aunque con gran coincidencia en los aspectos esenciales del proceso. De modo genérico, la *desertificación* expresa el resultado de la combinación de condiciones geográficas, climáticas y socioeconómicas, y de las formas humanas de utilización de los recursos naturales, especialmente para la producción agrícola y el desarrollo rural. Las causas que la desencadenan y los factores que la controlan son múltiples y algunos de ellos puede cambiar según la escala; por ello, pueden darse respuestas diferentes en función de las escalas de tiempo y espacio que se consideren. Por otro lado, los términos *desierto* y *desertificación* se interpretan con frecuencia como sinónimos y son utilizados para expresar ciertas situaciones demográficas, como espacios vacíos de personas, inhabitados, o situaciones de aislamiento y desolación; incluso se relaciona con ciertos aspectos de percepción, tales como seco, estéril, improductivo (Rubio, 1992, 1995).

La *desertificación* fue definida en la Conferencia sobre Desertificación de Naciones Unidas (UNCOD, 1977) como "la disminución, deterioro o destrucción del potencial biológico del suelo que, en sus últimas instancias, puede conducir a condiciones de desierto". Posteriormente, la UNCED (1992) y el CCD (1994) (Fig. 84) han redefinido el concepto de desertificación, considerándola como "un proceso que reduce la productividad y el valor de los recursos naturales del planeta en el contexto específico de condiciones climáticas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, como resultado de variaciones climáticas y actuaciones humanas adversas". Reconocen el significado universal y las consecuencias del proceso degradador y lo consideran un problema global, porque se expan-



Fig. 84.- Logo Convenio CCP

de cada vez más por la superficie de la Tierra y porque sus efectos se dejan sentir en la vida salvaje, la biosfera y la atmósfera. Muchos autores se sitúan, más o menos, en la misma línea, resaltando que la desertificación es un cambio irreversible del suelo y la vegetación en dirección a la aridificación que reduce la producción del suelo por debajo de su productividad potencial, que no permite un uso sustentable y que, en el límite, puede convertir la zona en un desierto.

Desertificación, pues, es un conjunto de procesos o manifestación de fenómenos implicados en el empobrecimiento y degradación de los geosistemas terrestres por impacto humano (Fig.85). Se interpreta como una disminución de los niveles de productividad de los geosistemas como resultado de la sobreexplotación, el uso y la gestión inapropiados de los recursos en territorios fragilizados por la aridez y las sequías. El proceso de deterioro reduce la productividad de las plantas y los cultivos, produce alteraciones no deseables en la biomasa y en la diversidad de la micro y macro fauna y flora, acelera el deterioro del suelo e incrementa los riesgos para las poblaciones de los territorios afectados.

Fig. 85.- Factores causantes de la desertificación.



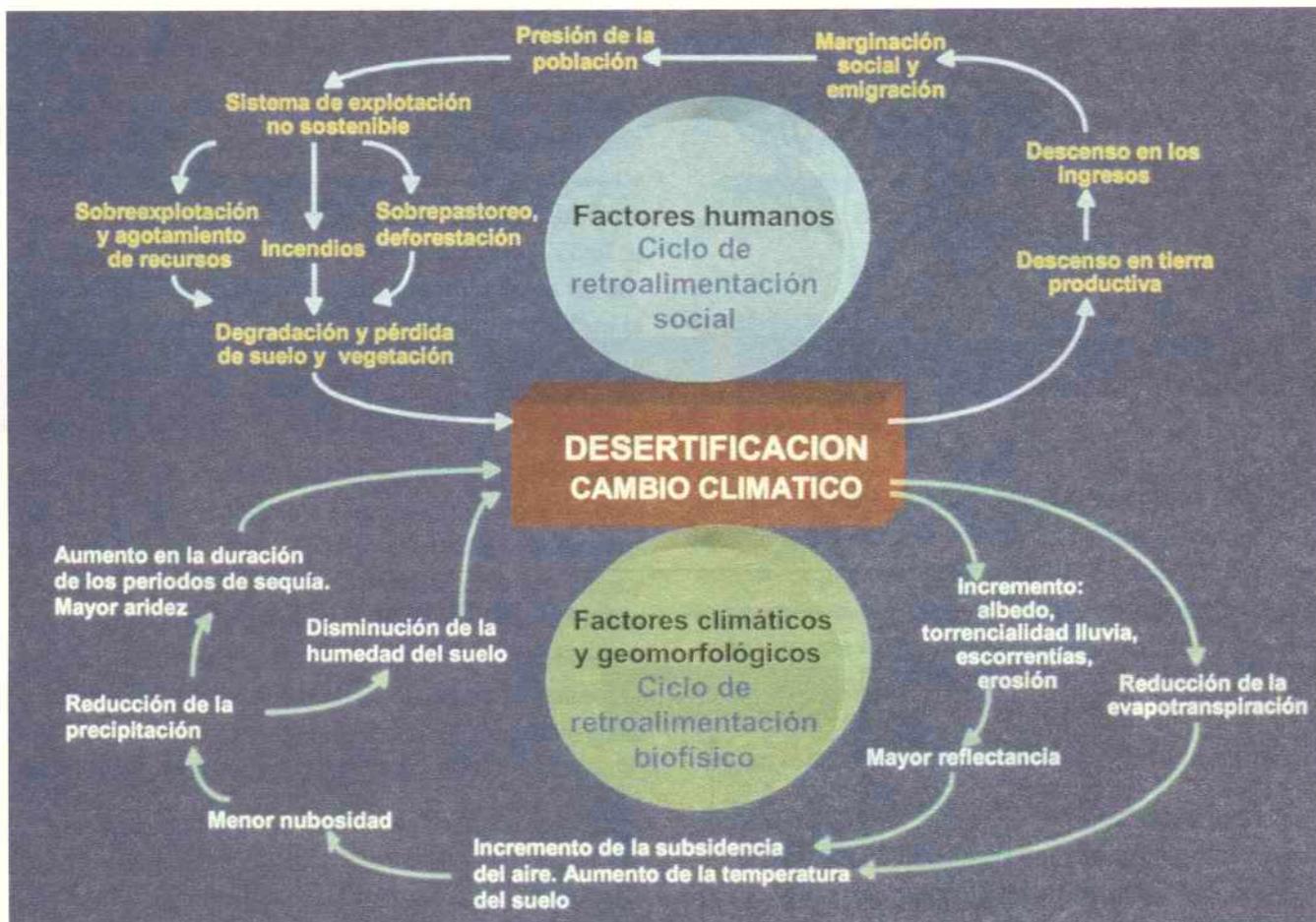


Fig. 86.- Efecto feedback en los ciclos social y biofísico de la desertificación (Scooging, 1991; Thomas y Middleton, 1994; López Bermúdez, 1996).

La desertificación significa una descapitalización de la naturaleza porque ocasiona la disminución irreversible de los niveles de productividad de la tierra que, bajo condiciones climáticas con balances hídricos negativos, han sido fragilizados por el hombre por uso y gestión inapropiados de los recursos naturales básicos. Es el ser humano quien crea con-

diciones propicias a la desertificación de los paisajes; el clima más o menos árido y la recurrencia de sequías no son más que condiciones favorables.

La desertificación no es un problema meteorológico aislado (de sequía, por ejemplo), ni ambiental de deterioro (contaminación de un curso de agua, por ejemplo)

o pérdida de biodiversidad (desaparición de una especie vegetal, por ejemplo) en un territorio más o menos extenso. La desertificación es, a la vez, una crisis climática, socioeconómica y ambiental que desencadena nuevos mecanismos de degradación y que dificulta e incluso impide la conservación de los recursos naturales imprescindibles para el desarrollo sostenible. Los motores de arranque de la desertificación, sus múltiples causas, hay que buscarlos en la acción sinérgica de un amplio conjunto de procesos climáticos y antrópicos de diferente escala en el espacio y en el tiempo, que son reforzados o amplificadas a causa de la intervención humana (Scoging, 1991; Thomas y Middleton, 1994; López Bermúdez, 1996). Estos procesos encadenados, así como sus consecuencias ecológicas, son esquematizados en la Fig. 86.

Sea cual sea la definición considerada, en la *desertificación* lo importante es el diagnóstico. El proceso aparece como un estadio final de la degradación del medio natural que se traduce en la desaparición de la cubierta vegetal, la aceleración de los procesos de erosión y otros procesos de deterioro. Estos fenómenos pueden producir un incremento de la aridez del medio degradado y una acusada disminución de la fertilidad de los suelos, es decir, conducen a la ruptura del equilibrio del ecosistema inicial. Los ecosistemas de las regiones áridas sometidas a una presión humana excesiva o a cambios en los sistemas de utilización de las tierras pueden sufrir una pérdida de productividad y de su capacidad de recuperación, desembocando en la desertificación. Así, pues, la desertificación no sólo amenaza a aquellos usos del territorio orientados a la producción de bienes directos (alimentos, madera y otros productos), sino a la propia estabilidad de los ecosistemas. Supone una auténtica descapitalización en la medida en que constituye una pérdida de calidad ambiental, que, además, se traduce en un descenso de la productividad.

Cualquiera que sea la importancia del peso de los factores naturales en las tierras vulnerables a la desertificación, es la acción multimilenaria del hombre la que ha marcado profundamente los paisajes, los sistemas de utilización de las tierras y su degradación. En la mayor parte de los casos sería mejor hablar de *degradación de la tierra* que de *desertificación*. Por ello, quizás sería conveniente redefinir el término *desertificación* aplicado a la situación de las regiones mediterráneas europeas, bastante diferentes a las de los bordes del Sahara y otras regiones africanas y asiáticas.

Finalmente, la *desertificación* es una patología, una enfermedad ambiental compleja que hay que entender en el marco de un sistema de cambios globales en el que las interrelaciones entre causas y respuestas suelen ser estrechas. Sin embargo, no todos los procesos de degradación implican desertificación, mientras que la desertificación sí induce degradación. Para comprenderla es necesario conocer el entorno ambiental, la estructura, la dinámica, la evolución y la vulnerabilidad de los paisajes que la padecen, así como la historia de los sistemas de explotación de los recursos naturales.

12

La magnitud del problema

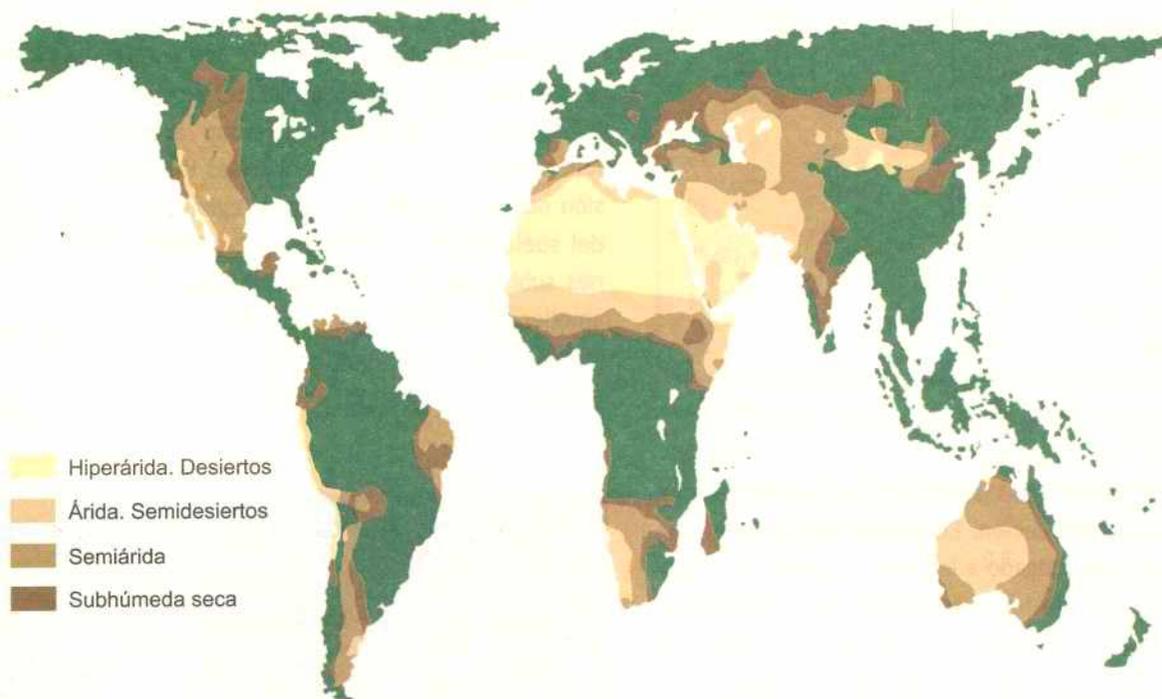


Fig. 87.- Distribución geográfica global de las zonas secas en el mundo (UNESCO, 1977; UNEP, 1992).

La superficie mundial de las tierras emergidas asciende a 145 millones de km², de los cuales, aproximadamente, unos 68 millones (el 47 %), corresponden al bioma árido en sus diversos grados y a aquellos ambientes que potencialmente pueden serlo: tierras hiperáridas, áridas, semiáridas y subhúmedas secas. La mayor parte de estos ambientes siguen una distribución latitudinal entre

los 20° y 40° de latitud en ambos hemisferios (Fig. 87). Sin considerar las regiones hiperáridas (los desiertos), que cubren alrededor del 7,5 % del total de la superficie árida mundial, las tierras secas ocupan un tercio de Europa y de ambas Américas, las dos quintas partes de Asia y de África y más de tres cuartos de Australia. En cifras absolutas, las mayores superficies áridas se encuentran en Asia y África;

ambas suman casi el 60 % de las tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas del mundo.

Extensión y distribución porcentual de las tierras secas por continentes, excluidas las hiperáridas (desiertos)

Continente	Superficie 10 ⁶ has	% del total
África	1286	43
América del Norte	732	33
América del Sur	516	29
Asia	1672	39
Australia	663	>75
Europa	300	31
Total mundial	5169	40

Fuente: UNEP, 1992; Martin y Balling, 1994

No es fácil determinar las superficies de los territorios afectados por desertificación. En muchos casos es un proceso natural que está ligado a las oscilaciones climáticas; en unos períodos los desiertos se expanden (como sucedió con la gran sequía y hambruna que registró el Sahel de 1968 a 1972, afectando gravemente a Mauritania, Senegal, Mali, Alto Volta, Níger y Chad) y en otros retroceden, dependiendo de la evolución de las condiciones climáticas, con períodos con lluvias más frecuentes y abundantes (Fig. 88). Por ello, las estadísticas suelen diferir según el período considerado y la fuente que las suministra. Lo cierto es que, en la actualidad, las causas de la degradación de los ecosistemas se hallan más en los sistemas de explotación humanos que en la naturaleza. El factor más importante que debe vencerse en un programa para combatir el problema de la desertificación, sobre todo en los países

pobres, es el imperativo económico que conduce a la gente a degradar el suelo y los ecosistemas que soporta, inhibe la restauración y alienta la espiral de degradación del suelo (Warren y Agnew, 1988). Una estimación de la extensión y la severidad de la degradación del suelo, por diferentes zonas de aridez en cada continente, se muestra en la ❖ tabla de la página siguiente.

Como puede verse, en África, Asia y Australia las zonas áridas dominan ampliamente los territorios secos; en ellas, la degradación del suelo es muy acusada. En ambas Américas, son las tierras semiáridas las que mayor extensión ocupan, la mitad de ellas registran una degradación del suelo de ligera a extrema. En Europa, son las regiones subhúmedas secas y las semiáridas las que dominan ampliamente, y el grado de degradación del suelo es moderado. En este continente, los territorios áridos se acantonan en la península Ibérica.

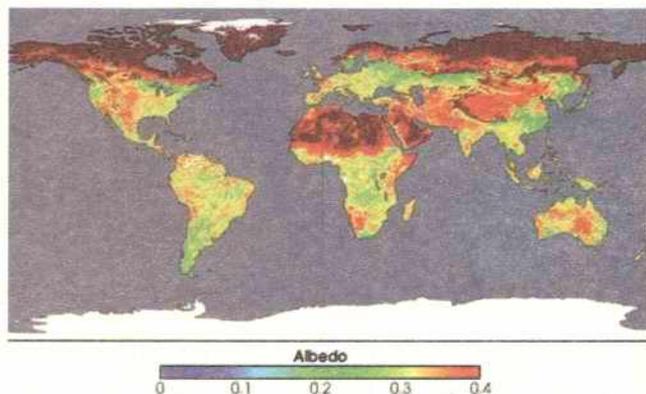


Fig. 88.- La frontera del Sahel en África se expande o restringe, considerablemente, durante los períodos de grandes sequías plurianuales. Imagen del albedo global del planeta (NASA/Goddard Space Flight Center).

Extensión y degradación del suelo en las tierras secas (en 10⁶ has)

Continente	Zona de aridez	Ligera y moderada	Fuerte y extrema	Superficie total
África	Subhúmeda s.	25,2	12,1	37,3
	Semiárida	69,9	39,6	109,5
	Árida	150,2	22,3	172,5
América del N.	Subhúmeda s.	15,0	3,2	18,2
	Semiárida	50,9	2,3	53,2
	Árida	6,3	1,6	7,9
América del S.	Subhúmeda s.	21,4	2,3	23,7
	Semiárida	43,9	4,0	47,9
	Árida	-	-	-
Asia	Subhúmeda s.	70,6	7,7	78,3
	Semiárida	124,2	17,2	141,4
	Árida	131,9	18,8	150,7
Australia	Subhúmeda s.	4,2	0,6	4,8
	Semiárida	32,9	1,0	33,9
	Árida	48,9	0,0	48,9
Europa	Subhúmeda s.	59,0	2,3	61,3
	Semiárida	32,9	1,0	33,9
	Árida	4,8	0,0	4,8
Total		897,6	133,7	1035,5
%		17,3	2,6	19,9
Total superficie de las tierras secas susceptibles de desertificación, unas 5200 millones de hectáreas				

Fuente: UNEP, 1992, Martin y Balling, 1994

Causas de la degradación del suelo

Clase de Degradación	África	Asia	América del S	América del C	América del N	Europa	Australia	Mundo
Erosión por agua	46	58	51	74	63	52	81	56
Erosión eólica	38	30	17	7	36	19	19	28
Degradación química	12	10	29	11	0	12	12	12
Degradación física	4	2	3	8	1	17	2	4

Fuente: Oldeman et al., 1991

Las causas más importantes de la degradación del suelo por continentes y en el mundo se indican en la ❖ tabla superior (en porcentajes).

Como se ve, es la erosión por agua el proceso más importante de la degradación del suelo y de la desertificación, destacando, en particular, Australia, América Central y América del Norte. África es el continente más afectado por la erosión eólica, seguida de Norteamérica. Fue aquí, en los años treinta del siglo XX, cuando una prolongada sequía en vastas extensiones deforestadas de las *Great Plains* (grandes llanuras) ocasionó una extraordinaria erosión del suelo por el viento, fenómeno conocido como *Dust Bowl*. El gobierno de Roosevelt aprobó, en 1933, la Agricultural Appropriation Act (Ley de asignación de fondos para la agricultura), asignando 160000 dólares para el estudio de las causas de la erosión del suelo y las medidas para evitarla. Ese mismo año se creó el Soil Erosion Service (departamento de erosión del suelo) para combatir el problema, aunque más bien fue un instrumento para fomentar el empleo y mejorar la renta de los agricultores. Tres años más tarde, se aprobó la Soil Conservation Act (Ley de conservación del suelo), asumiendo, en el marco del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, todas las competencias en

la conservación del suelo. Fueron los servicios pioneros en captar la importancia de la erosión y en el diseño de estrategias para prevenirla y recuperar suelos. En la actualidad, la erosión del suelo es uno de los cinco problemas ambientales más importantes en EE. UU., según informes de la Agencia de Protección Ambiental.

Finalmente, el estado global de los suelos en el mundo y las principales actividades humanas que conducen a la desertificación se muestran, respectivamente, en las ❖ tablas siguientes.

Estos datos suministran una idea aproximada de la importancia que las acciones humanas tienen en el proceso de desertificación. Llama la atención que los autores hayan estimado que en los países industrializados de América del Norte, Europa y Australia no se registra degradación por sobreexplotación del suelo y de los ecosistemas, lo cual no parece cierto, como confirman otras fuentes dignas de crédito. De hecho, la industrialización tiene una apreciable incidencia en la degradación del suelo en América del Norte. Es la incertidumbre que ofrecen, con frecuencia, las distintas fuentes de información que utilizan distintos métodos de captura de datos.

Estado global de los suelos en el mundo

Continente	Superficie total 10 ⁶ has	Suelo estable %	Suelo con alto riesgo de degradación %	Suelo degradado por el hombre %	Suelo inservible %
África	2966	15	43	17	25
Asia	4256	33	38	18	11
América C. y S.	2074	19	62	15	4
América del N. Europa, Australia	3717	38	46	11	5
Mundo	13013	28	46	15	11

Fuente: Oldeman *et al.*, 1991

Las principales causas antrópicas de la desertificación

Clase de Degradación	África	Asia	América del S	América del C	América del N	Europa	Australia	Mundo
Sobreexplotación de los ecosistemas	13	6	5	18	-	-	-	-
Pastoreo excesivo	49	26	28	15	30	23	80	35
Actividades agrarias inadecuadas	24	27	26	45	66	29	8	28
Deforestación	14	40	41	22	4	38	12	30
Industrialización	-	-	-	-	-	9	-	1

Fuente: Oldeman *et al.*, 1991

A escala planetaria

La desertificación es un fenómeno en rápida progresión a pesar de la detección del problema y de la puesta en marcha de planes de acción a partir del año 1977, cuando se celebró la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desertificación (Nairobi, Kenya). Desde esta fecha, alrededor de 105 millones de hectáreas (dos veces la superficie de España) han sido esterilizadas. Las estimaciones varían según las fuentes y no se dispone de datos fiables que permitan determinar con exactitud el grado de velocidad de la desertificación en las diferentes regiones amenazadas: a principios de la década de 1990 se estimaba que unos 33 millones de kilómetros cuadrados se encontraban en riesgo de desertificación; además se evaluaba que unos 10 millones de hectáreas se convertían cada año en no aptas para el cultivo y el pastoreo (PNUE, 1991). Algunos años después, estas cifras se revisaban a la baja, estimándose que la superficie degradada por año oscilaba entre 3,5 y 4 millones de ha (PNUE, 1995).

Pese a esta incertidumbre sobre la información, se disponen de datos que dan una idea aproximada de la gravedad del problema (Agenda 21; UNEP, 1992; INCD, 1994a; International Development Agency, 1994; COP-4, 2000; www.unccd.int) que se extiende por las tierras secas del planeta (Fig. 89):

a) Unos 110 países de la Tierra sufren el problema o se hallan amenazados;

b) Afecta al 70 % de las tierras secas de todo el mundo; es decir, 3600 millones de hectáreas están degradadas o han incrementado su marginalidad (Dregne, 1986; COP-4, 2000);

c) Como resultado de las actividades humanas, una superficie de alrededor de 1200 millones de has, desde la Segunda Guerra Mundial, ha experimentado un proceso de degradación de sus suelos que va de un grado moderado a extremo, (EarthAction, 1994);

d) Amenaza, seriamente, los medios de subsistencia de más de 1200 millones de personas (más de la sexta parte de la población mundial). La desertificación y la sequía menoscaban la productividad de la tierra, la salud y prosperidad de las poblaciones. Sus tierras corren peligro de convertirse en desierto;

e) La pérdida de capacidad productiva de las tierras afectadas y, en consecuencia, de los ingresos se estima en unos 26 billones de dólares por año. Según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 1996), entre 1978 y 1991 la desertificación ocasionó, en el mundo, una pérdida de ingresos estimada entre 300 y 600 billones de dólares.

f) En las zonas áridas y semiáridas del planeta, el 30 % de las tierras de cultivo de regadío, alrededor de 500000 has, se desertifican cada año a causa, sobre todo, de la salinización del agua y el suelo. Superficie que equivale, aproximadamente, a las nuevas superficies que cada año se ponen en regadío;

g) Es difícil calcular el monto de las pérdidas económicas ocasionadas por la desertificación. Hacia 1990, las pérdidas se estimaban en unos 11000 millones de dólares en regadío, unos 8000 millones en secano y unos 23000 millones en tierras de pastos. Es decir, la desertificación priva a los **países afectados** de unos ingresos anuales de unos 42000 millones de dólares anuales (Dregne y Chou, 1992; PNUMA);

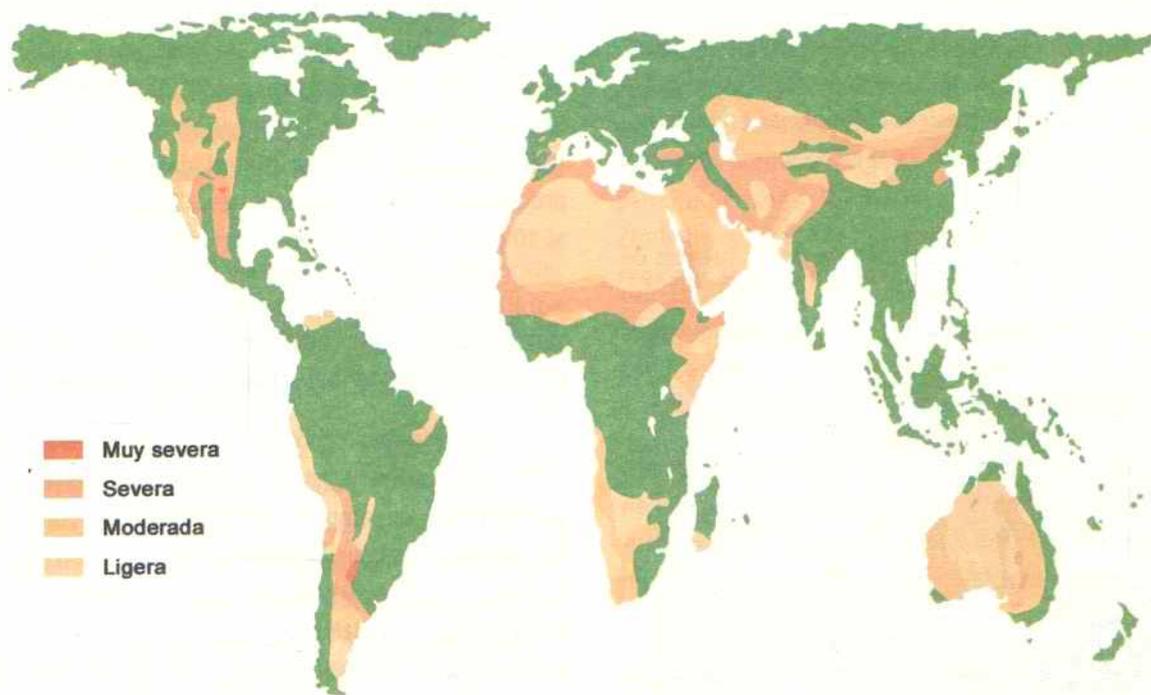


Fig. 89.- Desiertos y territorios con riesgo de desertificación (UNEP, 1992)

h) Las Naciones Unidas calculan que hacen falta entre 1,8 y 4 billones de pesetas anuales durante los próximos 20 años para combatir la desertificación (COP-4, 2000);

i) Según el PNUMA, de los 110 países que presentan riesgo de desertificación, sólo 18 son industrializados o productores de petróleo y disponen de recursos financieros para hacer frente al problema por ellos mismos. En los demás, desertificación equivale a hambre y marginación;

j) Se estima que alrededor de 150 millones de personas están en riesgo de ser desplazadas a consecuencia de la desertificación. El número de emigrantes se incrementa

en unos 3 millones cada año, de los cuales la mitad pertenecen a África;

k) Los territorios secos del planeta se hallan en gran parte desertificados o corren un alto riesgo de estarlo: en África el 73 %. Aquí la degradación está más acentuada que en los demás continentes porque sus condiciones socio-económicas son netamente más desfavorables. Las mujeres y los niños son particularmente vulnerables. En África, un 49 % de los 10 millones de defunciones anuales que se producen en niños menores de 5 años están asociados con la malnutrición. La desertificación y la explotación abusiva de las zonas silvestres han reducido espectacular-

mente los recursos alimentarios de poblaciones enteras. Entre los efectos de la malnutrición derivada de la desertificación pueden mencionarse, además de la pobreza, la malnutrición proteinoenergética, deficiencias en micronutrientes (como las vitaminas A y C), infecciones, ceguera y anemia (COP-4, 2000).

l) La OMS señala que el agotamiento de las fuentes de agua y la desertificación obligan a la población al uso intensivo de aguas contaminadas, con las consiguientes consecuencias en la transmisión de enfermedades tales como cólera, tífus y diarreas;

ll) Además, las sequías y la desertificación incrementan el riesgo de incendios, que a menudo desencadenan episodios de contaminación de la atmósfera y pueden causar y exacerbar enfermedades respiratorias agudas en niños y adultos;

m) En Asia, la desertificación afecta a unas 1400 millones de hectáreas y el problema se agrava con el tiempo (UNCED, 1992; Agenda 21). Desde las dunas de Siria hasta las montañas fuertemente erosionadas del Nepal y los altiplanos deforestados de Laos, el proceso de degradación se extiende por amplios territorios de Arabia Saudí, Yemen, Jordania, Irán, Kazajistán, Uzbekistán, Kirguistán, Tayikistán, Turkmenistán, Pakistán, India, Mongolia y China. En este último y extenso país, la desertificación afecta aproximadamente a un 27 %, donde viven casi 400 millones de personas. El Programa de Acción Nacional de China calcula que cada año se pierden 6500 millones de dólares a causa de la desertificación.

n) En los Estados Unidos de América, la erosión del suelo es un problema grave que induce a la desertificación. La Administración norteamericana ha estimado que el proceso afecta severamente al 40 % de los suelos labra-

dos. En algunos estados las pérdidas de suelo por erosiones hídrica y eólica alcanzan valores muy importantes: Nevada, 68 t.ha⁻¹.año⁻¹; Texas, 40t.ha⁻¹.año⁻¹; Colorado e Iowa, 32 t.ha⁻¹.año⁻¹; Kansas y Montana, 30 t.ha⁻¹.año⁻¹ (USDA, 1987). Se estima que el daño que la agricultura produce a los recursos naturales y bienes puede ascender al 10 por ciento de la renta agrícola.

ñ) En Australia, la desertificación en diversos grados, sobre todo por sobrepastoreo, es el problema ambiental más grave e importante (Mabbutt, 1978; Pickup *et al.*, 1994);

o) Aunque más conocida por sus pluviselvas, América Latina y el Caribe registran condiciones desérticas, áridas y semiáridas en amplios territorios, como la costa del Pacífico desde el sur de Ecuador hasta el norte de Chile. Tierra adentro, a altitudes de entre 3000 y 4500 metros, se despliegan los altiplanos secos de la puna, que cubren extensas zonas de Perú, Bolivia, Chile y Argentina. Al este de los Andes, un amplio territorio semiárido se extiende desde las estribaciones septentrionales del Chaco, en Paraguay, hasta la Patagonia, al sur de Argentina. En Brasil, el noreste es semiárido y presenta importantes problemas de erosión; el problema de la degradación de los ecosistemas se agrava por la explotación intensiva de los bosques y por los incendios. Globalmente, el porcentaje de tierra afectada se acerca al 20 % del total.

p) Si las tasas de deforestación continúan al ritmo actual (según la FAO y mediante evaluación realizada con imágenes de satélites, en todo el mundo se suprimen más de 50000 millas cuadradas de bosque al año, de las cuales la mitad en América del Sur), los bosques tropicales pueden desaparecer en unos 100 años, alterando severamente el ciclo del carbono y el ciclo hidrológico y, correlativamente, desencadenando unos efectos enormes en el

clima global, además de eliminar la mayor parte de las especies vegetales y animales del planeta. La deforestación es una importante causa de la desertificación y una amenaza para la biodiversidad de la Tierra. En la actualidad, detener la deforestación de los bosques tropicales es un clamor internacional.

q) La mayor parte de México es árida y semiárida, sobre todo el noroeste, y algunas zonas del Caribe (República Dominicana, Haití, Cuba, Jamaica y las Antillas Holandesas) presentan zonas secas con problemas de agua, erosión y desertificación.

r) Según la hipótesis de un equipo de científicos encabezados por Gene Shinn del Centro de Geología Costera localizado en Florida, la expansión del Sahara, apreciablemente en los países del Sahel y sur del Magreb, está ocasionando la muerte de los corales en el mar Caribe por el depósito, cada año, de varios centenares de millones de toneladas de polvo transportado a través del Atlántico (ver la Fig.14 en la página 27). La investigación constata que los arrecifes coralinos desaparecen cuanto mayores son los depósitos. La arena transportada es rica en hierro, elemento que estimula el crecimiento de ciertas algas fatales para los corales. Junto al polvo sahariano, los pesticidas tóxicos y un hongo (*Aspergillus sydowii*) destruyen los corales y, notoriamente, las gorgonias (*Sciences et Avenir*, 2001; Ciencia y futuro).

s) La desertificación agrava la pobreza y la inestabilidad política. Contribuye a crear situaciones de escasez de agua, hambrunas (Fig. 90), desplazamientos internos, migraciones y descomposición social. Estas situaciones provocan inestabilidad política y tensiones sociales y pueden crear conflictos armados. De los aproximadamente medio centenar de conflictos armados

que se han contabilizado en el mundo a lo largo de los pasados años noventa, la mitad se han registrado en países áridos y semiáridos con procesos de desertificación muy avanzados o en camino de estarlo. Turbulencia social y política (Nigeria, Liberia, Costa de Marfil, Etiopía-Eritrea, Somalia, Egipto-Sudán, Uganda, Zimbabwe, etc.) e inestabilidad geopolítica en las regiones son la dimensión política de la desertificación.

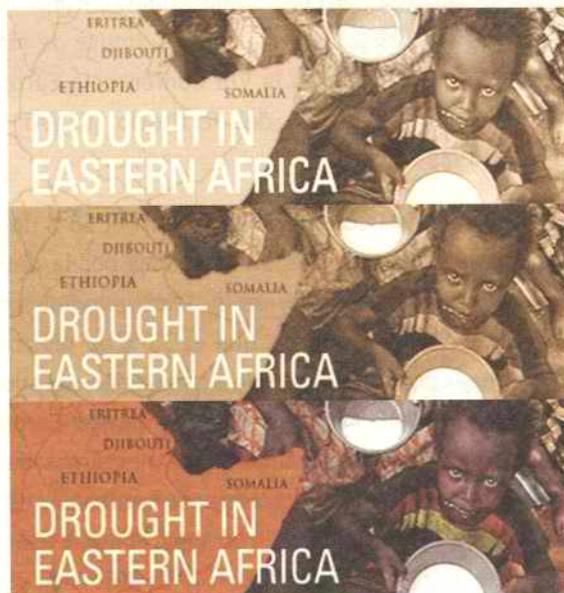


Fig. 90.- Sequía y desertificación contribuyen, junto a otras causas, a producir agudas hambrunas, en particular en África

Se deduce, pues, que la desertificación constituye un problema ambiental global de los más severos que presentan las tierras áridas del planeta, manifestándose en diferentes formas y causando distintos grados de degradación y daños que dificultan o impiden el desarrollo durable.

En Europa

Europa no escapa al proceso. En el siglo XX, desde finales de los años sesenta y comienzos de los años setenta, se empezó a constatar la importancia del proceso de degradación del suelo por erosión; por ello, en 1972 el Consejo de Europa aprobó la *Carta europea del suelo*, donde se reconoce que es un recurso natural, limitado, destructible, que debe ser protegido contra la erosión y gestionarse adecuadamente. En la misma línea está el documento *Suelo, fundamento y límite de nuestro desarrollo*, aprobado en la VIII Conferencia Europea de Ministros de Ordenación del Territorio (CEMAT) en octubre de 1988.

El PNUMA (1991) consideraba que casi el 65 % de las tierras secas de Europa estaban afectadas por la desertificación; un año más tarde, en el *Atlas mundial sobre la desertificación* se evaluaba que el 33 % de las zonas secas europeas era susceptible de degradación del suelo. El programa CORINE (1992) de la Comunidad Europea reconocía que de 15 a 25 millones de hectáreas de la Unión Europea estaban amenazadas por la erosión, especialmente en la Europa mediterránea. En las tierras mediterráneas, la erosión del suelo y la desertificación amenazan alrededor del 50% de los paisajes menos húmedos. Según el *Informe Dobris*, alrededor de 115 millones de hectáreas (el 12 % del total de las tierras europeas) se hallan afectadas por la erosión hídrica, y otras 42 millones de hectáreas (el 4 %) por la erosión eólica. Esta degradación afecta, severamente, la productividad de la tierra. El problema es mayor en las regiones mediterráneas a causa de su mayor fragilidad en las condiciones ambientales.

El Tratado de la Unión Europea de 1992 y, posteriormente, el documento *Agricultura y medio ambiente* (Comunicación 88-338 final de 16/08/1988) de la Dirección General VI, evaluaban que el suelo agrícola era de alrededor del 50 % del territorio de la Unión Europea, y el suelo forestal, el 28 %, y especificaban que una de las preocupaciones a largo plazo es la degradación de los suelos y sobre todo la erosión, que no sólo es debida a prácticas agrarias intensivas (causa principal de la erosión del suelo), sino también al abandono de la actividad agraria en zonas desfavorecidas, de colina o de montaña, reconociendo que, en la Comunidad, el conjunto de zonas amenazadas por la erosión se incrementa cada año. Se reconocía que si bien los países septentrionales no escapan al problema de la erosión, éste es particularmente importante en los países mediterráneos, donde las pérdidas de tierras vegetales alcanzan casi los 3000 kg. ha⁻¹. año⁻¹.

La cuenca mediterránea es un complejo mosaico de diferentes ambientes, diferentes culturas y diferentes historias de interacción humana con el medio ambiente, y un ● *ecoespacio* vulnerable a la desertificación. Los países del entorno mediterráneo comparten muchos problemas, como la incertidumbre espacio-temporal de las precipitaciones, el abandono de las áreas rurales, el crecimiento de la urbanización en las áreas costeras, la disminución del potencial agrícola, la frecuencia de los desastres naturales (sismicidad, inundaciones, incendios), el creciente aumento del turismo, la fuerte erosión del suelo y la preocupante amenaza de la desertificación. Al mismo tiempo, sin embargo, presentan una amplia gama de situaciones específicas y un diferente potencial de remedios para combatir los procesos de degradación.

Entre los países mediterráneos hay importantes diferencias socioeconómicas, de desarrollo, participación, comunicación, educación y políticas, que dificultan una acción común que combata el problema ambiental y social global mediterráneo de la desertificación. En el *Convenio de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación*, los países mediterráneos se hallan encuadrados en tres distintos anexos, los africanos en el Anexo I (África), los del este mediterráneo en el II (Asia) y los de la ribera septentrional en el IV (Mediterráneo Norte); esta fragmentación espacial trata de ser paliada con la elaboración de programas de acción subregional y regional en los que se hallen involucrados todos los países del entorno del Mare Nostrum y que coordinan todos los planes nacionales. La prevención y mitigación de la desertificación es imposible sin el desarrollo de recursos humanos, sin investigación, sin la aplicación de nuevas tecnologías y sin la implantación de medidas socioeconómicas. La globalización de las políticas de lucha contra la erosión, la desertificación y la degradación en la totalidad de la cuenca mediterránea es necesaria para garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas (Comisión Europea, 1997).

Las regiones de la Europa comunitaria mediterránea (Mediterráneo Norte) donde la erosión del suelo y la amenaza de la desertificación aparecen como procesos importantes son (Fig. 91): en Grecia, islas Cícladas, oeste de Creta y algunas zonas del Ática; en Italia, islas de Cerdeña y Sicilia y algunas zonas de la Calabria y la Basilicata; y en Portugal, regiones del Alentejo y Algarve. Sin embargo, de todos los países mediterráneos europeos es España donde la pérdida de suelo y los procesos de desertificación adquieren mayor relevancia y preocupación.



Fig. 91.- Países y regiones de la Europa mediterránea seca amenazados por la desertificación (ATLAS DESER).

España, un país amenazado

España tiene zonas calificadas como de alto riesgo de desertificación. Según los criterios establecidos en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Desertificación, el 27 % del territorio se encuentra afectado por el proceso de degradación con diversos grados de intensidad. El coste financiero del proceso equivale al 0,1% del PIB, y por aterramiento de embalses desaparecen unos 250 hm³/año, por valor de unos 24 millones de euros (Ruiz Izquierdo, 1996). En Andalucía, el beneficio no obtenido por la erosión del suelo agrícola asciende a casi 240 millones de euros; si se eliminase la erosión, se ganaría un 7,3 % del valor añadido (Moreira, 1991).

Las tierras españolas bajo condiciones climáticas áridas y semiáridas constituyen unos espacios sensibles y complejos en los que las interacciones clima-recursos-naturales-hombre



Fig. 92.- Las tierras españolas bajo condiciones semiáridas y sub-húmedas secas son las más vulnerables a los procesos de desertificación. La alta reflectancia que registra gran parte de la península Ibérica es un indicador de la aridez y, en muchas zonas, del riesgo de desertificación que se cierne sobre ellas. Imagen del satélite (NASA/Goddard Space Flight Center).

mantienen un precario equilibrio (Fig. 92). Además, estos ambientes parecen ser los sistemas más sensibles a los efectos del cambio climático global y de la desertificación. En los comienzos del tercer milenio, entre los más importantes problemas, cambios y alteraciones ambientales que están afectando a las regiones secas españolas, se halla la explotación sostenible de sus recursos naturales, donde se juega el destino de sus poblaciones.

El riesgo de desertificación de las tierras secas constituye, probablemente, el más importante problema de degradación de los paisajes mediterráneos españoles, en particular de los agrosistemas de las tierras marginales y de aquellos donde se practica una agricul-

tura intensiva con altos insumos. En los ambientes áridos y semiáridos, el suelo (soporte de toda producción alimentaria) es un recurso no renovable, porque estas tierras registran una fragilidad ecológica y una baja o nula capacidad de recuperación por razones geomorfológicas, climáticas, biológicas y humanas.

Caracteres de unos ambientes singulares, sensibles y vulnerables a la desertificación: áreas problema, puntos calientes

La sensibilidad de las tierras mediterráneas a la erosión y a la desertificación proviene de un gran número de factores que obedecen a diferentes fenómenos que se presentan a escalas espaciales y temporales con diversos grados de magnitud. Los modelos, estadísticas, estimaciones y previsiones realizados por un abultado número de programas y proyectos internacionales y nacionales, estiman que durante los próximos

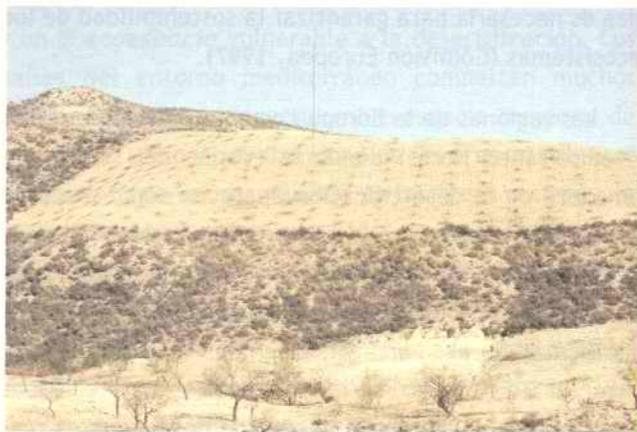


Fig. 93.- La roturación de tierras marginales en pendiente activa y acelera los procesos de erosión del suelo.

40 o 50 años gran parte de las regiones áridas, semi-áridas y subhúmedas secas repartidas por las cuencas hidrográficas del sur, Guadalquivir, Guadiana, Segura, Júcar, y amplias zonas de la del Ebro, las más afectadas y las de mayor riesgo por el proceso de degradación, pueden registrar un incremento de las temperaturas y del albedo y una significativa disminución de las precipitaciones y acentuación de las sequías, que pueden incrementar la fragilidad de los ecosistemas e inducir la aceleración de los mecanismos de desertificación. Sin embargo, el grado de degradación ambiental y el riesgo de desertificación que registran amplios territorios de las regiones mediterráneas españolas está ligado, básicamente, a un modelo de desarrollo socio-económico que no permite el desarrollo sostenible.



Fig. 94. – Los incendios forestales al suprimir la cubierta vegetal, hacen vulnerable al suelo frente a la erosión por agua y al viento.

En España, aproximadamente la mitad de su superficie registra un grado de aridez más o menos acusada. En estos territorios, el 70 % de los paisajes registran

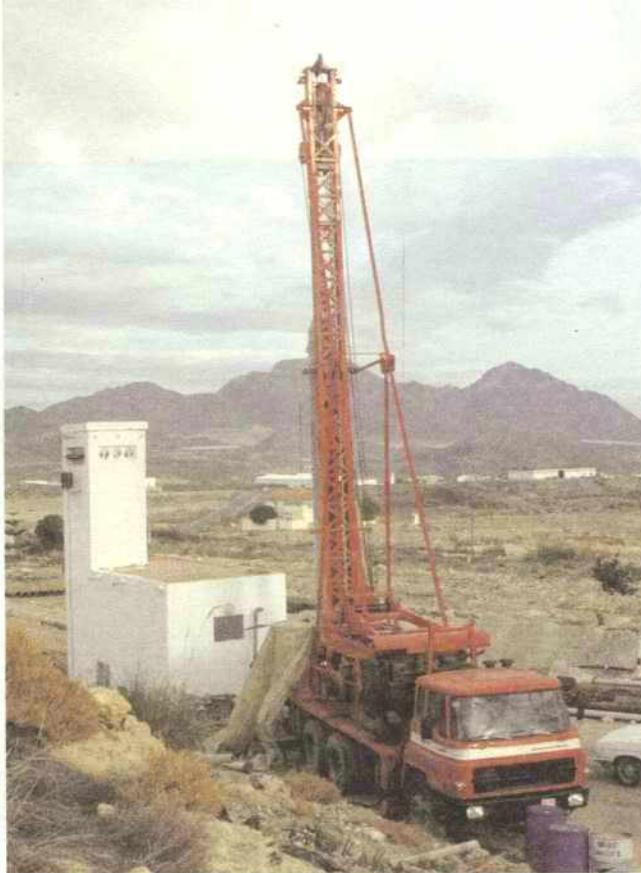


Fig. 95.- La sobreexplotación de las aguas subterráneas es considerada como causa de la desertificación.

riesgo de desertificación moderada, mientras que el 30 % restante está afectado seriamente por los procesos de degradación: erosión, roturaciones de tierras marginales (Fig. 93), incendios (Fig. 94), explotación abusiva de las aguas subterráneas (Fig.95), intrusión de aguas marinas, salinización (Fig.96), contaminación por pesticidas, acidificación del suelo, cambios de uso del suelo (Fig.97), modificación de los albedos, y uso inadecuado de las tierras de mejor calidad agronómica (Fig.98). De nuevo, son las cuencas hidrográficas del sur y amplias zonas de la del Ebro las de mayor riesgo, y por comunidades autónomas, Murcia, Andalucía, Valencia, Castilla-La Mancha, Aragón...



Fig. 96.- La utilización de aguas de mala calidad química por el regadío ocasiona la salinización del suelo y su creciente desertificación.



Fig. 97.- Los cambios de uso del suelo pueden fragilizar el suelo y hacerlo más sensible a los procesos de degradación por erosión.



Fig. 98.- Con mucha frecuencia, la expansión urbana se realiza en las ciudades mediterráneas sobre suelos de alta calidad agronómica, como son los aluviales. En la imagen, la Vega Media del Segura, huerta y ciudad de Murcia

Principales escenarios de la desertificación en España

a) *Cultivos herbáceos de secano*

En cultivos de secano situados sobre fuertes pendientes y con largos períodos de barbecho en los que no se realizan prácticas de conservación, la pérdida de suelo por erosión hídrica es muy elevada. Determinadas prácticas de cultivo, como la quema de rastrojeras y el laboreo en sentido de máxima pendiente con maquinaria pesada, contribuyen a incrementar los procesos erosivos (Fig. 99). Para el conjunto del territorio español, las zonas con índices de pérdida de suelo superiores a 50 t/ha/año representan el



Fig. 99.- El laboreo del suelo en sentido de máxima pendiente es otro de los factores de la erosión del suelo. Mértola, Alentejo (Portugal).



Fig. 100.- Los cultivos arbóreos de secano como el almendro, por el marco de plantación y sistema de laboreo, son los escenarios en donde mayor cantidad de suelo se pierde cada año por erosión hídrica.



Fig. 101.- La expansión del olivar a expensas del bosque, en laderas de fuerte pendiente, activa los procesos de erosión del suelo. Plantación joven de olivar, Castril (Granada).

18,2 % del territorio, equivalente a una superficie de 9161 millones de hectáreas (Ministerio de Medio Ambiente, 2000). Más del 90 % de la superficie afectada se halla bajo clima mediterráneo más o menos árido.

b) *Cultivos leñosos de secano*

En tierras con cultivos leñosos, principalmente de olivo, vid y almendro, debido a las peculiaridades de su cultivo (baja densidad, suelo en barbecho permanente) y su frecuente localización en pendiente, la erosión del suelo es fuerte, sobre todo en las áreas marginales (Fig. 100), cuyos sistemas agronómicos extensivos (laboreo en máxima pendiente, quema de rastrojos, sistema de rotación de cultivos...) repercuten negativamente, con

frecuencia, en su propia sostenibilidad y, por tanto, propician el desarrollo de procesos de desertificación.

En el caso del olivar y desde el punto de vista económico, la renta está más soportada por regulaciones de la Política Agraria Común europea (PAC) que por los propios mercados. Las previsiones indican que la demanda sólo superará a la oferta a corto plazo. Tal circunstancia confiere poca solidez al sistema agronómico en su conjunto, tal como se manifiesta en el fuerte descenso de la población activa agraria, con un saldo migratorio negativo y un alto índice de paro.

La conservación del suelo se ve seriamente comprometida. En buena parte de Jaén predominan las pendientes fuertes: el 30 % de la superficie presenta pendientes que superan el 30 % de inclinación. Las estimaciones de pérdidas de suelo en el olivar están comprendidas entre 60 y 100 t/ha/año (Laguna y Giráldez, 1990), cifras que rebasan ampliamente los umbrales de sostenibilidad para la conservación del suelo. Parece que las nuevas plantaciones no suelen tener en cuenta medidas para controlar la erosión (Fig. 101).

Por otra parte, la reducción del laboreo requiere el control o sustitución de la vegetación espontánea por cubiertas cultivadas. Todo ello exige la utilización de herbicidas y fertilizantes nitrogenados, cuyos efectos globales deberían ser evaluados.

En definitiva, el sistema agronómico del olivar está sujeto a cambios de mercados y políticas agrarias. Tal circunstancia amenaza su sostenibilidad económica, favorece su expansión o contracción episódicas y la adopción de tecnologías sofisticadas para incrementar el rendimiento a corto plazo. Sin embargo, no estimula la inversión para controlar la erosión del suelo, principal factor que afecta



Fig. 102- Las áreas de cultivos marginales abandonados son muy sensibles a los procesos de erosión. Cuenca del río Vinalopó (Alicante).

a la sostenibilidad del olivar a medio y largo plazo (Rallo, 1998) y a la desertificación del territorio.

c) *Cultivos marginales abandonados*

Los cultivos marginales abandonados constituyen otra extensa área, en proceso de rápida expansión, con una importante tasa de desertificación (Fig.102). Sin embargo, la dinámica puede ser progresiva o regresiva según las condiciones geomorfológicas y bioclimáticas que registre la zona afectada. En aquellas áreas que no hayan traspasado el umbral de irreversibilidad ecológica y se hallen bajo condiciones climáticas que suministren humedad al suelo, la recuperación de la cubierta vegetal en sus diferentes estratos es notable. Sin embargo, en las áreas con balances hídricos muy deficitarios de los territorios con clima semiárido extremado y árido, el abandono no propicia la restauración de la vegetación sino la degradación por erosión del suelo.



Fig. 103.- La roturación de tierras que fueron cultivadas y posteriormente abandonadas, si no se adoptan medidas de conservación del suelo, suele ocasionar serios problemas de erosión.

d) Roturación de terrenos abandonados

Las tierras que sostuvieron, tiempo atrás, cultivos marginales, frecuentemente en terrazas, presentan también alta vulnerabilidad a la desertificación. Estas tierras, que a partir de 1960 fueron abandonadas debido al cambio socioeconómico, se cubrieron en muchos casos de vegetación espontánea. Sin embargo, desde finales de los años ochenta empezaron a ser roturadas de nuevo para acogerse a las subvenciones, procedentes de la Unión Europea, en el marco de la PAC. La falta de medidas de conserva-

ción del suelo ha activado los procesos de erosión con la correlativa degradación del recurso (Fig. 103).

e) Suelos salinizados en áreas de agricultura intensiva

La salinización de los suelos es una de las causas recientes, más importantes, de la desertificación de extensas áreas. Afecta a los suelos agrícolas irrigados con agua de mala calidad química y exceso de sales, por uso de aguas superficiales salinas, de acuíferos explotados abusivamente o procedentes de acuíferos afectados por intrusiones marinas en las zonas costeras. Este proceso es:

particularmente importante en las zonas costeras mediterráneas de la península Ibérica (en particular en el sureste) y en las Islas Canarias, donde la intrusión marina afecta al 80% de los acuíferos de la franja costera, según datos de 1994 de la Dirección General de Obras Hidráulicas, si bien su evolución es compleja y difícil de predecir.

Un buen ejemplo se da en el Campo de Dalías (Almería), donde el sistema de acuíferos presenta diferentes grados de conectividad con el mar y, por consiguiente, distintas tasas de salinidad (Pulido *et al.*, 1993, 2000). A pesar de los numerosos trabajos que han pretendido abordar las soluciones al problema del agua y de las intrusiones marinas, la falta de conocimientos suficientes sobre los procesos hidrogeológicos en el funcionamiento del sistema, de sus repercusiones en el suelo y, en general, de los impactos ambientales que puede ocasionar, no favorece la toma de conciencia del riesgo por parte de los agricultores ni de las administraciones públicas, propiciando la desertificación.

f) Acuíferos sobreexplotados

Toda consideración sobre la sostenibilidad en el uso de las aguas subterráneas y su relación con los procesos de desertificación conlleva un análisis del concepto de sobreexplotación en términos hidrogeológicos. Una posibilidad es definir como acuífero sobreexplotado aquel en que los costes económicos, sociales y ambientales derivados de su utilización intensiva son mayores que los beneficios que genera (LLamas *et al.*, 2000). En todo caso, la sobreexplotación de acuíferos origina una alteración de los balances hídricos de tal magnitud, que en ocasiones es prácticamente imposible, a partir de situaciones actuales, deducir cuál era la situación inicial del sistema. Los intensos bombeos que se registran en muchas áreas y los correlativos descensos de

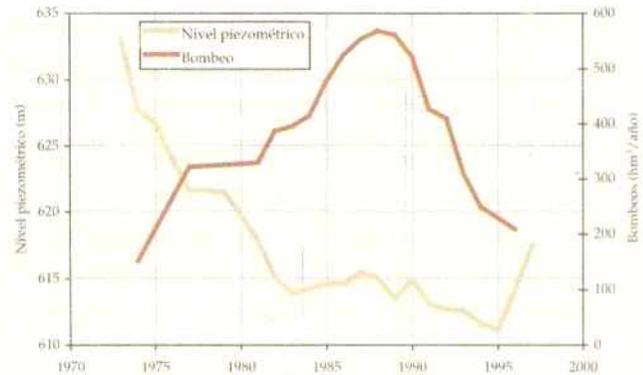


Fig. 104.- Evolución de niveles piezométricos y bombeos en el acuífero de La Mancha occidental (Manzanares, Ciudad Real) (MIMAM, 1998).

niveles *piezométricos* (Fig.104) ocasionan importantes alteraciones en los caudales circulantes por las cuencas hidrográficas e incluso llegan a invertir las direcciones de los flujos hídricos entre las zonas de recarga y las de descarga. En acuíferos explotados abusivamente, los flujos se encuentran condicionados por los conos de bombeo, dirigiéndose hacia

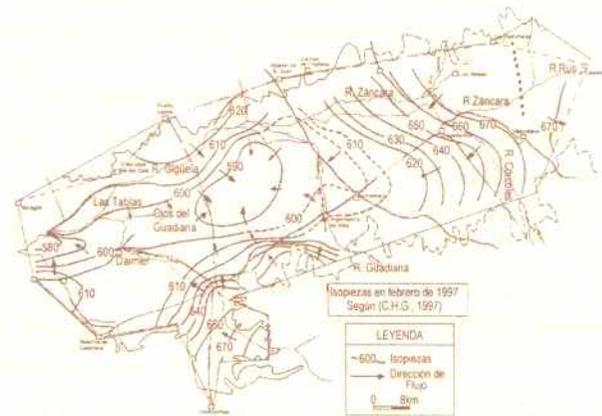


Fig. 105.- Isopiezas del sistema acuífero de La Mancha occidental (Febrero 1997) (Cruces de Abia y Martínez Cortina).

Las aguas subterránea y su explotación en España

Ámbito de planificación	Recarga en régimen natural (hm ³ /año)	Bombeo (hm ³ /año)	Porcentaje de bombeo respecto a la recarga natural	Porcentaje de bombeo respecto al total de España
Norte I	2745	–	–	–
Norte II	5077	19	0,4	0,3
Norte III	894	33	3,7	0,6
Duero	3000	371	12,4	6,7
Tajo	2393	164	6,9	3,0
Guadiana I	687	738	107,4	13,3
Guadiana II	63	76	120,6	1,4
Guadalquivir	2343	507	21,6	9,2
Sur	680	420	61,8	7,6
Segura	588	478	81,2	8,6
Júcar	2492	1425	57,2	25,8
Ebro	4614	198	4,3	3,6
C. I. Cataluña	909	424	46,6	7,7
Galicia Costa	2234	–	–	–
Península	28719	4853	16,9	87,7
Baleares	508	284	55,9	5,1
Canarias	681	395	58,0	7,1
España	29908	5532	18,5	100

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, 1998

la parte central del acuífero desde todos sus contornos. Esto ocurre, por ejemplo, en algunos acuíferos en la cuenca alta del río Guadiana (Fig. 105) (Cruces de Abia y Martínez Cortina, 2000).

Algunos de los más destacados impactos ambientales producidos por la sobreexplotación de los acuíferos son:

1) la degradación en la calidad del agua subterránea, en particular por la intrusión de agua de mar por descenso y agotamiento de los niveles freáticos próximos a la costa y el espectacular aumento de la conductividad de lo que resta de aguas subterráneas. El deterioro de la calidad de las aguas subterráneas está ligado también a otras causas, como la utilización de productos químicos en la agricultura o las filtraciones de contaminantes de origen urbano e industrial;

2) la explotación abusiva de las aguas subterráneas puede modificar, acusadamente, el funcionamiento hidrogeológico del sistema, por la desconexión hidráulica entre los cursos de superficie y los acuíferos, proceso que degrada los caudales que circulan por la superficie, que en casos extremos pueden llegar a desaparecer; es el caso de los llamados Ojos del Guadiana (La Mancha), que dejaron de manar en 1983 y en la actualidad son un campo de cultivo;

3) el descenso excesivo de los niveles piezométricos puede producir importantes afecciones, degradación o incluso desaparición de áreas de gran interés ecológico, como son los humedales. La cuenca alta del río Guadiana ofrece un buen ejemplo de la afección ambiental producida por el fuerte descenso de los ● **piezómetros**. Según el inventario de la Dirección General de Obras Hidráulicas (1996), en este territorio existían hacia 1970 un total de 113 humedales, de los que actualmente subsisten 79 con una superficie húmeda de 6998 ha. La superficie húmeda desaparecida en menos de treinta años por desecación se

estima en 10022 ha (Cruces *et al.*, 1998; Cruces de Abia y Martínez Cortina, 2000);

4) la explotación abusiva de las aguas subterráneas puede ocasionar problemas de hundimientos del terreno. La falta de presión hidráulica provoca un aumento del peso de la tierra que hay encima y ocasiona, con frecuencia, importantes colapsos del terreno. En los acuíferos cársticos, el descenso del nivel piezométrico puede ocasionar el hundimiento de las cavidades y galerías que pudieran existir. En el caso de materiales arcillosos o blandos poco consolidados, el bombeo de las aguas subterráneas produce también una disminución en la presión del agua intersticial, con una consiguiente consolidación progresiva de los sedimentos que puede conducir a una lenta y significativa subsidencia del terreno (Llamas *et al.*, 2000).

En España, la extracción anual de aguas subterráneas se estima en unos 5500 hm³, de los que el 80 % se utilizan en regadíos, el 17 % en usos urbanos y el 3 % restante en usos industriales (MIMAM, 1998). La ✱ tabla de la página anterior ofrece, para toda España, las cifras de recarga y bombeo por ámbitos de la planificación hidrológica.

Como puede verse, en los ámbitos del Guadiana I y Guadiana II, en valores medios globales para el ámbito territorial, las extracciones son superiores a la recarga natural, lo que revela la insostenibilidad del sistema de explotación. En la cuenca del Segura, la relación bombeo/recarga supera el 80 %, y en otros ámbitos, como los del sur, Júcar, cuencas interiores de Cataluña y las islas, esta relación alcanza valores elevados, entre el 45 y el 80 %.

En cuanto a la cantidad relativa de bombeos en cada ámbito, destaca la cuenca del Júcar, en la que se concentra el 26 % del total de España, seguida por el Guadiana I, Segura y Guadalquivir, con valores del orden

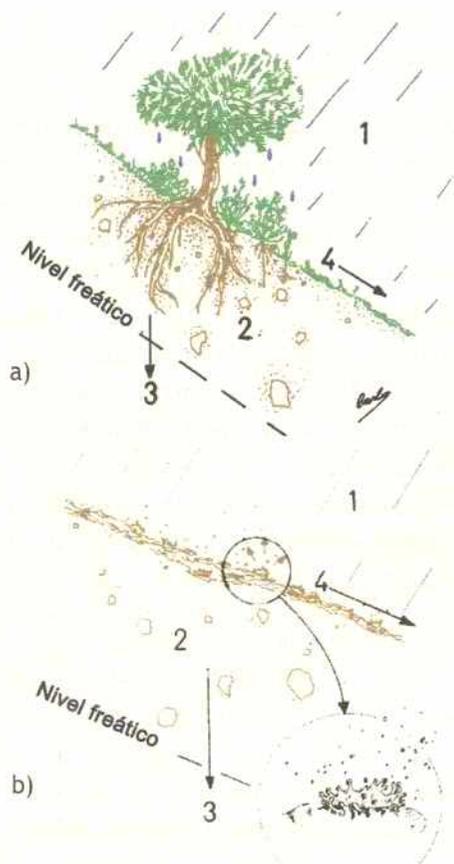


Fig.106.- Efectos del incendio en el proceso de erosión (Sanroque y Rubio, 1982).

a) Lluvia antes del incendio: la vegetación intercepta la energía de las gotas de lluvia, parte del agua es retenida por el suelo y absorbida por las raíces de las plantas, otra fracción de la lluvia se infiltra hasta alcanzar el nivel freático, las raíces del suelo sujetan las partículas del suelo, la escorrentía es reducida y la erosión poco importante.

b) Impactos de la lluvia después del incendio: la vegetación ha desaparecido. Las gotas impactan directamente contra el suelo destruyendo los agregados y obturando los poros de superficie, la capacidad de infiltración se reduce, el suelo absorbe menos agua y, la mayor parte del agua de lluvia se hace escorrentía que desmantela el suelo.

del 10 %. Estos datos agregados engloban con frecuencia situaciones locales muy diversas, ya que hay graves sobreexplotaciones puntuales de los acuíferos con tasas de bombeo que superan en más de 10 veces la recarga, y, a la inversa, otras en las que no existe sobreexplotación con un *ratio* global bombeo/recarga unidad. En ocasiones, la sobreexplotación desemboca en situaciones prácticamente irreversibles, ya que la regeneración de los acuíferos requiere plazos de tiempo muy largos, con frecuencia incluso superiores al siglo. La sobreexplotación de las aguas subterráneas constituye, pues, un buen indicador del riesgo de desertificación y de las posibilidades de desarrollo sostenible en diversos ámbitos territoriales de planificación.

g) Incendios recurrentes

El riesgo de erosión del suelo está determinado por el régimen de precipitaciones y por la protección que proporciona la vegetación. En el área mediterránea, las precipitaciones más cuantiosas e intensas suelen registrarse a principios y mediados de otoño, cuando ha terminado la estación de mayor riesgo de incendios, durante la cual existe una alta probabilidad de grandes alteraciones en la cubierta vegetal. Precipitaciones máximas y reducción de la protección del suelo conduce a procesos de erosión acelerada con importantes efectos a corto plazo (Vélez, 1994). Las prolongadas sequías estivales acompañadas de altas temperaturas y, con frecuencia, fuertes vientos terrales favorecen la sequedad de la vegetación y la rápida propagación del fuego.

Los incendios causan la eliminación repentina de la cubierta vegetal protectora del suelo, la fauna y los microorganismos, modifican el microclima, alteran las propiedades físicas y químicas del suelo en distintas medida según la



Fig. 107.- El exceso de ganado en áreas con producción de biomasa limitada, por las condiciones climáticas, es otra de las causas que induce a la degradación de la cobertura vegetal y del suelo. Este factor es particularmente importante en las regiones secas.

frecuencia, intensidad y tiempo que registre el incendio, y además pueden degradar la fertilidad natural. La estabilidad estructural es muy importante para el mantenimiento de unas buenas propiedades físicas del suelo y para retener la humedad; el fuego intenso la hace disminuir, mucho más acusadamente en laderas con fuerte pendiente. En este tipo de laderas, la lluvia puede desencadenar un proceso erosivo que conduzca a la desaparición del recurso y deje al descubierto la roca subyacente (Sanroque y Rubio, 1982; Sala y Rubio, 1994), como muestra la Fig. 106.

Por otro lado, las propiedades químicas del suelo también pueden ser alteradas por los incendios. El fuego

intenso incrementa el pH del suelo, haciéndolo más básico y creando problemas de nutrición vegetal; destruye o disminuye la cantidad de materia orgánica, componente esencial del suelo, y, correlativamente, altera muchas propiedades relacionadas con ella que afectan a la productividad y a la posibilidad de revegetación. Fuegos con altas temperaturas producen una disminución en la capacidad de ● *intercambio catiónico*, como resultado de la degradación de la materia orgánica, y en consecuencia el suelo tiene menos posibilidad para retener nutrientes, que serán arrastrados por las escorrentías. Finalmente, el fuego suele producir un aumento notable de la salinidad del suelo e interrumpir los ciclos del nitrógeno. Por ello,

si los incendios son intensos y reiterados, la recuperación de la vegetación es muy difícil, el suelo queda desnudo y sometido a las erosiones hídrica y eólica y al riesgo de desertificación (Fig. 106).

h) *Áreas sobrepastoreadas*

Cuando se sobrepasa la capacidad de carga pastante de un territorio, se produce un rápido deterioro de los pastizales y del suelo que los soporta. Además, el pisoteo del ganado ocasiona la compactación del suelo, que dificulta la germinación de las semillas, hace disminuir sensiblemente la infiltración y, correlativamente, incrementa los coeficientes

de escorrentía y las tasas de erosión. Este tipo de degradación es particularmente importante en los frágiles ecosistemas de las áreas más áridas (Fig. 107).

i) *Áreas de matorral degradado y eriales*

La degradación de estos espacios es el resultado de un largo proceso histórico de interacción de procesos naturales y antrópicos. Estos territorios albergan una vegetación muy degradada, insuficiente para proteger el suelo, y además registran una dinámica regresiva agravada por la alta tendencia a incendiarse. Son áreas con fuertes pérdidas de suelo y altas tasas de producción de sedimentos (Fig. 108).

Fig.108.- Las áreas de matorral degradado y eriales, constituyen otro de los puntos calientes de la desertificación, cuando su manejo no es adecuado.



13

Implicaciones ambientales más relevantes de la desertificación

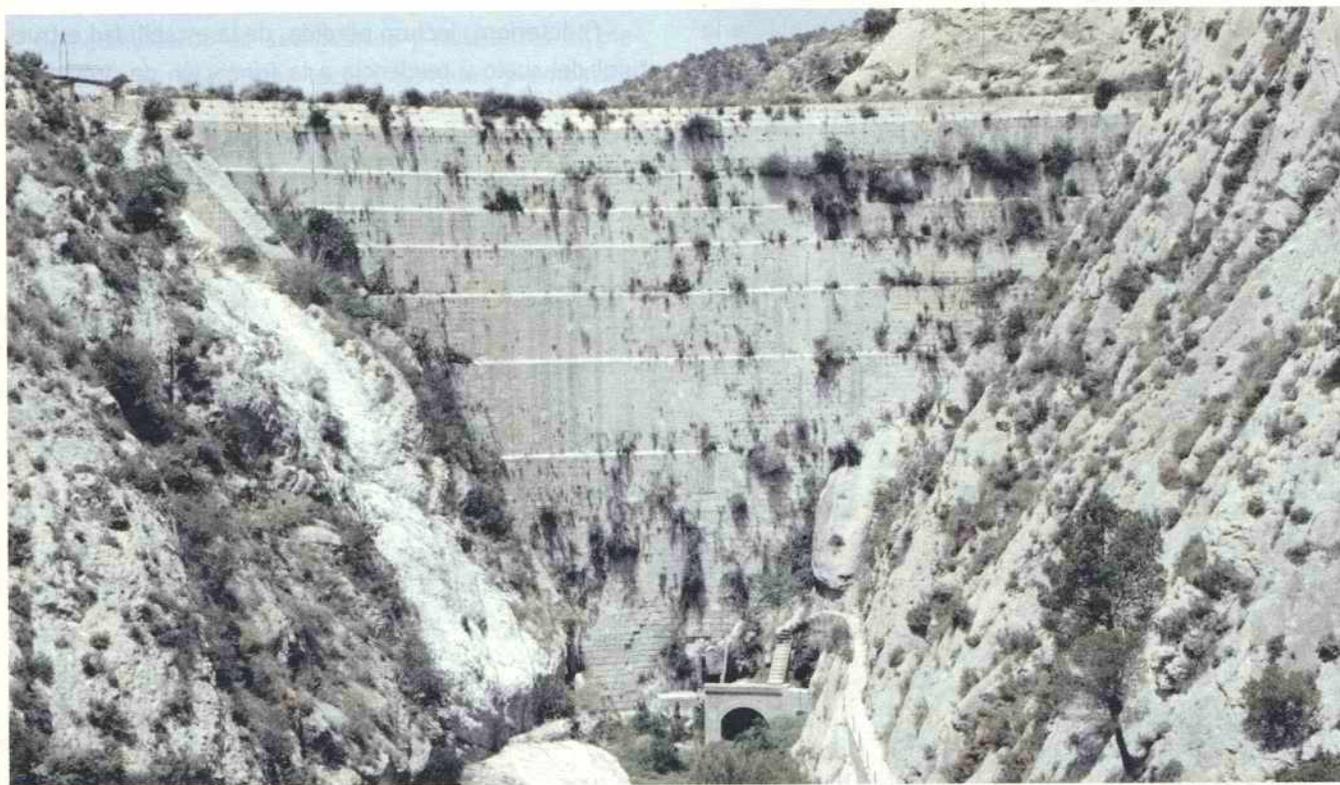


Fig.109.- La erosión y la desertificación ocasionan la pérdida de importantes masas de suelos forestales y agrícolas que, con frecuencia, se acumulan como sedimentos en los embalses, haciéndoles perder capacidad de almacenaje de agua y regulación, e incluso se llega a su abandono por colmatación total. Embalse de Tibi (Alicante).

Pese a la escasa disponibilidad, y a veces fiabilidad, de observaciones y datos sobre la extensión y severidad de los procesos de erosión y desertificación a diferentes escalas espacio-temporales, se conocen bastantes síntomas y res-

puestas de los geosistemas de los territorios mediterráneos semiáridos. Las implicaciones ambientales visibles y más relevantes de la erosión hídrica y de la desertificación se expresan en:

a) perturbación en la regulación del ciclo hidrológico;

b) degradación de la cubierta vegetal; el bosque es sustituido por formaciones secundarias de arbustos y matorral, cada vez más abiertas, que pueden dejar de existir. Modificaciones aerodinámicas, con el paso de una superficie cubierta, donde la vegetación introduce cierta rugosidad, a un suelo desnudo, que será vulnerable a la erosión;

c) reducción excesiva de la biomasa y pérdida de biodiversidad;

d) invasión de especies vegetales específicas de suelos degradados. Expansión del ● **xerofitismo**;

e) aceleración de las erosiones hídrica y eólica;

f) deterioro, incluso pérdida, de la estabilidad estructural del suelo y tendencia a la formación de compacta-



Fig.110.- Cárcavas y barrancos son geoformas originadas por procesos de erosión y desertificación en ambientes semiáridos, degradados por acciones humanas.

ciones y costras. Disminución de la porosidad, de la capacidad de infiltración y del contenido en humedad, a la vez que se incrementan los valores de las escorrentías superficiales y de su potencial erosivo;

g) transferencias de suelo y nutrientes de las partes altas de las laderas a las bajas;

h) acumulación de sedimentos y nutrientes al pie de las laderas, vaguadas, lechos fluviales y embalses (Fig. 109);

i) aumento de la pedregosidad. Afloramiento en superficie del material parental;

j) presencia de una gama de colores, de diversos tonos, correspondientes a estratos más profundos del suelo y regolito que afloran por decapitación de los horizontes superiores;

k) pérdida de la base de sustentación de las raíces de las plantas;

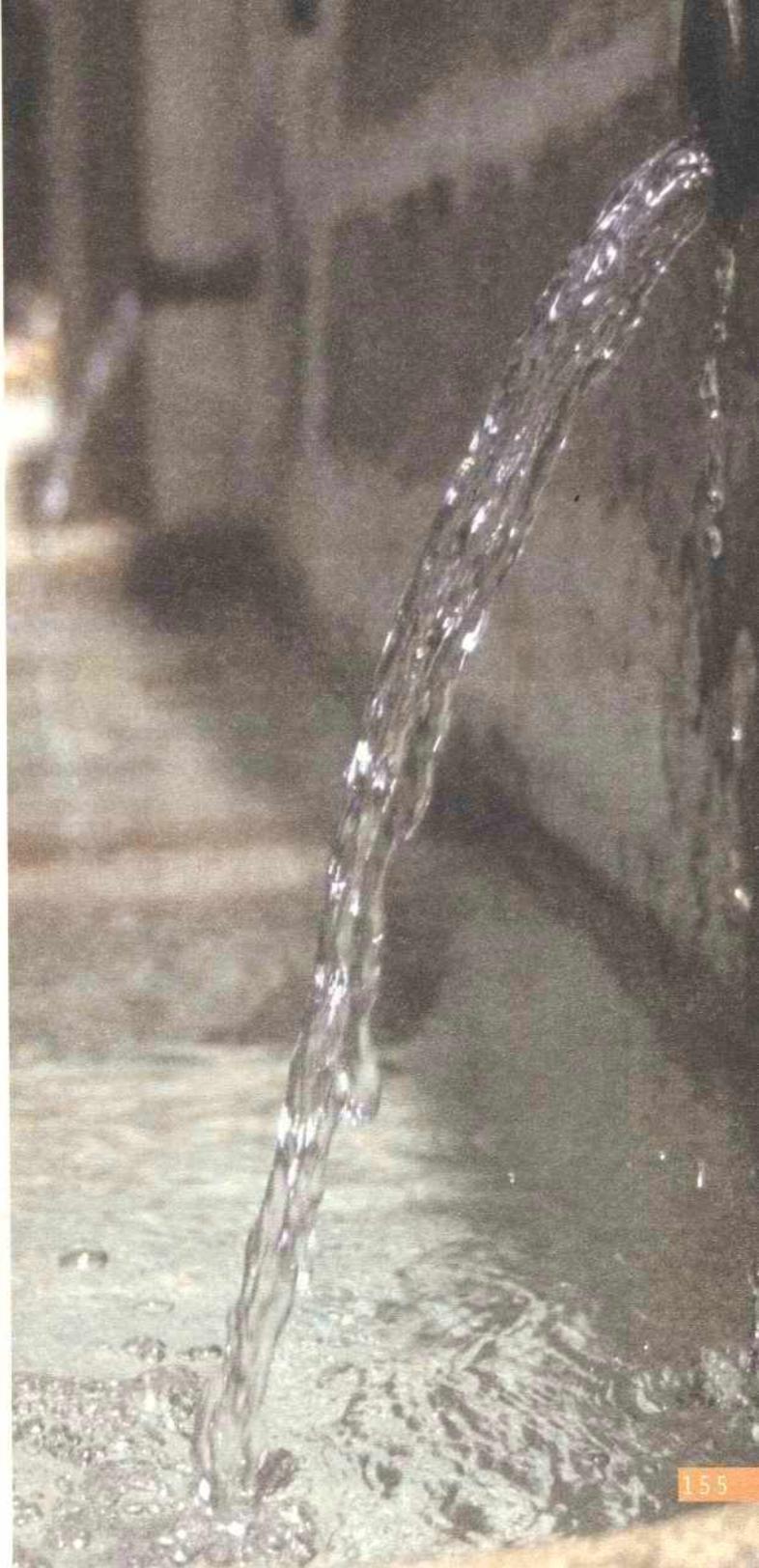
l) incisiones de diversa magnitud en el terreno: surcos, regatos, cárcavas, barrancos y ramblas (Fig.110);

ll) topografía abarrancada

m) presencia de columnas, pedestales y montículos de erosión;

n) hundimientos y socavones por remoción y evacuación de material por conductos debajo de la masa de suelo y regolito (*sufusión*);

Fig. 111.- La desaparición de fuentes y manantiales puede ser considerada como indicador del proceso de desertificación de un territorio.



ñ) salinización y alcalinización en los horizontes superficiales del suelo, notoriamente en los regadíos que usan aguas de mala calidad química;

o) aumento de la salinidad en los humedales y cursos de agua;

p) acidificación (pH, exceso de Al, Cu, Co, Fe, Mn, Zn);

q) degradación de los recursos hídricos e incremento de la variabilidad en el régimen de los cursos de agua;

r) reducción del agua disponible debido al deterioro de los flujos hídricos y a la sobreexplotación de las aguas subterráneas;

s) desaparición de fuentes y manantiales y de los humedales y fauna a ellos asociados (Fig. 111);

t) incremento del riesgo de avenidas e inundaciones;

u) puede producir alteraciones climáticas por incremento del albedo y del contenido en polvo en la atmósfera;

v) cambios en el microclima del suelo por modificaciones en la absorción de energía solar, flujos de calor sensible, temperatura, evaporación, etc.;

x) incremento de la aridificación;

y) reducción de la superficie de tierra fértil;

y z) finalmente, la erosión y la desertificación, como consecuencia de lo anterior, registran importantes implicaciones socioeconómicas, siendo, probablemente, las más graves y preocupantes: desequilibrios en los rendimientos y producción de los agrosistemas, disminución o pérdida de ingresos económicos, ruptura del equilibrio tradicional entre las actividades pastorales y agrícolas, abandono de tierras y cultivos, deterioro del patrimonio paisajístico (Fig. 112) y emigración.

Todas las manifestaciones enumeradas pueden ser interpretadas como indicadores de la degradación de los sistemas naturales por un uso no sostenible de los recursos básicos.



Fig. 112 - Deterioro de la calidad paisajística por desertificación. Belmonte (Cuenca).

14

El Convenio de Naciones Unidas de lucha contra la desertificación

La comunidad internacional venía reconociendo, desde hacía tiempo, que la desertificación y la sequía constituían problemas de carácter económico, social y ambiental que afectaban a numerosos países en todas las regiones del mundo, y que era necesario adoptar medidas conjuntas para luchar contra el proceso de degradación y mitigar los efectos de la sequía. Constituía un problema mayor. Para abordar el problema las Naciones Unidas (Fig. 113) convocaron en 1977 en Nairobi (Kenya) la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desertificación (CNUD), en la que se constató la gravedad del proceso de degradación, realizándose una primera cartografía de las regiones afectadas, además de realizar una primera identificación de las causas y efectos. Además, se aprobó un *Plan de Acción para la Lucha contra la Desertificación* (PACD), pero, desafortunadamente, a pesar de los esfuerzos, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) concluía, en 1991, que si bien se habían registrado ejemplos locales de éxito, el problema de la degradación de tierras en las zonas secas se había intensificado.

En 1992, en Río de Janeiro (Brasil), las delegaciones de los países participantes en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Desarrollo y Medio Ambiente (UNCED) reconocieron la dimensión global del problema y la necesidad de una movilización general para combatir el fenómeno de degradación de la tierra. Para ello, acordaron la elaboración de un *Convenio de Lucha contra la Desertificación*, en

los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular África (CCD, 1994). El

Convenio trataba de ser una especie de compensación para los países africanos, por ser los más afectados por el problema. Durante la negociación, los representantes de otros continentes (Asia, América Latina, Mediterráneo europeo) expusieron la amplitud de los problemas de desertificación en amplias zonas, consiguiendo la aprobación de anexos regionales específicos. Entre los anexos, el concerniente al Mediterráneo Norte fue el que registró mayor dificultad para ser aceptado, ya que los ponentes sostenían que los anexos regionales tenían, esencialmente,

◆ Más Información

<http://www.unccd.int>



Fig.113.- Logo de Naciones Unidas

un carácter financiero y que, por ello, el Convenio debería limitarse únicamente a los países y regiones en vías de desarrollo. En diciembre de 1992, la Asamblea General de las Naciones Unidas daba el visto bueno, aprobando la resolución 47/188.

El Convenio fue formalmente aceptado en junio de 1994 y abierto para su firma en París en octubre del mismo año. Entró en vigor el 26 de diciembre de 1996 al ser ratificado por más de cincuenta países. Veinte años después de la CNUD y cinco años más tarde de la UNCED, en septiembre-octubre de 1997 se celebra en Roma la primera Conferencia de las Partes; la segunda en Dakar (noviembre-diciembre de 1998), la tercera en Recife (noviembre de 1999), la cuarta en Bonn (diciembre de 2000). En la actualidad, el número de países firmantes del Convenio es de 171, de los cuales 120 lo han ratificado, lo que refleja la creciente preocupación por este fenómeno mundial. España ratificó el Convenio el 15 de diciembre de 1996 (BOE, núm. 36, de 11 de febrero de 1997).

Otra de las importantes aportaciones de la Conferencia de Río fue la elaboración de un plan de acción para el siglo XXI, conocido como *Agenda 21*. En el capítulo 12, titulado "Ordenación de los ecosistemas frágiles: la lucha contra la desertificación y la sequía", se ofrecen algunas estrategias y medidas para combatirlas, mediante el fomento de programas específicos y su integración en los programas de desarrollo y planificación ecológica nacional. Los objetivos de los programas propuestos se basan en la adopción de planes de horizontes amplios para la recuperación y conservación de suelos, la forestación y la reforestación y de medidas de prevención y vigilancia de la desertificación. Se subraya la importancia de la educación ambiental, participación popular e intensificación de la cooperación regional e internacional. Las acciones pro-

puestas en la *Agenda 21* se estimaron en 7180 millones de dólares/año. Sin embargo, esta propuesta no tuvo el apoyo financiero de los países desarrollados y tampoco se pudo establecer una fecha para que los países cumplieren con el objetivo de contribuir con el 0,7 % de su producto interior bruto, denominado *Ayuda Oficial al Desarrollo*, para combatir la desertificación y el subdesarrollo de los países pobres.

El Convenio, pese a todo, es un valioso instrumento de planificación, jurídicamente vinculante, que ofrece una gran variedad de directrices y disposiciones para la aplicación práctica y efectiva de acciones que hagan frente al problema de la desertificación. Exhorta a los países afectados a elaborar programas de acción nacionales y subregionales de lucha contra la desertificación, para ser aplicados en el marco de un proceso participativo permanente. Sin embargo, en la IV Conferencia de las Naciones Unidas contra la Desertificación (COP-4), celebrada en Bonn (Alemania) en diciembre de 2000, se puso de manifiesto que el Convenio no tiene el apoyo que precisa y que las diferencias entre el norte y el sur obstaculizan las negociaciones acerca del camino a seguir contra la progresiva desertificación mundial. En el transcurso de la Conferencia se evidenció que la lucha contra la sequía y la desertificación era un factor secundario para el mundo industrializado y que la *Convención contra la Desertificación*, nacida en la Conferencia de Río (Río de Janeiro, 1992), era un acuerdo de segunda categoría.

Hasta finales del año frontera de 2000, no se había logrado movilizar una financiación adecuada, ni acciones concretas, ni otro tipo de recursos para que los países en desarrollo afectados por la desertificación cumplieren sus compromisos de desarrollar y aplicar sus planes nacionales de lucha contra la desertificación. Por parte de los países

más industrializados, sólo se habían formulado vagos compromisos y aplazamientos; mientras tanto, la erosión del suelo y el avance de la desertificación a costa de terrenos cultivados y cultivables afectaba a la subsistencia de un número creciente de población y eran la causa que obligaba, cada año, a unos 135 millones de afectados a abandonar sus hogares (COP-4; Bonn, 2000). En el cambio de siglo, los países afectados por la desertificación seguían aspirando a que se concretase un plan para financiar la aplicación del Convenio que había entrado en vigor en 1996. Para ello consideraban necesario que se abriese un fondo propio dentro del *Global Environment Facility* (Línea de crédito ambiental global), creado en 1990 entre el Programa de Ayuda al Desarrollo de las Naciones Unidas y el Banco Mundial.

Todavía en la actualidad, y a pesar de todo, el *Convenio de lucha contra la desertificación*, los *Convenios de cambio climático y biodiversidad* y la *Agenda 21* (Fig. 114) siguen siendo unos necesarios y buenos marcos jurídicos a través de los cuales la comunidad internacional intenta abordar, globalmente, los mayores problemas ambientales de nuestro tiempo.

Aportaciones más relevantes del Convenio Internacional

El Convenio ha creado una serie de instituciones y procedimientos para orientar los programas de acción. De modo global, los resultados más relevantes son:

a) considerar la desertificación como uno de los más graves problemas ambientales, como una seria amenaza



Fig. 114.- Los convenios de Naciones Unidas.

para la fertilidad de la tierra. Luchar contra la desertificación y mitigar los efectos de la sequía en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, mediante la adopción de medidas eficaces apoyadas por acuerdos de cooperación y asociación internacionales, en el marco de un enfoque integrado de los aspectos físicos, biológicos y socio-económicos, acorde con la *Agenda 21* de la Conferencia de Río, la llamada Cumbre de la Tierra (Río de Janeiro, 1992), para contribuir al logro del desarrollo sostenible en las zonas afectadas.

b) aprobación de definiciones comunes para los términos clave: *desertificación*, *lucha contra la desertificación*, *sequía*, *mitigación de los efectos de la sequía*, *tierra*, *degradación de tierras*, *zonas áridas*, *zonas semiáridas*, *zonas subhúmedas secas*, *zonas afectadas*, *países afectados*, ● *organización regional de integración económica* y ● *países partes desarrollados*.

c) por *desertificación* se entiende la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas

a causa de la variabilidad climática y las actividades humanas. En la actualidad, en amplios territorios de las regiones secas, el suelo tiende a perder rápidamente su productividad biológica y económica, imposibilitando el desarrollo sostenible y estimulando la pobreza. El suelo y los ecosistemas que soporta se degradan por erosión hídrica y eólica, intensificación de los cultivos, sobrepastoreo, deforestación, incendios, deficientes prácticas de irrigación, sobreexplotación de aguas subterráneas, salinización, pérdida de biodiversidad, sequías, etc. Este mal uso y gestión es, generalmente, causado por presiones económicas y sociales, ignorancia y sequías.

d) se establece que los países afectados elaboren y ejecuten programas de acción nacionales y subregionales para ser aplicados en el marco de un proceso participativo permanente (poblaciones locales afectadas y ONGs). Estos programas deben incluir acciones de protección de los recursos naturales y otras de carácter socio-económico: ordenación del territorio, prácticas agrarias, producción alimentaria, comercialización de los productos agrícolas, actividades productivas alternativas para luchar contra la pobreza, desarrollo rural integrado y apoyo a las poblaciones indígenas.

e) la ciencia y la tecnología son herramientas vitales en la lucha contra la desertificación. El estudio de las causas e impactos de la desertificación requieren la cooperación, la observación y la investigación científica internacional. La degradación de la tierra puede ser minimizada con la aplicación simultánea de las tradicionales y nuevas tecnologías. Ciencia y tecnología pueden responder a las necesidades de los pueblos afectados; el Convenio estimula a los investigadores para que sus conocimientos sirvan a estos objetivos.

El Anexo IV de aplicación regional para el Mediterráneo norte

El Convenio trata de ponerse en práctica mediante la adopción de programas de acción, cuyos objetivos y contenidos científicos específicos se detallan en los cuatro anexos de aplicación regional: I África; II Asia; III América Latina y el Caribe y IV el Mediterráneo Norte. En ellos se señalan directrices y disposiciones para la aplicación práctica y efectiva del Convenio en los países afectados y se ofrece a los miembros actuales un marco para la cooperación mutua y una acción nacional más eficaz.

En el caso del Mediterráneo europeo (Fig. 115), el Anexo IV define unas características comunes que favorecen la desertificación en esta zona:

Convención de Lucha contra la Desertificación

ANEXO IV

ANEXO DE APLICACION REGIONAL PARA EL MEDITERRANEO NORTE

Artículo I OBJETO

El objeto del presente anexo es señalar directrices y disposiciones para la aplicación práctica y efectiva de la Convención en los países Partes afectados de la región del Mediterráneo norte a la luz de sus condiciones particulares.

Fig. 115.- Los problemas de desertificación detectados en numerosas áreas de los países mediterráneos europeos justificaron el "Anexo IV" del Convenio de Naciones Unidas contra la Desertificación.

a) condiciones climáticas semiáridas que afectan a amplias zonas, sequías estacionales y plurianuales, extrema variabilidad de las precipitaciones y lluvias súbitas de gran intensidad y capacidad erosiva;

b) existencia de amplias superficies con suelos pobres con marcada tendencia a la erosión y propensos a la formación de costras superficiales;

c) relieve desigual y escarpadas laderas;

d) grandes pérdidas de cubierta vegetal a causa de los incendios;

e) crisis de la agricultura tradicional, abandono de tierras y cultivos y de las prácticas de conservación de suelo y aguas;

f) explotación insostenible de los recursos hídricos y graves daños ambientales inducidos, y finalmente

g) concentración de la actividad económica en las zonas costeras como resultado del crecimiento urbano, las actividades industriales, el turismo y la agricultura de regadío.

Por otro lado, en el Programa de Acción Regional Mediterráneo norte, en fase de preparación, se han establecido unos temas transnacionales relevantes para combatir la desertificación, los cuales están relacionados con:

a) las áreas más sensibles en términos de riesgo de desertificación;

b) los parámetros e indicadores regionales comunes para los procesos y la mitigación;

c) la recopilación, análisis e intercambio de datos técnicos y científicos;

d) el intercambio de datos y de información;

e) la implicación de la sociedad civil en el proceso del Programa de Acción;

f) el conocimiento tradicional y las prácticas que salvaguarden la calidad del paisaje mediterráneo.

El Convenio se está aplicando mediante la obligatoriedad de adoptar planes de acción en cada uno de los países firmantes. Estos programas de acción nacionales permiten abordar, en cada país, las principales causas de la sequía y la desertificación, y a la vez determinar las medidas que será necesario adoptar para prevenir, mitigar y rehabilitar. Los programas de acción nacional se deben coordinar, según corresponda, con programas a escalas subregional o regional, con el fin de complementar e incrementar su eficacia. Asimismo, dos o más países afectados en una misma región podrán convenir en elaborar un programa de acción conjunto.

Ante estas condiciones y recomendaciones, el desarrollo y la aplicación de planes y estrategias para combatir la desertificación, es una cuestión vital para el desarrollo durable de las poblaciones que habitan las áreas mediterráneas amenazadas, en el caso particular español, amplias zonas de Andalucía Oriental, Murcia, Aragón, Comunidad Valenciana, Castilla-La Mancha y Extremadura.

f) la desertificación es, fundamentalmente, un problema de desarrollo sostenible. Es un problema de pobreza y bienestar humano, así como de preservar el medio ambiente. Los aspectos sociales y económicos, incluyendo la seguridad en la alimentación, las migraciones y la estabilidad política, también están ligados a la degradación de la tierra.

g) la desertificación de amplias zonas de los países secos es un problema creciente que es necesario afrontar con recomendaciones y medidas concretas, adaptadas tanto a las circunstancias específicas de cada país, región o zona como a la necesidad de integrarlas en el entorno en que han de ser realizadas, con el fin de contribuir a un desarrollo sostenible.

h) cuantiosos recursos financieros deben ser canalizados e invertidos eficientemente. Los fondos nacionales de los países afectados deben ser considerados, pero los programas bilaterales de asistencia y las agencias internacionales deben suministrar recursos financieros importantes (Banco Mundial, Fondo Monetario Internacional). Es necesaria la coordinación de las ayudas sobre el terreno. El Convenio establece un mecanismo global con el fin de apoyar los esfuerzos encauzados a movilizar y mejorar la disponibilidad de recursos financieros sustanciales para respaldar la ejecución de acciones. Este mecanismo, dirigido por el Fondo Internacional para el Desarrollo, alienta y asesora a los donantes, beneficiarios, bancos de desarrollo y ONGs para movilizar los recursos financieros necesarios. Además, procura impulsar una mejor coordinación entre las fuentes actuales de financiación y lograr una mayor eficacia en la utilización de los fondos.

i) el Convenio establece un número de instituciones y procedimientos para la acción internacional. La más impor-

tante es la Conferencia de las partes (CP), que incluye todos los países que hayan ratificado el Convenio. Es el órgano decisorio supremo y supervisa su aplicación. La CP se reúne periódicamente y una de sus principales funciones es analizar los informes presentados por las partes, detallando en qué forma se llevan a cabo sus compromisos. La CP, con base en los informes, elabora recomendaciones y también introduce enmiendas al Convenio o inicia conversaciones a efectos de incluir nuevos anexos. Orienta a la Convención sobre la evolución de la situación mundial y las necesidades de cada país parte y puede crear grupos especiales de expertos para asesorar sobre asuntos especiales.

j) el Convenio establece un secretariado permanente para apoyar a la CP a preparar la documentación, coordinar la recopilación y transmitir la información, atender las consultas y muchas otras actividades conexas. Un Comité de Ciencia y Tecnología, que asesora a la CP sobre temas científicos y tecnológicos, determina las prioridades de investigación y recomienda la adopción de medidas para aumentar la cooperación entre los investigadores. La Convención también establece una Red de Instituciones y Órganos existentes y otros de nueva creación. En esta línea, en 1995 la Unión Europea decidió crear una Red de Información sobre la Desertificación, en el marco del programa CEO (Center for Earth Observation; Centro para la observación de la Tierra). Esta red cubriría los temas relacionados con la desertificación y la gestión ambiental en África y en la cuenca mediterránea.

k) por último, subrayar que el *Convenio sobre desertificación* se distingue de otros convenios por el potencial grado de participación de las poblaciones y comunidades locales, así como de las organizaciones no gubernamentales (ONGs), ya que aparecen explícitamente consideradas y referenciadas. Las comunidades y los grupos sociales

afectados adquieren una función preponderante en la concepción y ejecución de los proyectos de lucha contra la erosión y la desertificación. Este potencial desarrollo participativo, que se expresa en el método *de abajo arriba* para luchar contra la desertificación, constituye un reto, ya que las comunidades y los grupos sociales afectados nunca habían sido citados en un texto jurídico de este orden por los estados que deben aplicar las resoluciones.

El Plan de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación (PAND). El marco institucional y la génesis

El cumplimiento del Convenio se basa en la puesta en marcha de los programas de acción nacional (PAN). De acuerdo con las directrices del Convenio, un PAN debe incorporar estrategias a largo plazo, permitir modificaciones en respuesta a circunstancias cambiantes, prestar especial atención a la adopción de medidas preventivas, realzar las capacidades nacionales de tipo climatológico, meteorológico e hidrológico, promocionar políticas y fortalecer marcos institucionales que desarrollen la coordinación y la cooperación, garantizar una participación efectiva en los niveles local, nacional y regional, y estar sujeto a revisiones periódicas.

Además, el Anexo IV para el Mediterráneo Norte señala que, entre los aspectos que los PANs deben tratar, se encuentran los marcos legislativo, institucional y administrativo; las pautas de uso del suelo, la gestión de los recursos hídricos, la conservación de suelos, la gestión agrícola, forestal y ● *pascícola* (de los pastos); la conservación y el manejo de la diversidad biológica; la defensa contra incendios forestales; la investigación, la formación y la concienciación de la sociedad.

El Ministerio de Medio Ambiente estableció a principios 1997, a través de la Dirección General de Conservación de la Naturaleza, los principios básicos para elaborar y poner en práctica el PAND español, que fue informado favorablemente por el Consejo Asesor de Medio Ambiente (CAMA), el órgano consultivo para la participación de la sociedad civil en la formulación de la política ambiental. A partir de entonces, un grupo de trabajo preparó un borrador del PAND para su discusión y enriquecimiento posterior por parte de las administraciones implicadas y de los representantes de la sociedad, antes de su aprobación por el gobierno y el parlamento. En la actualidad, tras la preparación y discusión de varias versiones del borrador, el PAND se halla prácticamente finalizado. Las directrices fueron presentadas en el acto de celebración del Día Mundial de la Desertificación (Murcia, 17 de junio de 2000). El PAND fue presentado en Madrid a las administraciones públicas en noviembre de 2000, y en Bonn en la IV Conferencia de las partes en diciembre del mismo año. Superada esta fase, pasará al consejo de ministros y al parlamento para su aprobación definitiva. El PAND, junto con los demás planes nacionales y estrategias sectoriales, constituye la estrategia nacional de desarrollo sostenible.

El PAND contempla la creación de un Comité Nacional de Lucha contra la Desertificación, que se encargará de la elaboración, coordinación y ejecución del programa y de seguir el proceso de desertificación en España. Estará integrado por todos los sectores implicados: representantes de los ministerios de la administración central, autonómica y local, organismos e institutos nacionales de carácter técnico y de investigación, organizaciones agrarias y forestales y organizaciones no gubernamentales ambientales.

El PAND define unas directrices que establecen el ámbito y las medidas necesarias para combatir la degradación del suelo y la desertificación, de acuerdo con las siguientes líneas:

- a) determinación de las áreas de actuación;
- b) identificación de acciones de lucha contra la desertificación;
- c) coordinación de políticas;
- d) identificación de una serie de líneas de acción específicas de lucha contra la desertificación.

El alcance y determinación de las áreas de actuación

El alcance del PAND está delimitado por las características de los procesos de desertificación tal y como son definidos en el Art. 1 del CCD. Los límites territoriales los establece el Instituto Nacional de Meteorología siguiendo las directrices del CCD, con los datos de precipitación y evapotranspiración en el período 1960-1990. Desde el punto de vista climatológico, en España las áreas vulnerables y con alto riesgo de desertificación son aquellas donde la *ratio* P/ETP es

$$0,05 < P/ETP < 0,65$$

donde P = Precipitación y

ETP = Evapotranspiración potencial;

es decir, aquellos territorios o cuencas hidrográficas bajo condiciones de aridez y déficit de agua más o menos acusadas. La cuenca hidrográfica, como unidad hidrológica,

biofísica y socioeconómica para planificar y ordenar los recursos naturales, es la unidad territorial que el PAND considera más adecuada para la actuación.

El Plan de Restauración Hidrológico-Forestal de 1991 elaboró un mapa de subcuencas hidrográficas con una superficie media de 1500 km². De este modo el territorio nacional quedó dividido en 3440 unidades con una superficie adecuada para una primera aproximación al problema de la erosión, el más importante proceso de la desertificación en España. El PAND pretende utilizar esta división en subcuencas, ya empleada para los estudios sobre erosión, porque resultan unidades de estudio apropiadas para los fines que se persiguen y porque reproducen de alguna manera las características fisiográficas y socioeconómicas de las grandes cuencas hidrográficas en las que están incluidas.

La metodología empleada establece clases de intensidad para cada uno de los factores que determinan la desertificación (aridez, erosión, incendios, sobreexplotación de acuíferos...), asignándose a cada subcuenca una de estas clases para cada factor. La integración de estos valores mediante un sistema de información geográfica (SIG) ofrece, en una primera aproximación, una idea de lo afectada que está cada subcuenca por el problema de la degradación. De este modo se obtiene un primer grupo de subcuencas con desertificación muy acusada en las que es urgente intervenir; otro grupo en el que los factores de desertificación son medianamente acusados, lo que indica que el proceso de desertificación se ha desencadenado; un tercer grupo de subcuencas cuyos territorios aún conservan unos recursos naturales aceptables, pero que potencialmente son susceptibles de desertificarse; por último, las subcuencas restantes están libres del problema, gracias a sus condiciones climáticas más favorables.

Las líneas maestras de acción para luchar y mitigar la desertificación

España cuenta con una larga tradición en la lucha contra la desertificación. El problema se abordó, con una terminología diferente, a principios del siglo XX; los trabajos de restauración de la cubierta vegetal llevados a cabo por Ricardo Cordorniu en las sierras de María y Orce (Andalucía Oriental) y Espuña (Murcia) dan testimonio de ello. En 1991, el término *desertificación* se incorporó a la administración española mediante la puesta en marcha del proyecto LUCDEME (Lucha Contra la Desertificación en el Mediterráneo español), así como del Plan Nacional de I+D mediante programas específicos (Fig. 116).

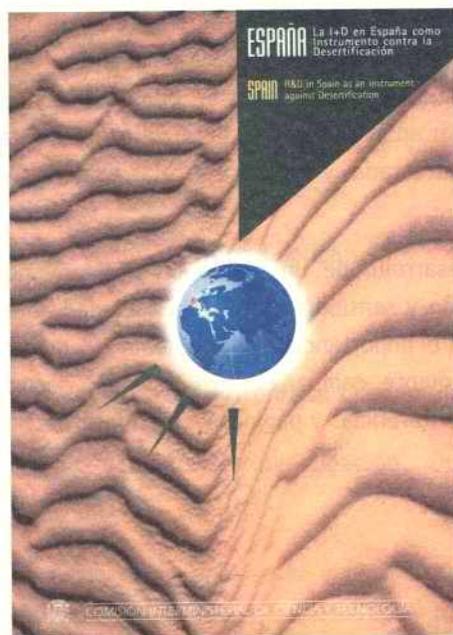


Fig. 116.- La I+D en España como instrumento de lucha contra la desertificación.

La desertificación es un fenómeno complejo que demanda soluciones integradas; por ello, combatirla requiere acciones en ámbitos diferentes y con niveles de aproximación también diferenciados. La filosofía de las acciones del PAND está constituida por aquellos programas o proyectos específicos que pueden ser desarrollados de modo directo, para cumplir los objetivos concretos indicados en el Convenio de Naciones Unidas. Las líneas de acción propuestas son:

a) Evaluación y seguimiento de la desertificación en España mediante trabajo directo de campo a escala de proceso, evaluación de la extensión mediante técnicas cartográficas y teledetección, identificación de indicadores mediante sistemas de alerta temprana que permitan localizar las zonas con riesgo de desertificación (HISPAMED,1999). Con esta finalidad se constituyó la Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación del Proyecto Lucdeme (RESEL; Fig. 117).

b) Análisis, divulgación y explotación de resultados de programas de I+D sobre desertificación que sirvan para aplicaciones prácticas y, a la vez, para formular una estrategia integrada de adquisición de conocimientos en desertificación.

c) La restauración de tierras afectadas por la desertificación. La recuperación de tierras desertificadas en aquellos casos que no hayan sobrepasado el umbral de la irreversibilidad, así como la ordenación y la restauración hidrológico-forestal en cuencas ubicadas en zonas áridas y semiáridas afectadas por procesos de desertificación.

d) Gestión sostenible del agua y el suelo, en particular en lo que concierne a las áreas de regadío, y explota-

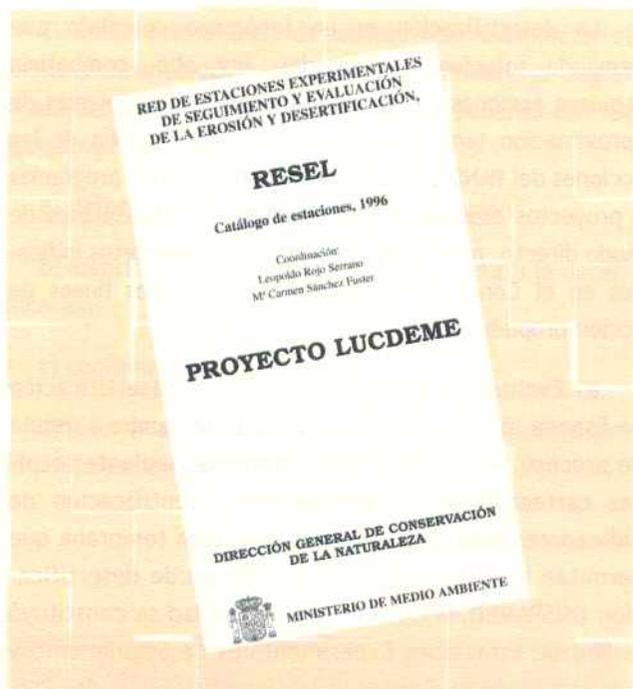


Fig. 117.- La red de estaciones experimentales de seguimiento y evaluación de la erosión y desertificación (RESEL), es un buen instrumento para el conocimiento de estos procesos en España.

ción de las aguas subterráneas en aquellos territorios afectados por la desertificación.

e) Predicción y reducción de la **vulnerabilidad** a las sequías, mediante la predicción meteorológica, economía del agua en los regadíos, desalinización de aguas, depuración y reutilización de aguas residuales, ahorro del consumo urbano, recarga de acuíferos, y construcción de embalses y trasvases. Protección frente a los incendios forestales.

f) Biotecnología en zonas áridas. Consiste en el ensayo de nuevos cultivos y en la viabilidad y aprovechamiento

de los recursos genéticos de los cultivos tradicionales que hayan perdido protagonismo, tales como el esparto y las plantas aromáticas y medicinales.

g) Desarrollo de sistemas sostenibles de pastoreo extensivo en zonas áridas, con la finalidad de conocer una estimación correcta de la capacidad de carga ganadera que pueden soportar de acuerdo con su biomasa forrajera natural.

h) Red de proyectos demostrativos de restauración y gestión sostenible de áreas afectadas por desertificación que demuestren la viabilidad técnica, económica y social de diferentes propuestas de gestión y restauración del territorio afectado.

i) Caracterización y promoción del sector español vinculado a la lucha contra la desertificación, explicitado en instituciones, organizaciones, asociaciones, empresas y profesionales comprometidos en ella, con la finalidad de suministrar un marco para el desarrollo y proyectar tecnologías contrastadas y válidas a escalas nacional e internacional.

j) Desarrollo de un marco legislativo y normativo. Divulgación y sensibilización de la sociedad acerca de la magnitud e importancia del problema de la desertificación, mediante campañas, exposiciones, documentales, cursos, conferencias y páginas web en internet.

Coordinación de políticas

El fenómeno de la desertificación, al ser multifactorial y multidisciplinar, suele acarrear una dispersión en las acciones de las distintas políticas sectoriales. El PAND pretende ofrecer soluciones integradas mediante la coordinación de planes sectoriales:

- a) Estrategia Forestal Española;
- b) Plan Nacional de Restauración Hidrológico Forestal;
- c) Plan de acciones prioritarias en la Restauración Hidrológico-Forestal, Control de la Erosión y defensa contra la Desertificación;
- d) Plan de acciones prioritarias contra la Incendios Forestales;
- e) Estrategia Española para la Conservación y el Uso Sostenible de la Diversidad Biológica;
- f) Planes Hidrológicos de Cuenca;
- g) Plan Hidrológico Nacional;
- h) Estrategia Española frente al Cambio Climático;
- i) Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica (I+D+I).

La coordinación de políticas se extiende a planes y programas de carácter agrícola y de desarrollo rural, en particular los que aplican políticas de la Unión Europea como la Política Agrícola Comunitaria (PAC) y el Reglamento de Desarrollo Rural derivados de la Agenda 2000.

Marcos económico e institucional para desarrollar el PAND

La financiación del PAND deberá ser asumida por las administraciones locales y autonómicas y la general del estado, con presupuestos del sector privado de las zonas afectadas por el problema de la desertificación. Aspecto fundamental es la integración en la programación de los fondos de la Unión Europea, tras las reformas derivadas de la Agenda 2000.

La aplicación y seguimiento del PAND requiere de un órgano colegiado, participativo y de reflexión que se denomina Comité Nacional de Lucha contra la Desertificación. Este órgano tiene también la función de aplicar y seguir la *Convención Internacional de Lucha contra la Desertificación*, así como desarrollar medidas y acciones que se le asignen derivadas del PAND.

Cooperación internacional

La cooperación internacional es considerada, en el *Convenio de Lucha contra la Desertificación*, como un eficaz método para combatir el proceso de degradación. Además de propiciar la aplicación del Convenio, la cooperación debe abarcar los sectores de transferencia de tecnología, así como de investigación científica y desarrollo, reunión de información y distribución de recursos financieros. Con este espíritu, en un buen número de los proyectos bilaterales que lleva a cabo España se presta asistencia técnica, especialmente en países del Magreb y del

Próximo Oriente, y se concede atención al aprovechamiento y preservación de los recursos naturales como forma de contribuir al desarrollo sostenible. Singular atención se trata de prestar a aquellas actividades de lucha contra la pobreza y al fomento de acciones que reduzcan la presión humana sobre la tierra y minimicen la sobreexplotación de los suelos y otros recursos naturales que conducen a la desertificación.

Los impactos ambientales existen desde el momento en que cualquier sociedad humana incide significativamente sobre su entorno natural. Cuando el conjunto de relaciones entre el sistema socioeconómico de una sociedad y sus sistemas natural y ambiental se revela como insostenible, pues su mantenimiento en el tiempo resulta imposible con unos mínimos de estabilidad conjunta, se habla entonces de crisis ambiental (Pascual Trillo, 2000, 2001). En las regiones vulnerables a la erosión y a la desertificación, la interferencia entre acciones humanas y equilibrios geocológicos ha ocasionado o está produciendo una alteración del ecobalance por excesiva o inadecuada presión humana sobre ecosistemas fragilizados por la aridez y la sequía. Suelo, agua y biodiversidad constituyen el fundamento básico de los ecosistemas y los más importantes recursos primarios de producción de alimentos. Son recursos vitales del patrimonio natural, base y límite del desarrollo durable; por eso, su buen estado, equilibrio y calidad productiva son esenciales para un desarrollo de calidad.

La degradación de los ecosistemas, el deterioro de suelos y aguas y la pérdida de biodiversidad están acarreado una marcada disminución del potencial productivo de los ecosistemas, haciéndolos a la vez más pobres y vulnerables. Este proceso suele ocasionar la ruptura de la armonía de los sistemas naturales y conducir, implacablemente, a una acentuación de las crisis medioambiental y socioeconómica expresadas en la desertificación.

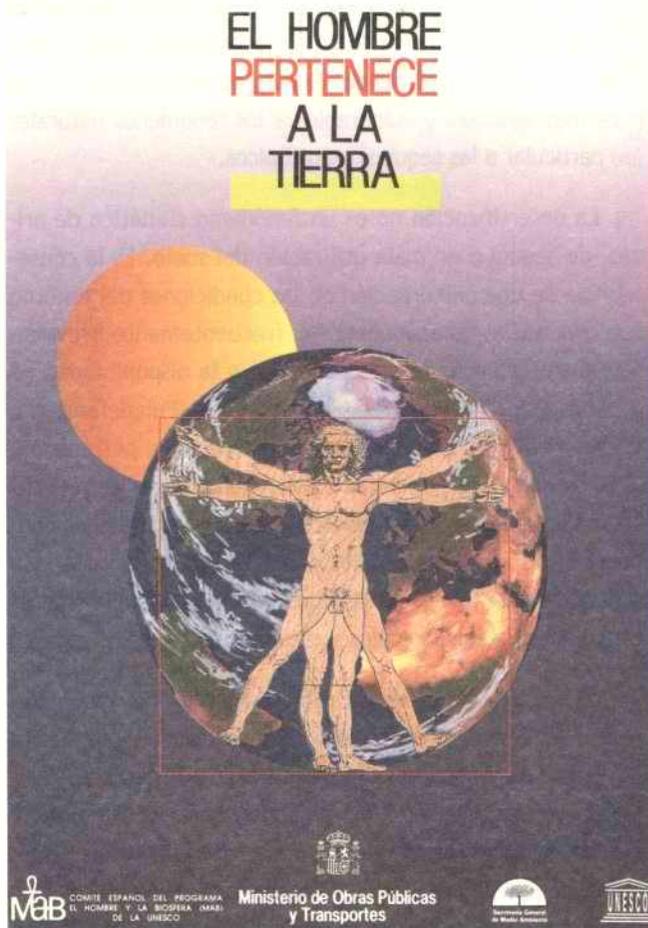


Fig. 118.- Somos parte de la Tierra y la Tierra es parte de nosotros. Todo cuanto hiere a la Tierra, hiere a los hijos de la Tierra. La tierra y el agua son sagradas (Seattle, jefe de los Duwamish, 1854)

Erosión y desertificación son una amenaza que se cierne sobre las tierras agrícolas y forestales. Constituyen un drama ambiental y social en extensos escenarios de las tierras secas del planeta, ya que implican la pérdida de recursos naturales vitales (suelo, agua y vegetación) y de producción de alimentos. En los inicios del siglo XXI, el riesgo de la desertificación constituye probablemente el problema global ambiental y social más preocupante de las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas del mundo, ya que, de modo creciente, las hace más sensibles y vulnerables a los fenómenos naturales (en particular a las sequías) y antrópicos.

La desertificación no es un fenómeno climático de aridez, de sequía o de mala utilización del suelo. Es la consecuencia de una perturbación de las condiciones del entorno que conduce al desacoplamiento, frecuentemente irreversible, entre el sistema socioeconómico y la disponibilidad de recursos en zonas de frecuentes sequías (Puigdefábregas, 1995b, 1998), porque el ser humano olvida que pertenece a la Tierra (Fig. 118). Mientras existan condiciones de reversibilidad, es posible volver al estado sostenible, en caso contrario el sistema de recursos naturales se desmorona y la degradación se hace irreversible, acarreando importantes costes ambientales, sociales y económicos.

La erosión y la desertificación son fenómenos muy complejos; sin embargo, el esfuerzo de investigación y la puesta en marcha de programas y proyectos a diversas escalas espaciales y temporales está permitiendo conocer sus causas y efectos, lo que no significa que, por ahora, puedan ser dominados, aunque sí prevenidos y mitigados. Erosión y desertificación son afecciones que pueden prevenirse y combatirse mejorando los conocimientos de los principios climáticos, hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y socioeconómicos de las zonas amenazadas. Se precisan diagnóstico, previsión y evaluación permanentes y detalladas que utilicen las podero-

sas herramientas de la teledetección y los sistemas de información geográfica; evaluar los costos y beneficios socioeconómicos y ambientales de los programas de acción contra la erosión y la desertificación; adaptar las políticas de desarrollo socioeconómico a los recursos disponibles; diseñar y aplicar eficaces políticas para la protección y conservación del suelo; promocionar políticas y fomentar marcos institucionales que desarrollen la coordinación y cooperación regional, nacional e internacional; conseguir una ordenación territorial y económica adaptadas a la realidad actual y futura de cada territorio; extender la formación y concienciación de la sociedad en el camino de un verdadero desarrollo sostenible. Estas medidas, en la frontera de los siglos XX y XXI, tienen una triple dimensión ecológica, económica y ética. Combatir la desertificación es tratar de rescatar la dignidad de la Tierra y la de los humanos que sufren el proceso de degradación.

Las variaciones climáticas naturales pueden alterar considerablemente los patrones de sequía que afectan a la productividad de la vegetación, de los cultivos y a la disponibilidad de recursos hídricos. El cambio climático puede empeorar, acusadamente, los efectos de la desertificación, mientras que ésta puede afectar también al cambio climático, notoriamente en las regiones secas. Una mejor comprensión de las interacciones entre la desertificación y el clima, y de los nexos entre clima, suelos, agua, plantas y animales, es fundamental para el desarrollo de estrategias eficaces para combatir la desertificación.

El incuestionable aumento de las temperaturas que se está registrando en todo el globo incrementará probablemente las tasas de evapotranspiración potencial en las tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas, y en ausencia de aumentos de precipitación, sino todo lo contrario, se prevé que extensas zonas de estos territorios se harán

más áridas en los próximos cien años. Es muy probable que la desertificación sea irreversible si el ambiente se hace más seco, la cobertura vegetal disminuye o desaparece y el suelo se degrada a causa de una mayor erosión.

Se ha entrado en el siglo del medio ambiente en el que la ciencia, la economía y la política deberán acoplarse para que la humanidad, especialmente las poblaciones de los países secos y pobres con desertificación muy avanzada o en proceso de estarlo, puedan contemplar el futuro con esperanza, porque aquí la desertificación es a la vez el clamor del subdesarrollo y el grito de una Tierra herida y amenazada. Un nuevo paradigma que demanda unas nuevas relaciones entre hombre y naturaleza, una nueva pedagogía, una nueva política, un nuevo descubrimiento del valor de los ecosistemas y una nueva ética que recupere la dimensión sagrada que tienen los recursos vitales: suelo, agua y vegetación.

Abiótico. (del griego *a* = sin y *bios* = vida). Alude a aquellos factores sin vida que influyen en un ecosistema.

Abrasión o corrosión. Erosión superficial producida sobre una roca por diversos agentes tales como el agua corriente, el hielo glaciar, las olas y corrientes marinas y el viento, en combinación con los materiales que transportan: arenas, guijarros cantos... Se trata de un desgaste mecánico producido en las rocas (el término corrosión, sin embargo, es una meteorización química; proceso que ocasiona la alteración o disolución de las rocas por reacciones químicas).

Abrasión o corrosión eólica. Desgaste o pulido que ejerce el viento cargado de partículas sobre las rocas y otros obstáculos.

Acción antrópica. (Ver factores antrópicos)

Agrosistema. Es el ecosistema artificial originado por ser humano como resultado de las transformaciones introducidas por la agricultura en el medio natural.

Algoritmo. Conjunto de instrucciones que permiten resolver un problema. Un método de cálculo.

Alterita. Formación superficial de material rocoso suelto y roto, que recubre la superficie rocosa sin alterar, originada por procesos de meteorización. Suele presentar diversos grados de transformación. Si ocupa la misma posición que los materiales a partir de los cuales se ha originado, se la conoce como alterita autóctona. Si ha sido movilizada y desplazada a otros lugares se la identifica como alterita alóctona.

Analógico. Forma de representación de la realidad comprensible. En el contexto de la teledetección y SIG, el término

se refiere a la información en forma gráfica o pictórica. Son datos no existentes que es preciso crear. El mapa en soporte de papel o cartón utilizado, confeccionado y utilizado durante siglos, es un mapa analógico. Estos mapas han sido durante mucho tiempo, el medio de representación de territorio, han sido superados por los mapas digitales.

Antrópico. (Ver factores antrópicos)

Áreas fuente. Extensión de una superficie del terreno que suministra sedimentos por erosión de suelo, regolito o material parental. Se trata de una superficie erosionada o en proceso de estarlo, en función de la dinámica de los agentes erosivos que actúan, normalmente, sobre materiales desprovistos de cobertura vegetal: impacto de las gotas de lluvia, flujos hídricos y viento.

Aterramiento. Es el proceso de depósito de sedimentos, transportados por los flujos hídricos y el viento y depositados en un espacio concreto. Con frecuencia, estos sedimentos producidos por la erosión, sedimentan en los vasos de los embalses, haciéndoles perder capacidad de almacenaje de agua y pérdida de regulación. Con el tiempo, la colmatación puede ser total y la obra hidráulica ha de ser abandonada.

Badlands. Término anglosajón usado para describir aquellos paisajes intensamente disectados por la erosión hídrica, con litologías blandas o materiales poco consolidados y en donde la vegetación es escasa o está ausente. Equivale al término abarrancado.

Balance de meteorización. Estimación de la cantidad, velocidad, tiempo y masa de material afectado por los procesos de meteorización.

Barkhana o barjana. Duna de arena con planta en forma de media luna, con perfil transversal disimétrico y con las puntas orientadas en la dirección del viento que sopla casi, constantemente, en la misma dirección.

Biodiversidad. Riqueza de especies animales y vegetales de un territorio. Cuanto mayor sea, mayor estabilidad y capacidad de autorregulación tienen los ecosistemas.

Bioma. Unidad de clasificación del paisaje según criterios climáticos y de predominio de una o otra formación vegetal. Ejemplos: desierto, bosque caducifolio, selva tropical, etc.

Biomasa. Cantidad de materia orgánica por unidad de superficie. Se diferencia una fitomasa o biomasa vegetal que se expresa en peso de materia seca por unidad de superficie y una zoomasa o biomasa animal expresada en peso vivo por unidad de superficie.

Bio-rexistasia. (Ver biostasia)

Biostasia. Término acuñado por Ehrart (1956) en su teoría llamada de "bio-rexistasia". Define la biostasia como un período estable, con vegetación importante y formación de suelos, que se opone a un estado de ruptura (rexisistasia), que afecta notoriamente a la cubierta vegetal y que se traduce por una activación de los fenómenos erosivos de naturaleza mecánica.

Biótico. Alude a la vida. El término se aplica a todos los organismos vivos que tienen influencia en la naturaleza y el medio ambiente. Un territorio biótico es un espacio que corresponde al área de distribución de un grupo de organismos vivos, plantas o animales.

Buzamiento. Ángulo que forma un plano de estratificación con un plano horizontal medido en una dirección perpendicular a la dirección del estrato. El ángulo se mide con un clinómetro y se expresa en grados. La expresión buzamiento regional se utiliza para indicar la dirección general del

buzamiento en una extensa área sin considerar las variaciones pequeñas.

Carstificación. Conjunto de procesos que desarrollan modelos cársticos. La carstificación es un conjunto de acciones químicas (disolución, hidratación, oxidación-reducción y sustitución iónica) y físicas (alteración y modificación de masa).

Catena. Término que se utiliza para expresar las relaciones entre la ladera y sus suelos asociados. Estos se diferencian debido a las variaciones del relieve y en el drenaje, originándose a partir de un mismo material y clima. Con frecuencia se utiliza toposecuencia como término alternativo al ser menos restrictivo.

Catiónico. (Ver intercambio catiónico)

Clasificación de Turc. Clasificación climática empírica basada en el cálculo de la evapotranspiración potencial y en función de la humedad disponible en el suelo, procedente de la precipitación o del riego y del poder evaporante de la atmósfera. Las variables climáticas que utilizan el cálculo son: la radiación solar, la temperatura media y la humedad relativa del aire.

Corrasión. (Ver abrasión)

Crioclastia, gelivación o gelifración. Término geomorfológico que expresa el proceso de fragmentación de las rocas debido a las alternancias de hielo-deshielo a que es sometida el agua alojada en los poros y fisuras de los materiales.

Cauce. El cauce de una corriente de agua puede considerarse como un largo y estrecho canal tallado por la fuerza de las escorrentias, por el que se manifiesta el movimiento de las mismas y de los sedimentos aportados desde la cuenca.

Datos geográficos. Datos sobre cualquier elemento o fenómeno que se halla localizado o tenga lugar en la superficie terrestre. Las características esenciales son la posi-

ción, los atributos descriptivos, las relaciones espaciales y el tiempo.

Deflación. Proceso por el que el viento remueve y transporta partículas finas (arenas, limos, arcillas) de la superficie de las regiones secas. Una vez el material fino ha sido evacuado queda una superficie de deflación, caracterizada por la presencia de material grueso que no ha podido ser movilizado por la fuerza del viento.

Degradación de las tierras. Se entiende como la reducción o la pérdida de la productividad biológica o económica y la complejidad de las tierras agrícolas de secano, las tierras de cultivo de regadío o las dehesas, los pastizales, los bosques y las tierras arboladas, ocasionada, en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, por los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y pautas de poblamiento, tales como: (a) la erosión del suelo; (b) el deterioro de las propiedades físicas, químicas, biológicas y económicas del suelo; (c) la pérdida duradera de vegetación natural

Degradación específica. Expresa el aporte de sedimentos producidos por los procesos de erosión en una cuenca fluvial. Son valores medios por unidad de superficie que, sin embargo, no permite distinguir con precisión los sectores de la cuenca más afectados por la erosión.

Desarrollo sostenible. Es aquel que puede asegurar que se satisfagan las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias. No es un estado de armonía fijo, sino un proceso de cambio por el que la explotación de los recursos, la dirección de las inversiones, la orientación de los progresos tecnológicos y la modificación de las instituciones concuerdan con las necesidades tanto presente como futuras.

Desertificación. Proceso de degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas.

Desertificación actual o funcional. Es aquella ligada a un uso y gestión deficiente o inadecuado, reciente o actual, de los recursos básicos suelo, agua y vegetación. Es la que se halla en rápido proceso de expansión por las regiones secas.

Desertificación histórica o heredada. Alude a aquellos procesos de degradación que se activaron y actuaron en tiempos pasados y dejaron su impronta en los paisajes.

Desertización. Alude al proceso de deterioro natural del clima hacia una mayor aridificación y aleatoriedad de las precipitaciones. También suele darse una connotación sociológica, para expresar un espacio o territorio vacío de personas.

Diaclasa. Es una ruptura o fractura de una roca sin desplazamiento visible de las partes. En esto difieren de la falla, en la que hay ruptura acompañada de un movimiento relativo de los dos compartimientos. Las diaclasas se desarrollan en las rocas rígidas.

Digital. En el contexto de la teledetección, cartografía asistida por ordenador y SIG alude a los datos existentes, que han sido elaborados de antemano. Por ejemplo, datos de satélite, de GPS, etc.

Dinámica de sistemas. Método de trabajo que estudia la estructura y el comportamiento de sistemas mediante la construcción de modelos y la simulación.

Draa. Cadenas alargadas de arena, de los ergs, formadas por coalescencia de dunas.

Drenaje. Expresa la rapidez con que se evacua el agua en relación con los aportes.

Duna. Montículo o alineación de arena transportada por el viento de variable envergadura, que se encuentra en los desiertos cálidos o en las costas bajas y arenosas por encima del nivel de marea alta. Las dunas que poseen una forma mejor definida son aquellas ligadas a vientos constantes en la misma dirección, como son la barkhana, la duna parabólica, la duna piramidal y la nebka.

Ecoespacio. Unidad de aproximación sistémica, de grandes dimensiones, con notable homogeneidad climática, geológica, geomorfológica, hidrológica, biótica, poblacional y cultural.

Ecosistema. Unidad estructural elemental de la biosfera que presenta carácter homogéneo desde el punto de vista topográfico, microclimático, geomorfológico, botánico, zoológico, hidráulico y geoquímico. Se halla constituido, pues, por una componente biológica (biocenosis) y otra inorgánica (biotopo).

Edafogénesis. Conjunto de procesos que transforman una roca o un material en suelo.

Erg. Inmensas extensiones cubiertas por dunas de arena. En el Sahara ocupan alrededor del 20 % de su superficie.

Erosión. Proceso que ocasiona una pérdida gradual del material que constituye un afloramiento rocoso y del suelo. El fenómeno constituye un grave impacto negativo para el recurso suelo.

Erosión acelerada. Es el proceso de pérdida de suelo a causa de un deficiente o mal uso del recurso por parte de los humanos. La deforestación, la explotación excesiva, determinados sistemas de laboreo, etc., aceleran los procesos erosivos naturales.

Erosión hídrica. Es el proceso de arranque, transporte y sedimentación del suelo y alteritas por la energía del agua que circula por la superficie terrestre.

Erosión natural. Degradación o progresiva destrucción del relieve y suelos, como consecuencia de la actuación de un conjunto de agentes y procesos naturales: agua, viento, hielo y variaciones térmicas.

Erosión pluvial o erosión por salpicadura. Es la causada por el impacto de las gotas de lluvia sobre las partículas y agregados inestables de un suelo desnudo. Está estrechamente ligada a la energía cinética de las gotas y del conjunto de todo el aguacero.

Erosión por agua. Degradación y progresiva destrucción del relieve y del suelo por el agua en movimiento, tanto por las escorrentías que desmantelan y excavan cauces de diversas magnitud, como la llevada a cabo por las olas y corrientes marinas en los litorales.

Erosión potencial. Indica la susceptibilidad del suelo a la erosión en función de sus características físicas, de las condiciones climáticas, topografía y posibles usos del suelo.

Erosión real. Es aquella que se registra bajo las condiciones actuales de usos del suelo y grado de cobertura vegetal.

Erosionabilidad. Resistencia que opone el suelo a la desagregabilidad y al transporte de sus partículas. Con otras palabras, susceptibilidad que tiene un suelo para ser erosionado.

Erosividad. Capacidad de las lluvias para erosionar. Es función de la energía cinética del aguacero.

Escorrentía. Es parte de las precipitaciones totales en un área determinada que se forma en la superficie del terreno. Es función de la intensidad y volumen de la lluvia, de la velocidad de infiltración y de la posición sobre la ladera o vertiente en relación con la divisoria de aguas.

Escorrentia concentrada. La origina aquellos flujos de agua que por las irregularidades del terreno se concentran y circulan en canales y cauces. Estos se forman cuando la energía cortante del agua supera la resistencia de los materiales sobre los que discurre.

Escorrentia laminar. Se halla formada por una fina capa de agua, más o menos uniforme, que discurre sobre terrenos inclinados.

Espectrómetros. Un espectro puede definirse como el análisis de las distintas longitudes de onda emitidas por un foco luminoso. Todos los aparatos que tienen por objeto dispersar la luz emitida por un foco, descomponiéndola en las distintas radiaciones elementales de que consta, se denominan espectroscopios si son de observación visual y espectrómetros cuando utilizan la placa fotográfica (u otro procedimiento) para detectar las radiaciones.

Espectrorradiómetros. Sensor para la medición espectral de radiación ultravioleta (UV) y visible solar. Con el Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) montado sobre el satélite *Terra* que ha estado orbitando la Tierra desde diciembre de 1999, se captó una espectacular imagen de nuestro planeta en color verdadero.

Estado erosivo. Se entiende como el número y grado de intensidad de los signos de la erosión que muestra un terreno observados en un tiempo dado. Normalmente se alude siempre a la erosión por el agua.

Estrés hídrico. Estado patológico de un organismo vivo, suelo o ecosistema debido a la prolongada carencia de agua en las cantidades mínimas necesarias.

Evapotranspiración. Suma del agua evaporada directamente y de la transpirada por la vegetación. Se reconocen dos tipos: (1) Evapotranspiración potencial, que es la canti-

dad máxima teórica de agua susceptible de pasar a la atmósfera en el supuesto de un suelo constantemente abastecido. Se refiere a la cantidad de agua que necesita una planta y a su máxima pérdida teórica; (2) Evapotranspiración real o efectiva, es la observada, la cantidad de agua realmente transferida a la atmósfera.

Feidj. Corredor abierto entre cordones de arena y recubierto por este material. Es característico de los ergs.

Fenología. Ciencia que estudia la relación de los fenómenos biológicos de plantas y animales con los ritmos de las estaciones y los procesos que en ellas se registran, como la brotación, la floración, la maduración de los frutos, etc. Estos fenómenos se relacionan con el clima regional o local en que ocurren y viceversa. De la fenología se pueden sacar consecuencias relativas al clima y, sobre todo, al microclima, cuando ni uno ni otro se conocen debidamente.

Fragilidad erosiva. Es el resultado del balance entre los distintos aspectos del estado, riesgo, velocidad y tolerancia a la erosión. Su determinación es importante para la toma de decisiones sobre prevención, mitigación, rehabilitación y restauración de un terreno erosionado.

Gassi. Corredor longitudinal entre dos cordones de dunas, en el que aflora el substrato rocoso. Aparece en el erg.

Georreferenciación o geocodificación, es un proceso que permite determinar la posición de una entidad geográfica en la superficie terrestre de forma directa o indirecta.

Geosistema. Unidad de aproximación sistémica espacial o territorial, estructural y funcional del planeta Tierra de grandes dimensiones. Se individualiza como un complejo geográfico con una dinámica de conjunto, relativamente homogénea y estable.

Haloclastia. Proceso mecánico de fragmentación o disgregación de las rocas debido al humedecimiento e hinchamiento que produce la cristalización de sales. Es uno de los principales procesos de meteorización en los desiertos cálidos y en los litorales.

Hamada. Desierto tabular rocoso.

Hidroclastia. Proceso que implica importantes variaciones de agua en las rocas y suelos con las consiguientes aparición de tensiones en su interior. Los ciclos de expansión (hidratación) y contracción (deseccación) constituyen un importante proceso de meteorización mecánica de los materiales.

Homeostasia. Es la capacidad de reacción, de autorregulación y de ajuste de un ecosistema, que le permite mantener su estructura a lo largo del tiempo. Dicho con otras palabras, es el potencial del sistema para reaccionar ante influencias externas.

Impacto ambiental. La expresión se aplica a la alteración que introduce una actividad humana en el medio ambiente. El impacto ambiental se asocia a las actividades antrópicas no a las repercusiones que pueden desencadenar los fenómenos naturales.

Intercambio catiónico. Los iones son partículas que en disolución conducen la corriente eléctrica. Se denominan aniones los que van al ánodo, electrodo positivo, y cationes los que se dirigen al cátodo, electrodo negativo. El intercambio catiónico se realiza entre cationes monovalentes o divalentes siempre en proporciones de equivalencia.

Interface, Contacto superficial entre dos sustancias o ambientes diferentes, en el que sus características específicas cambian.

Interfluvio. Término que hace referencia a divisorias de aguas. Puede ser una amplia gama de geformas: cres-

ta, línea de máximas cumbres, relieve tabular, plataforma, etc.

Ladera. Unidad de relieve inclinada con respecto a la horizontal que enlaza una divisoria de aguas con una base o fondo. Una ladera-tipo suele presentar tres segmentos diferenciados: la parte convexa más alta, un segmento más o menos rectilíneo central y una parte cóncava basal.

Litológico. Relativo a la litología, parte de la geología que estudia las características de las rocas.

Lixiviados. Alude a los materiales que han sufrido un proceso por el que los materiales solubles y coloidales de los horizontes superiores de un suelo (por lo general arcillas) son arrastrados por la acción de las aguas que se infiltran. El fenómeno depende de la importancia, intensidad y continuidad de las precipitaciones.

Lucha contra la desertificación. Se entiende como el conjunto de actividades que forman parte de un aprovechamiento integrado de la tierra de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas para el desarrollo sostenible y que tienen por objeto: (a) la prevención o la reducción de la degradación de las tierras; (b) la rehabilitación de tierras parcialmente degradadas, y (c) la recuperación de tierras desertificadas.

Mantos de arena. Vastas extensiones más o menos horizontales de arena, sin dunas.

Material parental. Es el material originario a partir del cual se origina un suelo.

Medio Ambiente. Es el entorno en el que se desenvuelven los seres vivos, es decir, el entorno vital. Es un sistema de interacción entre factores biofísicos y humanos. El Medio Ambiente puede entenderse como: Fuente de recursos naturales, como soporte de los elementos físicos que lo

configuran y como receptor de desechos y residuos no deseados.

Meteorización. Rotura o desintegración de las rocas de la superficie terrestre o cerca de ella. Da lugar a un manto de roca alterada que permanecerá *in situ* hasta que los agentes de la erosión provoquen su movimiento.

Meteorización biológica. Descomposición de las rocas por la actividad de los seres vivos, plantas y animales, y los productos que liberan.

Meteorización física o mecánica. Consiste en la desagregación de la roca, con disminución de su volumen y aumento de la superficie de ataque físico-química, debida a los agentes de la meteorización.

Meteorización química. Proceso que produce la descomposición o transformación de las rocas por medio de reacciones químicas.

Mitigación de los efectos de la sequía. Se entiende como aquellas actividades relativas al pronóstico de la sequía y encaminadas a reducir la vulnerabilidad de la sociedad y de los sistemas naturales a la sequía en cuanto se relaciona con la lucha contra la desertificación.

Modelo. Representación simplificada de un sistema complejo, bajo una forma física o matemática, en el cual las respuestas producidas por unas causas o procesos externos, son de difícil predicción por el gran número de factores que pueden intervenir. En su forma física, se representa como un esquema, mientras que en su forma matemática lo hace por expresiones analíticas.

Nebja o nebkha. Pequeña duna en forma de flecha formada a sotavento de un obstáculo rocoso o por la vegetación.

Nivel freático. Nivel superior de la zona de saturación del agua subterránea en las rocas permeables. Indica la profundidad a la que se halla el agua freática. Este nivel oscila según la cantidad de precipitación, infiltración a través del suelo, evapotranspiración, bombeos realizados por los humanos, etc.

Nivel piezométrico. Profundidad a la que llega el nivel superior del agua de un acuífero en una perforación o pozo.

Nomograma. Tabla o representación gráfica constituida por un sistema de puntos, líneas acotadas o barras, y distanciadas entre sí de una forma determinada, para representar, de modo abreviado, determinados cálculos.

Organización regional de integración económica. Se entiende como toda organización constituida por Estados soberanos de una determinada región que sea competente para abordar las cuestiones a las que se aplique la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y haya sido debidamente autorizada, con arreglo a sus procedimientos internos, para firmar, ratificar, aceptar y aprobar la Convención y adherirse a la misma.

Paisaje. El término, en su sentido más amplio, es lo que nos rodea. Es el medio visualmente percibido, un complejo de interrelaciones de todos los elementos o componentes de la superficie terrestre. El medio se hace paisaje cuando alguien lo percibe. Es un indicador de la salud ambiental y del tipo de desarrollo de un territorio. Un indicador del estado de los ecosistemas y sus componentes, un indicador o clave ambiental.

Países afectados. Países cuya superficie incluye, total o parcialmente, zonas afectadas por la desertificación.

Países Partes Desarrollados. Son los países desarrollados y las organizaciones regionales de integración económica constituidas por países desarrollados

Parámetros. Cantidades temporalmente invariables que caracterizan el sistema.

Pascícola. Término derivado de pasto, usado para identificar un terreno o sitio con hierba donde pasta el ganado. También alude al recurso pasto en expresiones como "los recursos pascícolas del territorio..."

Pedestal de erosión. Microtopografía resultante de la erosión diferencial entre las áreas con suelos protegidos por la vegetación, bloques o costras superficiales y aquellas otras áreas carentes de protección alguna.

Pedón o pedión. Unidad mínima de descripción y muestreo de un suelo. Es un volumen arbitrario de suelo, considerado como el más pequeño que puede reconocerse como suelo individual. Su superficie que puede variar entre 1 a 10 m², según la variabilidad del suelo.

Perfil de meteorización. Desarrollo en profundidad de una alterita. Es decir, es el tramo entre la superficie del terreno y el contacto roca alterada- roca fresca, sin alterar.

Permeabilidad. Hace referencia a la velocidad con la que puede circular el agua dentro de un suelo, alterita o materiales rocosos.

Piezómetro. Nivel que presentan los acuíferos. Está condicionado por las características de los materiales que alberga a los acuíferos, a los episodios de sequías y fuertes lluvias y al régimen de explotación de las aguas subterráneas.

Piping. Es un proceso originado por flujo subsuperficial en suelos y otros depósitos no consolidados, con formación de conductos por los que circula el agua vehiculando materiales finos.

Piroxeno. Mineral ferromagnésico muy abundante tanto en las rocas ígneas como en las metamórficas. Los piroxenos presentan una forma prismática, así como exfolia-

ciones que forman entre ellas un ángulo próximo a los 90°. Se diferencian varios grupos en función de sus características cristalográficas y químicas,.

Rambla. Lecho o cauce natural por donde las aguas fluyen sólo cuando las lluvias son abundantes. Son elementos hidrogeomorfológicos del paisaje de los ambientes áridos y semiáridos donde las lluvias son un meteoro escaso, aleatorio y con frecuencia torrencial.

Recurso natural. Aquella parte de la naturaleza o del medio ambiente que es capaz de satisfacer necesidades humanas.

Reg. Desierto tabular pedregoso en donde el viento es el principal factor del modelado. Vastas superficies cubiertas de bloques, guijarros y cantos. Es el desierto de piedras.

Regolito. Material rocoso fragmentado que cubre la superficie rocosa sin descomponer. Suele estar poco alterado químicamente y sin componentes finos. Se trata de una capa de roca alterada o alterita afectada por procesos como la edafización, movilización y sedimentación. Está formado por restos del material parental y depósitos superficiales. Su formación es el primer paso en el proceso de formación del suelo o edafogénesis;

Resilencia. La probabilidad media de recuperación de un sistema natural, seminatural o humanizado.

Rexistasia. Estado de ruptura de la estabilidad ambiental natural, que afecta notoriamente a la vegetación y al suelo, y que se traduce por una degradación de la cubierta vegetal y activación de los fenómenos erosivos de naturaleza mecánica. Concepto que se opone al de biostasia.

Riesgo (natural, social...). Es la probabilidad de que falle el sistema o que se supere un determinado umbral.

Riesgo de erosión. Vulnerabilidad del terreno a ser erosionado. Es función de sus características físicas y de las

condiciones ambientales que le afectan, incluida la acción humana.

Ripples. Modelados producidos por el movimiento del viento, de las olas y corrientes marinas, en sedimentos sin consolidar, notablemente en arenas y limos.

Salinización. Proceso de enriquecimiento del suelo en sales solubles como los cloruros y sulfatos de sodio y magnesio. Es un proceso que se origina, principalmente, en ambientes áridos y semiáridos por causas naturales o bien inducido por el hombre por un uso inadecuado de las aguas de riego. Es un importante factor de desertificación.

Sebja o sekha. Término árabe que describe a una gran depresión topográfica, endorreica, con nivel freático próximo a la superficie y recubierta de costra salina. Es propia de los desiertos cálidos y de los bordes costeros de estos ambientes áridos.

Seif o duna de espada. Duna longitudinal con acusados bordes que se extiende, a lo largo de muchos kilómetros, con eje paralelo a la dirección del viento dominante.

Sequia. Fenómeno meteorológico de ausencia de lluvias y de falta de humedad en el ambiente y en el suelo, en un largo período de tiempo en el que se debería haber recibido lluvias normalmente. Comporta tiempo seco, lo que ocasiona, entre otros efectos, serios déficits de agua y cuantiosas pérdidas económicas. Fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción de recursos de tierras.

Signos de la erosión. Son todas aquellas huellas marcadas en el paisaje por la meteorización, por la erosión eólica y, sobre todo, por la erosión por el agua. Conviene diferenciar los signos de erosión activa y de los inactivos.

Sinergia. Alude a la acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales.

Sistema abierto. Es aquel en el que energía y materia pueden atravesar los límites del sistema e intercambiarse con el entorno. Son sistemas muy frecuentes en la naturaleza. Se les conoce también como sistemas de proceso-respuesta, porque el flujo de masa o energía (el proceso) causa cambios en el sistema (erosión, geoformas, modelado, etc.)

Sistema de Información Geográfica (SIG). Es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, introducir, almacenar, recuperar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas biofísicos, de gestión y planificación. Es, pues, una herramienta de análisis.

Suelo. Capa de confluencia e interrelación entre los procesos bióticos y abióticos de la superficie terrestre durante largos períodos de tiempo. También, capa superficial de la Geosfera biológicamente fértil y agrónomicamente productiva.

Tafonis. Cavidad abierta en laderas y escarpes de rocas cristalinas, calcáreas o de areniscas que se originan por procesos de meteorización, en particular por disgregación granular o microfragmentación. Estas geoformas son abundantes en los ambientes áridos y semiáridos.

Tasa o intensidad de erosión del suelo. Expresa la pérdida de suelo por unidad de superficie y por intervalo de tiempo.

Teledetección. En un amplio sentido, puede ser definida como el conjunto de técnicas que permiten la adquisición de información de un objeto o sistema sin ponerlo en contacto material con el elemento sensor. El término suele aplicarse, habitualmente, al registro y procesado de los datos obtenidos de la observación de la Tierra, mediante el

- uso de sensores colocados en plataformas (aviones, satélites, etc.), sensibles a la radiación electromagnética.
- Termoclastia.** Mecanismo de rotura de las rocas debido a los cambios de temperatura.
- Tierra.** El Convenio de Naciones Unidas sobre Desertificación entiende este término como el sistema bioproductivo terrestre que comprende el suelo, la vegetación, otros componentes de la biota y los procesos ecológicos e hidrológicos que se desarrollan dentro del sistema.
- Tolerancia de un suelo a la erosión.** Es la cantidad de suelo que puede perder un perfil edáfico manteniendo su capacidad productiva durante muchos años. Esta capacidad de soportar la erosión, es función de sus propiedades físicas y química y profundidad. Se expresa en toneladas por unidad de superficie y año.
- Umbral.** En la ciencias de la Tierra, se le identifica como un valor o estado crítico del medio natural o medioambiental que actúa como limitador de cualquier proceso. Son como los fusibles de la naturaleza o del sistema ambiental.
- Umbral de velocidad.** Para cada tipo de suelo y condiciones de superficie se requiere un mínimo de velocidad del fluido para remover las partículas. En el caso del viento, existe un valor crítico de velocidad de cizalla por el que la partícula inicia el movimiento, es el umbral de velocidad del fluido.
- Variables.** Propiedades mensurables del sistema cuyas magnitudes varían en el tiempo.
- Velocidad de erosión.** Remoción o pérdida de alteritas y suelo por unidad de tiempo. Se suele dar en t/ha/año.
- Ventifactos.** Piedra o canto que ha sido pulido o facetado por la acción del viento cargado de arena en los ambientes áridos.
- Vulnerabilidad de un sistema.** Es el valor esperado de las pérdidas asociadas a un riesgo que ha traspasado un umbral determinado.
- Xerofitismo.** Cualidad de xerófilo, que se aplica a las plantas que pueden vivir en climas secos, plantas bien adaptadas a sequías más menos pronunciadas.
- Yardang.** Cerros alargados y paralelos de algunos metros de altura modelados por el viento en las regiones desérticas. Con frecuencia aparecen modelados, por la abrasión, en forma de seta.
- Zonas afectadas.** Son aquellos territorios áridos, semiáridos o subhúmedos secos afectados o amenazados por la desertificación.
- Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas.** Aquellas zonas en las que la proporción entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial está comprendida entre 0,005 y 0,65, excluidas las regiones polares y subpolares.

La bibliografía siguiente es una selección de una más amplia, que el lector interesado puede consultar en internet en la dirección www.nivola.com/erosion/bibliografia

- Almorox, J.; De Antonio, R.; Saa, A.; Cruz Díaz, M^a; Gascó, J. M^a., 1994: *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Editorial Agrícola Española, S. A. Madrid, 152 pp.
- Auzet, V., 1987: *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: aspects agronomiques*. Centre d'études et de recherches Eco-Géographiques (CERES). Strasbourg, 60 pp.
- Balabanis, P.; Peter, D.; Ghazi, A.; Tsogas, M., Eds. 1999: *Mediterranean desertification. Research results and policy implications*. European Commission. Directorate-general Research. Vol. 1. EUR 19303. Luxembourg, 429 pp.; Vol. II, 2000, 615 pp.
- Bauer, E., 1991: *Los montes de España en la Historia*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid, 613 pp.
- Beasley, D. B.; Huggins, L. F., 1981: *ANSWERS User's Manual*. United States Environmental Protection Agency, Region V. Chicago, IL.
- Boff, L., 1996: *Ecología: Grito de la Tierra, Grito de los Pobres*. Editorial Trotta, S. A. Madrid, 282 pp.
- Brandt, C. J.; Thornes, J. B., 1996: *Mediterranean Desertification and Land Use*. Wiley y Sons. Chichester, 554 pp.
- Castillo, V., 1992: "Modelos para la predicción de la erosión hídrica: estado actual y nuevas líneas de investigación". *Ecosistemas*, 3: 28-30.
- CCD, 1994: *Convención de la Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular África*. Secretaría Provisional para la Convención de Lucha contra la Desertificación, Geneva Executive Center. 12 19 Châtelineau, Suiza, 71 pp.
- Cerdá, A., 1993: "Metodologías para el estudio de la hidrología y erosión de superficies degradadas (*badland*) a partir de lluvia simulada". *Cuaternario y Geomorfología*, 7: 35-48.
- Cerdá, A., 1988: "El clima y el hombre como factores de la estabilidad estructural del suelo. Un estudio a lo largo de gradientes climático-altitudinales." *Cuaternario y Geomorfología*, 12 (3-4): 3-14.
- Cerdá, A.; Boix, C.; Soriano, M. D.; Calvo, A.; Imeson, A. C., 1995: "Degradación del suelo en una catena sobre margas afectada por el abandono del cultivo en un ambiente semi-árido". *Cuaternario y Geomorfología*, 9 (33-4): 59-74.
- Chisci, G.; Morgan, R. P. C., 1988: "Modelling soil erosion by water: why and how." In Morgan, R. P. C. y Rickson, J. (Eds): *Erosion assessment and modelling*. Commission of the European Communities, Luxembourg, pp 121-146.
- Conesa Garcia, C.; López Bermúdez, F., 2000: "The cubing of gullies using the GIS methodology applied to a badlands in South East Spain". *Geo-Ökodynamik*, Vol. 21, núms. 3-4: 173-184.
- Cooke, R.; Warren, A.; Goudi, A., 1993: *Desert Geomorphology*. UCL Press. Londres, 526 pp.
- COP-4 (Conference of the Parties to the United Nations Convention to Combat Desertification), Bonn, Germany, 11-22 Decembre 2000
- CORINE, 1992: *Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southern Regions of the European Community*. Commission of the European Communities. EUR 13233. Luxembourg, 97 pp.
- Cruces de Abia, J.; Fornes, J.; Casado, M.; Hera, A. de la; Llamas, R.; Martínez, L., 1998: "El marco natural, agua y ecología". En *De la Noria a la Bomba. Conflictos sociales y*

- ambientales en la cuenca alta del río Guadiana. Cruces et al, Eds. Editorial Bakeaz. Bilbao: 17-130.
- Cruces de Abia, J.; Martínez Cortina, L., 2000: *La Mancha húmeda. Explotación intensiva de las aguas subterráneas en la cuenca alta del río Guadiana*. Papeles del proyecto Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín. Santander, 66 pp.
- De Roo, A. P. J.; Wesseling, C. G.; Jetten, V. G.; Offermans, R. J. E.; Ritsema, C. J., 1995: *LISEM, Limburg Soil Erosion Model. User Manual*. Dept. of Physical Geography, Utrecht University.
- De Roo, A. P. J.; Offermans, R. J. E.; Cremers, N. H. D. T., 1996: LISEM: "A single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. Theory, input and output." *Hydrological Processes*, 10: 1107-1117
- De Roo, A. P. J., 1993: *Modelling Surface Runoff and Soil Erosion in Catchments using Geographical Information Systems*. Netherlands Geographical Studies. Uterch, 295 pp.
- Dirección General de Obras Hidráulicas, Dirección General de Calidad de las Aguas 1994: *Libro Blanco de las Aguas Subterráneas*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Madrid.
- Dissmeyer, G. E.; Foster, G. R., 1983: "Modifying the universal soil loss equation for forest land". In *Soil Erosion and Conservation*. S. A. El-Swaify, W. C. Moldenhauer y Andrew Lo. Soil Conservation Society of America. Iowa: 480-495.
- Dregne, H. E., 1986: *Desertification of Arid Lands. Physics of desertification*. Ed. F. El-Baz y M. H. A. Hassan Dordrecht, The Netherland: Martinus. 16 pp.
- Dregne, H. E.; Chou, N. T., 1992: "Global Desertification, Dimensions and Cost". In *Degradation and restoration of arid areas*. Lubbock Texas Tech. University.
- EarthAction, abril 1994: *Desertification: Une menace à la fertilité de la Terre*. Réseau de 900 organisations civiles réparties dans 119 pays. Fondé au Sommet de la Terre de Rio de Janeiro, juin 1992., 4 pp.
- Fantechi, R.; Margaris, N. S., Eds., 1986: *Desertification in Europe*. Commission of the European Communities. D. Reidel Publishing Co. Dordrecht: 231 pp.
- Fantechi, R.; Peter, D.; Balabanis, P.; Rubio, J. L. Eds.: 1995: *Desertification in a European context: Physical and socio-economic aspects*. European Commission. Directorate-General Science, Research and Development. EUR 15415 EN. Luxembourg, 635 pp.
- FAO/UNESCO/WMO, 1977: *Desertification Map of the World*. United Nations Conference on Desertification. UNEP. Nairobi (Kenya).
- FAO/ PNUMA/ UNESCO, 1979: *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma, 74 pp.
- FAO, 1983: *Mantegamos viva la Tierra: causas y remedios de la erosión del suelo*. Por H. W. Kelly, Consultor. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 77 pp, más apéndice con la *Carta Mundial de los Suelos*.
- Felicísimo, A. M., 1994: *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Pentalfa Ediciones. Oviedo, 215 pp.
- Foster, G. R.; Wischmeier, W. H., 1974: "Evaluating orregular slopes for soil loss prediction". *Transactions of the ASAE*. Vol. 17, nº 2: 305-309. Michigan
- Foster, G. R.; Lane, L. J., 1987: *User Requirements: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP)*. NSERL Report nº 1. West Lafayette, Ind. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory
- Fournier, F., 1960: *Climat et érosion*. Ed. Presses Universitaires de France (PUF). Paris., 201 pp.
- García Fajardo, J. C., 1999: *Encenderé un fuego para ti. Viaje al corazón de los pueblos de África*. Proyecto A. Ediciones. Libros de la revista *Anthropos*. Barcelona, 396 pp.
- García Ruiz, J. M.; Ruiz Flaño, P.; Lasanta, T.; Montserrat, P.; Martínez Rica, J. P.; Pardini, G., 1991: "Erosion in abandoned fields, what is the problem?" In *Soil Erosion Studies*. M. Sala, J. L. Rubio y J. M. Garcia ruiz, Eds. Geoforma Ediciones. Logroño, 97-108.
- Giraldez, J. V., 1998: "La erosión del suelo". En *Agricultura sostenible*. R. M. Jiménez Díaz y J. Lamo de Espinosa, coordinadores. Mundi-Prensa. Madrid: 101-117.
- Giraldez, J. V.; Carrasco, C.; Otten, A.; Ietswaart, H.; Laguna, A.; Pastor, M., 1990: "The control of soil erosion in

- olive orchards under reduced tillage". In Seminar on *Interaction between Agricultural Systems and Soil Conservation in the Mediterranean Belt*. European Society for Soil Conservation. Lisboa, 9 pp.
- Glantz, M. H.; Orlovsky, N. S., 1983: "Desertification: A review of the concept." *Desertification Control Bulletin*, 9: 15-22.
- González Hidalgo, J. C., 1996: *Los índices de agresividad de la lluvia y su aplicación en la valoración de la erosión del suelo*. Cuadernos Técnicos de la SEG 10. Sociedad Española de Geomorfología. Geoforma Ediciones. Logroño, 37 pp.
- Graziani, C. A. (ponente), 1987: *Dictamen sobre la erosión de los suelos agrícolas y sobre las zonas inundables en la Comunidad Europea*. Dictámenes. PE DOC A 2-20/87. nº de Catálogo AY-CO-87-033-Es-C. Comunidades Europeas. Parlamento Europeo, 21 pp.
- Gutiérrez de la Cámara, M^a J., 1995: "Teledetección y sensores remotos". En *Análisis de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en ciencias ambientales*. J. J. Ibáñez y C. Machado, eds. Geoforma Ediciones. Logroño, 133-143.
- Gutiérrez Elorza, M., 2001: *Geomorfología Climática*. Ediciones Omega. Barcelona, 642 pp.
- Hill, J.; Peter, D. Eds., 1996: *The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the Mediterranean basin*. European Commission. Directorate-General Science, Research and Development. EUR 16732 EN. Luxembourg, 235 pp.
- Hill, J. Ed., 1996: *Integrated Approaches to Desertification Mapping and Monitoring in the Mediterranean basin (DeMon)*. Joint Research Centre. European Commission. EUR 16448 EN. Luxembourg, 165 pp.
- HISPAMED, 1999: *Evaluación de la desertificación en España*. Proyecto AMB97-1000. Plan Nacional I + D. Informe Técnico de Resultados. Coordinador J. Puigdefábregas. EEZA/CSIC., 64 pp.
- Hudson, N. W., 1976: *Conservación del suelo*. Editorial Reverte. Barcelona, 335 pp.
- Ibáñez, J. J.; Valero Garcés, B. L.; Machado, C. Eds., 1997: *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación*. Geoforma Ediciones. Logroño, 478 pp.
- ICONA (diversos años 80 y 90): *Mapas de Estados Erosivos. Cuencas Hidrográficas del Ebro, Guadiana, Guadalquivir, Júcar, Pirineo, Segura, Sur de España, Tajo...* ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Kirkby, M. J.; Morgan, R. P. C., Eds., 1980: *Soil Erosion*. John Wiley y Sons. Chichester, 312 pp. Traducido al español por Editorial Limusa. México, 198., 375 pp.
- Klein, J., 1936: *La Mesta. Estudio de la historia económica española, 1273-1836*. Madrid., 450 pp.
- Knisel, W. G., 1980: *CREAMS: "A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems"*. *Conservation Research Report* nº 26. Washington, D. C. USDA-Sci and Educ. Admin.
- La Roca, N.; Cabrelles, J. L.; Dupré, M.; Quiles, X.; Torregrosa, A.; Viñals, M. L., 1988: "Arroyada superficial y erosión. Estación experimental de Requena." *Valencia. Cuaternario y Geomorfología*, 1: 43-56.
- Lal, R.; Blum, W. H.; Valentibe, C.; Stewart, A (Eds) (1998): *Methods for assessment of soil degradation*. CRC Press, 558 pp.
- López Bermúdez, F., 1990: "El clima mediterráneo como factor de erosión". *Estudios Geográficos*, 199-200: 489-506.
- López Bermúdez, F., 1992: "La erosión del suelo, un riesgo permanente de desertificación". *Ecosistemas*, 3: 10-13.
- López Bermúdez, F., 1994: "Degradación del suelo ¿Fatalidad climática o mala gestión humana? Hacia una gestión sostenible del recurso en el contexto mediterráneo". *Papeles de Geografía*, 20: 49-64. Universidad de Murcia
- López Bermúdez, F., 1995: "Desertificación: una amenaza para las tierras mediterráneas". *El Boletín*, 20: 38-48. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- López Bermúdez, F., 1996: "Erosión del suelo e intervención humana en las regiones mediterráneas de la península Ibérica". En *Portugal-España: Ordenación territorial del Suroeste comunitario*. A. J. Campesino; C. Velasco, Coordinadores. Universidad de Extremadura. Cáceres: 141-170

- López Bermúdez, F., 1996: "La degradación de tierras en ambientes áridos y semiáridos. Causas y consecuencias". En *Erosión y degradación de tierras en áreas marginales*. T. Lasanta y J. M. García-Ruiz, Eds. Instituto de Estudios Riojanos. Sociedad Española de Geomorfología. Geoforma Ediciones. Logroño: 51-72
- López Bermúdez, F., 1999: "Indicadores de la desertificación: una propuesta para las tierras mediterráneas amenazadas". *Murgetana*, 100: 113-128. Real Academia Alfonso X El Sabio. Murcia.
- López Bermúdez, F.; Pardos, J. A.; Ramos, A., Eds., 1989: *Degradación de zonas áridas en el entorno mediterráneo*. Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente. MOPU. Madrid, 224 pp. I.S.B.N.: 84-7433-622-8
- López Bermúdez, F. Romero Díaz, A., 1992: "Génesis y consecuencias erosivas de las lluvias de alta intensidad en la región mediterránea". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XVIII/XIX: 7-28. Universidad de La Rioja. Logroño.
- López Bermúdez, F.; García-Ruiz, J. M.; Romero Díaz, A.; Ruiz Flaño, P.; Martínez Fernández, J.; Lasanta, T., 1993: "Medidas de flujos de agua y sedimentos en parcelas experimentales". Sociedad Española de Geomorfología. *Cuadernos Técnicos de la SEG*, nº 6. Geoforma Ediciones. Logroño, 38 pp.
- López Bermúdez, F.; Rognon, P., 1996: *Érosion Hydrique, Désertification et Aménagement dans L'environnement Méditerranéen Semi-Arid*. Med-Campus., Programme de la Communauté Européenne. Universidad de Murcia. Murcia, 257 pp.
- López Bermúdez, F.; Barberá, G. G., 2000: "Indicators of Desertification in Semiarid Mediterranean Agroecosystems of Southeastern Spain". In *Indicators for Assessing Desertification in the Mediterranean*. J. Enne; M. d'Ángelo y C. Zanolla, Eds. Osservatorio Nazionale sulla Desertificazione. Ministero della Ricerca Scientifica. Università degli Studi di Sassari. United Nations Convention to Combat Desertification. Porto Torres, Cerdeña, Italy: 164-176.
- Llamas, R.; Hernández-Mora, N.; Martínez Cortina, 2000: *El uso sostenible de las aguas subterráneas*. Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín. Santander, 54 pp.
- Mabbut, J. A., 1978: "Desertification in Australia". *Water Research Foundation of Australian Report*, nº 54. Kingsford, N. S. W., Australia, 132 pp.
- Martin, A. J. W.; Balling, R. C., 1994: *Interactions of Desertification and Climate*. UNEP, WMO. Génève, 208 pp.
- Martínez Fernández, J.; López Bermúdez, F., 1996: "Métodos para el estudio de las propiedades hídricas de suelos y formaciones superficiales". Sociedad Española de Geomorfología. *Cuadernos Técnicos de la SEG*, nº 9. Geoforma Ediciones, Logroño, 30 pp.
- Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM), 1998: *Libro Blanco del Agua en España*. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Madrid., 855 pp.
- Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM), 2000: *Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND)*. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Madrid. Borrador de Trabajo. 140 pp, más siete anexos.
- Mintegui, J. A. Director, 1985: *Metodología para la evaluación de la erosión hídrica*. Dirección General del Medio Ambiente. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid, 150 pp.
- Mintegui, J. A.; Robredo, J. C., 1993: *Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica. Manual para un programa básico*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid, 88 pp.
- Mintegui, J. A.; De Simón, E.; García Rodríguez, J. L.; Robredo, J. C., 1993: *La restauración hidrológico-forestal en las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea*. Junta de Andalucía. Sevilla, 325 pp.
- Mitchell, J. K.; Bubenzer, G. D., 1980: "Soil Loss Estimation". In *Soil Erosion*, Edited by M. J. Kirkby y R. P. C. Morgan. J. Wiley. Chichester: 17-62.
- MOPU, 1990: *Medio Ambiente en España*. Monografía de la Secretaría General de Medio Ambiente. Madrid, 699 pp.
- Moreira, J. M., 1991: *Capacidad de uso y erosión de suelos. Una aproximación a la evaluación de tierras en Andalucía*. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla, 446 pp.

- Morgan, R. P. C., 1980: *Soil Erosion*. Longman. Londres, 113 pp.
- Morgan, R. P. C., 1986: *Soil Erosion and Conservation*. Longman, Londres, 298 pp.
- Morgan, R. P. C.; Quinton, R. J.; Smith, R. E.; Govers, G.; Poesen, J. W.; Auerswald, K.; Chisci, D.; Torri, D.; Styczen, M. E.; Folly, A. J. V., 1998: *The European Soil Erosion Model and User Guide*. Version 3.6. Silsoe College. Cranfield University. United Kingdom.
- Navas, A., 1995: "Cuantificación de la erosión mediante el radioisótopo cesio 137". Sociedad Española de Geomorfología. *Cuadernos Técnicos de la SEG*, nº 8. Geoforma Ediciones. Logroño, 16 pp.
- Neboit, R., 1983: *L'Homme et l'Erosion*. Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université de Clermont-Ferrand II. Nouvelle série, Fascicule 17. 183 pp.
- Pascual Trillo, J. A., 2000: *El teatro de la ciencia y el drama ambiental*. Miraguano Ediciones. Madrid, 299 pp.
- Paz González, A.; Taboada Castro, M^a Teresa, Eds., 1999: *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*. Jornadas Internacionales sobre Erosión Hídrica. A Coruña. Servicio de Publicaciones de la Universidad da Coruña, 341 pp.
- Pedraza Gilsanz, J. de, 1996: *Geomorfología. Principios, Métodos y Aplicaciones*. Editorial Rueda. Madrid, 414 pp.
- PNUMA, 1991: *A New Assessment of the World Status of Desertification*. United Nations. Nairobi.
- Pérez Cueva, A. J. Ed., 1982: *Erosión acelerada antrópica*. Institutió Alfons el Magnànim. Valencia, 110 pp.
- Pickup, G.; Griffin, G. F.; Morton, S. R., 1994: "Desertification and Biodiversity in the Drylands: Australia". In *Biological Diversity in the Drylands of the World*. IPED. United Nations, UNESCO. París: 57-76.
- Pou, A., 1988: *La erosión*. MOPU. Unidades Temáticas Ambientales de la Dirección General del Medio Ambiente. Madrid, 121 pp.
- Puigdefábregas, J., 1995 (a): "Erosión y Desertificación en España". *El Campo*, 132:63-83. Bilbao.
- Puigdefábregas, J., 1995 (b): "Desertification: Stress beyond resilience, exploring a unifying process structure". *Ambio* 24: 311-313.
- Puigdefábregas, J., 1998: "Variabilidad climática y sus consecuencias sobre la sostenibilidad de los sistemas agrarios". En *Agricultura Sostenible.*, R. M. Jiménez Díaz y J. Lamo de Espinosa, Coordinadores. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid: 41-70.
- Pulido Boch, A.; Molina, L.; Vallejos, A.; Pulido Leboeuf, P., 2000: *El Campo de Dalías. Paradigma de uso intensivo*. Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín. Santander, 54 pp.
- Ramos Fernández, A., 1993: *¿Por qué la conservación de la naturaleza?* Discurso leído en el acto de recepción. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, 156 pp.
- Ritchie, J. C.; McHenry, J. R., 1990: "Application of radioactive fallout Cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review". *Journal Environ. Qual.*, 19: 215-233.
- Rojo, L.; Sánchez Fuster, M^a C., 1997: *Red de estaciones experimentales de seguimiento y evaluación de la erosión y desertificación, RESEL. Catálogo de Estaciones*. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, 121 pp.
- Roose, E. Ed.; 1999: *L'Influence de l'Homme sur L'Érosion. Volume 1: à échelle du versant. Bulletin Réseau Érosion* 19. Centre IRD. Montpellier, 608 pp.
- Rubio, J. L., 1987: "Desertificación en la Comunidad Valenciana: antecedentes históricos y situación actual de la erosión". *Revista Valenciana d'Estudis Autònoms*, 7: 231-258.
- Rubio, J. L., 1992: "Desertificación: un término complejo". *Quercus*. Vol.80: 20-21.
- Rubio, J. L., 1995: Desertification: evolution of a concept. Seminario *Desertificación y Cambio Climático*. Universidad Internacional Menéndez Pelayo. Santander, 9 pp.
- Rubio, J. L.; Sánchez, J.; Sanroque, P.; Molina, M. J., 1984: "Metodología de evaluación de la erosión hídrica en suelos del área mediterránea". *I Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Madrid, 827-836.
- Rubio, J. L.; Asins, S.; Andreu, V.; Paz, J. M.; Gimeno, E. Eds.: 2000: *Man and Soil at the Third Millenium. Key Notes*. Third International Congress. European Society for the Soil

- Conservation (ESSC). Museo de las Ciencias Príncipe Felipe. Ciudad de las Artes y las Ciencias. Valencia, 173 pp.
- Ruiz Izquierdo, I., 1996: "La lucha contra la desertificación". *Boletín Económico de Información Comercial Española (ICE)*, nº 2497: 15-23.
- Sala, M.; Rubio, J. L. Eds., 1994: *Soil erosion as a consequence of forest fires*. Geoforma ediciones. Logroño, 275 pp.
- Sala, M.; Rubio, J. L.; García-Ruiz, J. M^a, 1994: *Soil Erosion Studies in Spain*. Geoforma Ediciones. Logroño, 227 pp.
- Sancho, C., Benito, G.; Gutiérrez, M., 1991: "Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos". Sociedad Española de Geomorfología. *Cuadernos Técnicos de la SEG*, nº 2. Geoforma Ediciones. Logroño, 28 pp.
- Sanroque, P.; Rubio, J. L.; Sánchez, J., 1983: "Evaluación de la erosión hídrica de los suelos". *Anales de Edafología y Agrobiología*, 42: 855-875.
- Schnabel, S.; Gómez Amelia, D.; Ceballos, A. Eds., 1998: *Hidrología y Erosión de Suelos*. Núm. X. Monográfico de NORBA. Revista de Geografía. Universidad de Extremadura. 196 pp.
- Schwab, G. O.; Fangmeier, D. E.; Elliot, W. J., 1996: *Soil and water management systems*. 4th Edition. John Wiley y Sons., Chichester., 371 pp.
- Scoging, H. M., 1991: Desertification and its management. In global change and challenge-geography for the 1990s. Ed. E. Bennet and R. Estall. Rout Ledge. Londres. pp 57-90.
- Sempere, J.; Riechmann, J., 2000: *Sociología y Medio Ambiente*. Editorial Síntesis. Sociología. Madrid, 348 pp.
- Shepherd, W., 1947: Citado por Barton, Ch., 1993: "Soil and Land Conservation in agricultural areas of Western Australia: a proposal for more effective legislation". *Environmental and Planning Law Journal*, Vol. 10 (4) 251-266.
- Smith, R. M.; Stamey, W. L., 1965: "Determining the range of tolerable erosion". *Soil Science*, 100: 414-424.
- Soto, D., 1990: "Aproximación a la medida de la erosión y medios para reducir esta en la España peninsular". *Ecología, Fuera de Serie*, nº 1: 169-196.
- Thomas, D. S. G.; Middleton, N. J., 1994: *Desertification. Exploding the Myth*. John Wiley y Sons., Chichester, 194 pp.
- Thornes, J., 1984: "Procesos erosivos de las corrientes de agua y sus controles espaciales y temporales: un punto de vista teórico". En M. J. Kirkby y R. P. C. Morgan: *Erosión del suelo*. Editorial Limusa. México, pp. 165-225.
- UNEP, 1992: *World Atlas of Desertification*. United Nations Environmental Programme. Londres, 39 pp.
- UNESCO, 1977: "World Distribution of Arid Regions Scale 1/25.000.000". CERCS, MAB. *Technical notes 7*. París.
- USDA, 1987: *The Second RCA Appraisal, Soil Water and Related Resources on Nonfederal Land in the United States, Analysis of Conditions and Trends*. US Department of Agriculture. Washington.
- Van der Leeuw, S. Ed., 1995: *L'Homme et la Dégradation de L'Environnement*. XV^e Rencontres Internationales D'Archéologie et D'Histoire D'Antibes. Éditions APDCA-Sophia Antipolis. France, 514 pp.
- Vélez, R., 1994: "Prevention of the fire-erosion sequence risk". In *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires*. M. Sala y J. L. Rubio, Eds. Geoforma Ediciones. Logroño: 267-274.
- Veyret, Y., Coordination, 1998: *L'érosion entre nature et société*. SEDES. París, 344 pp.
- Warren, A.; Agnew, C., 1988: An assessment of Desertification and Land Degradation in arid and semi-arid areas. *International Institute for Environment and Development. Ecology and Conservation Unit, University College*. Londres. *Paper*, nº 2.
- Wischmeier, W. H., 1959: "A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation". *Proc. Soil. Sci. Soc. Am.*, 23: 246-249.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. 1958: "Rainfall energy and its relationship to soil loss". *Trans. Ann.geophysical Union Trans.*, 39: 285-291.
- Wischmeier, W. H.; Smith, D. D., 1978: *Predicting Rainfall Erosion Losses*. Agricultural Handbook, nº 537, 58 pp. United States Department of Agriculture. Washington, D. C.

El desarrollo de internet ha favorecido extraordinariamente la comunicación y el acceso a la información, convirtiéndose en una valiosa herramienta de trabajo en multitud de ámbitos, entre ellos el docente y el investigador. Realizar un barrido de direcciones tiene interés para el estudio de cualquier rama de la ciencia y en este caso para los interesados en los problemas ambientales en general y de erosión y desertificación en particular.

Internet ofrece muchas ventajas, entre ellas mayor accesibilidad física y económica que otros medios de comunicación. Los recursos que ofrece tienen una amplia distribución, proporcionando acceso a bibliotecas, bases de datos, noticias, información, publicaciones e ideas del mundo entero. Sin embargo, también tiene algunos inconvenientes. La proliferación de páginas web auspiciadas por organismos internacionales, ONGs, departamentos institucionales de ámbito internacional, nacional, regional y local, por grupos de investigación e, incluso, por particulares hace inabarcable la exhaustividad del barrido en cualquier tema. Así, pues, la heterogeneidad y la amplitud del espectro que abarca lo convierte en una herramienta de difícil uso. La avalancha de información que proporcionan los buscadores hace complejo discriminar la realmente útil para aspectos concretos. Ante tan abundante volumen de información, para aventurarse por la red son necesarios la paciencia y un criterio selectivo.

Las páginas de los organismos internacionales, nacionales, universidades, centros de investigación, etcétera, incluyen enlaces (links) con aquellas páginas relacionadas con sus actividades, y en casi todas ellas suele encontrarse información sobre procesos de erosión y desertificación.

Aquí se ofrece una selección de direcciones web que tienen interés para los interesados en los problemas ambientales en general y de erosión y desertificación en particular. La selección completa puede consultarse en internet en la dirección www.nivola.com/erosion/internet

(1) Varias

<http://www.gcrio.org/geo/dust.html> The U. S. Global Change Research. Information Office, 2001: *NAME: Dust storm magnitude, duration, and frequency.*

www.wri.org (World Resources Institute)

(2) ONGs

www.enda.sn (Tiers Monde)

www.oneworld.org/iied (International Institute for Environment and Development)

www.iucn.org (Union Mondiale pour la Nature)

www.enda.sn/energie/desertif/desertif.htm (Réseau International des ONG sur la Désertification, RIOD)

www.planbleu.or (Plan Azul)

www.adena.org (ADENA)

www.greenpeace.org (Greenpeace)

www.ecoportal.com.ar (Ecoportal)

www.tierra.org (Tierra)

www.ecologistasenaccion.org (Ecologistas en Acción)

www.foe.org (Friends of the Earth)

www.MEDForum.org (EcoMediterrània)

www.coda.org (Coordinadora de Organizaciones de Defensa Ambiental)

www.eeb.org (European Environmental Bureau)

www.enhf.org (European Nature Heritage Fund)

www.seo.org (Sociedad Española de Ornitología)

www.gci.ch (Cruz Verde Internacional)

www.crid.or.cr (Centro Regional de Información sobre Desastres)

<http://tierra.rediris.es> (Red de Ciencias de la Tierra de España)

www.nodo50.org/worldwatch (Worldwatch. Cambio Global)

www.aeet.org (Ecosistemas. Revista de la Asociación Española de Ecología Terrestre)

(3) Información de la Unión Europea

a. general

www.cordis.lu/ergo/home.html Pasarelas en línea sobre investigación europea. Introduciendo la palabra *desertificación*, aparecen 98 proyectos de investigación sobre desertificación y 31 sobre *erosión del suelo*.

www.eea.eu.int (Agencia Europea del Medio Ambiente)

www.science.plym.ac.uk/departments/geography/medafor/medafor.htm (Consequences for the mitigation of desertification of EU policies affecting forestry activity: a combined socio-economic and physical environmental approach)

b. proyectos de investigación

www.cranfield.ac.uk/sims/ecotech/projects/archaeo.html (ARCHAEOMEDES: degradation and desertification in the Mediterranean)

<http://alpha.emap.sai.jrc.it/desert/camaleo> (CAMALEO: proyecto sobre los cambios de los ecosistemas áridos en la región mediterránea)

www.kcl.ac.uk/desertlinks (DESERTLINKS: Policies for land use to combat desertification)

<http://p-case.iata.fi.cnr.it/dis-med> (DISMED: Desertification Information Systems for Mediterranean Europe)

www.medalus.demon.co.uk (MEDALUS: Mediterranean Desertification and Land Use)

<http://www.icis.unimaas.nl/medaction> (MEDACTION: Policies for Land Use to Combat Desertification)

<http://www.science.plym.ac.uk/departments/geography/medafor/medafor.htm> (MEDAFOR: medio ambiente, desertificación en la región mediterránea)

<http://www.uniss.it/nrd/medrap/index.htm> (MEDRAP: Concerted Action to Support the Northern Mediterranean Regional Action Programme to Combat Desertification)

www.unccd.int (United Nations Convention Desertification)

www.fao.org/desertification/search/ (Food and Agriculture Organization)

www.unepmap.org (United Nations Environment Programme. Coordinating Unit for the Mediterranean Action Plan)

www.undp.org/seed/unos.html (Bureau de la lutte contre la désertification et la sécheresse) –

www.idrc.ca/books/focus/794/794.html (Indicadores de la desertificación)

www.desertnet.de/desertification.html (Indicadores de la desertificación)

www.undp.org/undp/devwatch/indtempl.htm (Indices de gestión durable del agua, de los suelos y de la lucha contra la desertificación y la sequía. PNUMA)

<http://grid2.cr.usgs.gov/des/deshome.html> (Datos satelitarios y geográficos sobre la desertificación. PNUMA)

www.igbp.kva.se (International Geosphere-Biosphere Programme)

www.unesco.org (UNESCO)

www.unesco.org/mab (Programa MAB -Man and Biosphere- de la UNESCO)

www.unep.ch (Programa de N. U. de Medio Ambiente)

www.esd.worldbank.org/html/lqi/fr/home.htm (Indicadores sobre la calidad de las tierras por el Banco Mundial, la FAO y el PNUMA)

www.un.org/esa/sustdev/isd.htm (Indicadores de desarrollo durable enunciados por la Comisión de las Naciones Unidas sobre el desarrollo sostenible)

www.ipcc.ch (International Panel Global Change)

www.unfccc.de (Convención Marco Cambio Climático)

www.earthobservatory.nasa.gov (Observatorio de la Tierra. Ofrece imágenes de satélites, datos, documentos, enlaces, noticias e información copiosa y válida)

www.terra.nasa.gov (Satélite *Terra* de la NASA)

www.envisat.com (Satélite *Terra* de la NASA)

<http://earth.jsc.nasa.gov> (Earth from Space)

www.inform.umd.edu/geog/landsat

<http://spot4.cnes.fr> (SPOT Satellite Earth Observation System)

www.esa.int/ (Programa de observación de la Tierra y de su medio ambiente de la Agencia Espacial Europea)

Erosión y desertificación

Heridas de la Tierra



Suelo, agua y vegetación son recursos naturales imprescindibles; por ello, la conservación ambiental y el desarrollo económico deben tener un interés común: su protección y buena gestión.

Entre los grandes problemas ambientales que atañen a casi la mitad de las tierras emergidas del planeta, incluyendo buena parte de la península Ibérica, se hallan la erosión y la desertificación.

La percepción y la evaluación de tales procesos, manifestados en un descenso de la fertilidad natural y la productividad biológica del suelo, resulta fundamental para el establecimiento de programas de gestión del territorio, de conservación de los recursos soporte de la vida y para el desarrollo sostenible.

Francisco López Bermúdez es catedrático de Geografía Física en la Universidad de Murcia. Entre otros cargos, en 1991 contribuyó a la fundación de la Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y Desertificación, LUCDEME-RESEL, del Ministerio de Medio Ambiente, ha sido presidente de la Sociedad Española de Geomorfología y director del Instituto del Agua y Medio Ambiente de la Universidad de Murcia. Ha colaborado en la redacción del Programa Nacional de lucha contra la desertificación.

Miembro de diversas sociedades científicas españolas e internacionales, e investigador principal en buen número de proyectos de I+D financiados por la Comisión Europea y el Plan Nacional, es autor de varios libros y más de doscientos artículos sobre problemas ambientales, erosión y desertificación.

matices3

n i v o l a

L I B R O S
E D I C I O N E S