

ESTACION EXPERIMENTAL “EL CAUTIVO” (DESIERTO DE TABERNAS, ALMERIA)

Albert Solé Benet¹
Yolanda Cantón²
Roberto Lázaro¹
Gabriel del Barrio¹
Juan Puigdefábregas¹
Sebastián Vidal¹

¹ Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC, Almería

² Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Almería

El Área Experimental El Cautivo es una instalación permanente, mantenida y gestionada por el Departamento de Desertificación y Geoecología de la Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA) del CSIC, en Almería. El Cautivo inició su andadura en 1990 en el marco del proyecto “Erosión por acarcavamiento en medio semiárido: causas, evolución y restauración” (del Plan Nacional de Ciencia y Tecnología), y ha funcionado sin interrupción desde entonces asociada a otros proyectos de investigación.

El Cautivo se escogió por ser una de las áreas del desierto de Tabernas en donde los procesos geomorfológicos parecen ser especialmente activos, enmarcados por el clima más árido de Europa que le confieren características geoecológicas muy especiales. Además, las áreas intensamente acarcavadas, conocidas como *malpais* o *badlands* en inglés, son consideradas como laboratorios naturales que ofrecen en miniatura y en intervalos de tiempo cortos muchas de las formas y procesos erosivos de los paisajes fluviales.

1.- Situación y descripción del entorno de la estación

1.1.- Geografía – geología

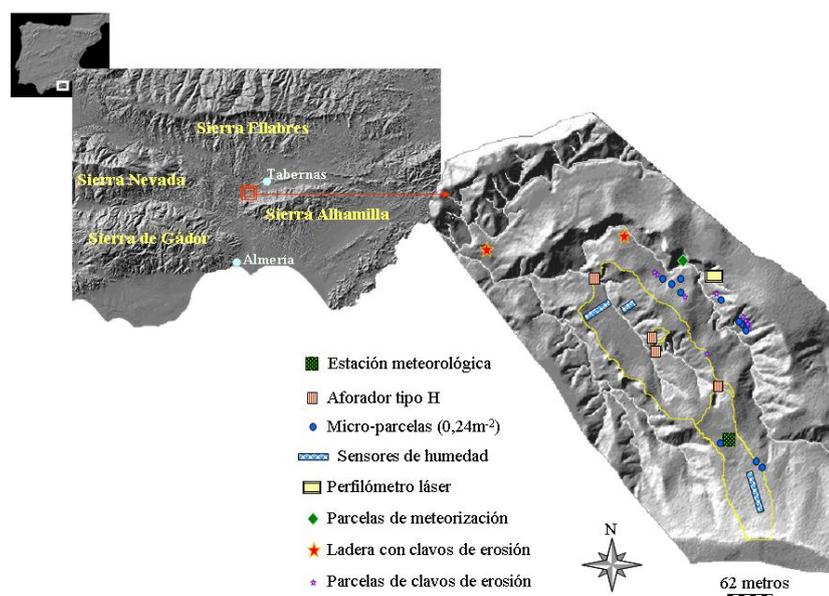


Fig 1.- Localización del área experimental El Cautivo en la depresión de Tabernas. Ubicación de las distintas instalaciones. Mapas compilados a partir de modelos digitales de elevación a 30 m y 1 m de resolución respectivamente.

La estación experimental El Cautivo se encuentra en la cuenca de Tabernas (Fig 1), a unos 20 km al N de la ciudad de Almería, al SW de la villa de Tabernas, y a 1 km al S de la estación de servicio Alfaro, en la margen izquierda de la rambla de Tabernas.

La cuenca de Tabernas es una de las cuencas Neógenas de la Cordillera Bética, rodeada por las Sierras Nevada al Oeste, de los Filabres al Norte y Alhamilla al Sur. Se ensancha hacia el Este, hacia la cuenca de Sorbas, mientras que hacia el Oeste se estrecha formando el corredor alpujárride (o de Canjáyar) (IGME, 1975).

La cuenca se formó por el plegamiento y fallamiento del zócalo metamórfico a partir del Serravallense, hace 10 millones de años, rellenándose sucesivamente desde dicha época hasta el Pleistoceno por sedimentos marinos primero y continentales después (Weijemars, 1991). En todo este período se depositaron areniscas, margas, calizas arrecifales y yesos. Durante el Tortonense sedimentaron potentes series turbidíticas (400 a 500 m), con la típica alternancia en estratos de 10 cm a más de 1 m de margas bioturbadas y areniscas, correspondientes a abanicos deltaicos (Kleverlaan, 1987, 1989a, 1989b).

Durante el Cuaternario los levantamientos y las disecciones se fueron sucediendo dando lugar a un paisaje escalonado con distintos niveles de encajamiento de distintas edades separados por terrazas aluviales o depósitos coluviales que cubren los sedimentos blandos, las margas, que dan lugar al malpaís. Este escalonamiento del malpaís origina una morfología de cuevas esencialmente de origen tectónico que ha ido paralelo con una alternancia de climas secos y húmedos durante el Cuaternario (Rohdenburg y Sabelberg, 1973). Al menos se identifican tres niveles que corresponden a sendos estadios de erosión y sedimentación (Harvey y Calvo, 1991) (Fig 2). Dentro de la cuenca de Tabernas, la zona de malpaís ocupa una extensión de 5540 ha, entre 220 m y 660 m de altitud, una de las más extensas del sudeste peninsular.



Fig 2.- Vista aérea general del área en la que se pueden observar los niveles de peneplanización Cuaternarios (foto Solé Benet).

La principal roca madre del malpaís es una marga yesífera o limolita calco-yesífera, constituida en un 50% por minerales silíceos (moscovita, paragonita, clorita, cuarzo y feldespatos en orden decreciente de abundancia) y el resto por calcita, yeso y dolomita (Solé-Benet et al., 1997).

1.2.- Clima

Los principales rasgos del clima del área son la aridez, el carácter mediterráneo y las temperaturas suaves. La aridez se debe a que la mayor parte de las precipitaciones proceden del Atlántico y las sierras béticas las interceptan al quedar el área experimental a sotavento de la circulación atmosférica dominante (Capel, 1986, Castillo, 1989). Según los índices de aridez *pluvifactor de Lang*, *índice de Martonne*, *coeficiente de Emberger*, *índice de Giacobbe* e *índice de Thornthwaite*, el territorio que incluye el área experimental se encuentra entre las zonas más áridas de la península Ibérica (Capel, 1982), e incluso de Europa (Neumann, 1961).

1.2.1. Precipitación

La precipitación media anual es de 239 mm (para un registro de 30 años en la estación de Tabernas, 1967 - 1997) y presenta un coeficiente de variación interanual del 36% y uno mensual entre 76% y 215%. Las precipitaciones anuales oscilan entre 115 mm y 431 mm y el número de días de lluvia (≥ 1 mm) por año oscila entre 25 y 55 (promedio = 37). Pero sólo un 6% de los episodios lluviosos superan los 20 mm y sólo un 0.7% supera los 50 mm día⁻¹. La serie de totales mensuales tiene autocorrelación significativa con desfases de 2 y de 7 meses (ciclos estacionales) y de 11, 12 y 23 meses (ciclos anuales, basados en la sequía de verano). El 34% de los totales mensuales resultan ser de 0 a 10 mm y el 50% de menos de 20 mm; los valores mensuales altos son poco frecuentes. Sólo el 4% superan los 60 mm y sólo el 0,65% se sitúan en la clase más alta (170-180 mm). Por otra parte, todos los meses han registrado 0 mm al menos una vez. Hay un máximo en Octubre - Noviembre y un mínimo en Julio - Agosto; encontrándose también valores altos en invierno. En los periodos secos disminuye más el volumen de precipitación que el número de días de lluvia; la media de precipitación por día de lluvia ≥ 1 mm fue de 6,6 mm día⁻¹ para el conjunto de la serie y de 5,5 mm día⁻¹ durante el período seco de 1975 - 1988. Entre los máximos anuales de precipitación en 24 horas destacan los 98 mm en Junio de 1972 (41 % del total anual), 65.5 mm (Enero de 1992), 63 mm (Diciembre de 1971) y 61 mm (Febrero de 1993). En los años más secos que la media, el máximo evento del año ocurre en Febrero y, en los años más húmedos que la media, el mes más húmedo es Octubre. La serie de Tabernas presenta periodos húmedos y secos, pero no tendencia ni cambios abruptos (Lázaro et al, 2001), lo cual es consistente con la serie de Almería de 1911 a 1991 (Esteban-Parra et al, 1997) y con el clima mediterráneo de la península Ibérica de Esteban-Parra *et al* (1998).

En el observatorio propio del área experimental se totalizan 236 mm de media anual para el período 1991-2004, también con un largo período de precipitaciones que va de Septiembre a Mayo - Junio, pero con mayor concentración de lluvias en otoño e invierno. La estación más lluviosa es invierno (Diciembre, 31,7 mm, Enero 32,2 y Febrero 39,2 mm), seguida del otoño (21,9 mm en Septiembre, 23,9 en Octubre y 25,9 en Noviembre). De Marzo a Junio oscila entre 10 y 15 mm, excepto en Mayo, con 22,8 mm. Por último, en verano se recogen 0,3 mm de media en Julio y 1 mm en Agosto. Los totales anuales han oscilado entre los 496,2 mm de 1992 o los 341,8 mm de 1997, hasta los 156,9 mm (1998) o los 115,1 mm de 1995 (Fig 3).

Las intensidades máximas registradas para diversos intervalos de tiempo han sido: 66,6 mm en 24 h, 108 mm h⁻¹ en 5 minutos y 83,8 mm h⁻¹ en 10 minutos.

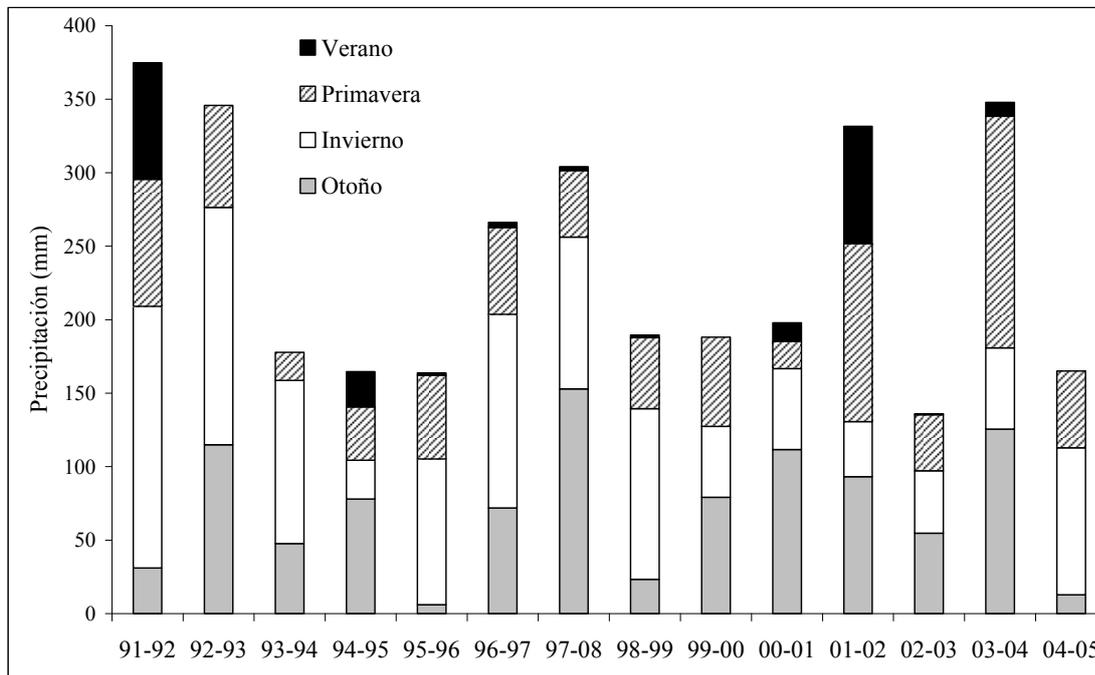


Fig 3.- Precipitación anual y estacional en los últimos 15 años (1989-90 a 2003-04).

1.2.2. Temperatura

La temperatura media anual es de 17,9°C en Tabernas (27 años). La medias de las máximas están entre 17°C y 18°C en los meses más fríos (Diciembre a Febrero) y por encima de los 34°C en Julio y Agosto. Todos los meses han alcanzado o superado los 30°C de máxima absoluta al menos una vez. La media de las mínimas está entre 3°C y 5°C en Enero y Diciembre y entre 19°C y 20°C en Agosto y Julio. Aunque el periodo en que pueden ocurrir heladas incluye 5 meses (de Noviembre a Marzo), de hecho los días de helada son infrecuentes. La oscilación termométrica media mensual (diferencia entre la media de máximas y la media de mínimas diarias) varía entre 12,8°C (invierno) y 15,6°C (verano), con media general de 14°C. La oscilación, aunque más amplia, es más estable en verano (coeficiente de variación de 8°C a 11°C, frente a 22°C ó 23°C en invierno). Tanto para máximas como para mínimas o medias, el coeficiente de variación es, del doble a varias veces mayor en invierno que en verano: las temperaturas de invierno, además de no ser muy bajas, pueden subir notablemente entre uno y otro frente frío. Un test de Mann-Kendall, muestra que tanto las medias como las medias de las máximas y las oscilaciones absoluta y media tienen una ligera tendencia a aumentar que es significativa ($p = 0,05$), mientras que las mínimas absolutas tendrían ligera tendencia a disminuir igualmente significativa (Lázaro et al., 2004).

En el Cautivo el régimen térmico parece algo más suave que en Tabernas. La media anual es de 18,6°C, oscilando las medias mensuales entre los 10,2°C (Enero) y los 27,9°C (Agosto). Las máximas absolutas son similares a las de Tabernas y las medias de máximas también, o ligeramente más suaves. Pero las mínimas absolutas y las medias de mínimas parecen unos 4°C y 3°C más elevadas que en Tabernas, respectivamente (Lázaro et al, 2004).

1.2.3. Humedad relativa

En el Cautivo la humedad relativa del aire media oscila entre el 51 - 52% en Julio y Agosto y el 65 - 66% en Diciembre y Enero. Pero las oscilaciones en ciclos de pocos días, incluso dentro de un mismo día, son con frecuencia más fuertes que las anuales. En cualquier mes del año se puede alcanzar o superar el 97%. Incluso las medias de las máximas son elevadas, los valores más bajos corresponden a Mayo (82,6%) y Julio (85,6%). Pero las mínimas absolutas son muy bajas, incluso en invierno (4,0% en Enero), la más alta es de sólo 11,2% (Junio); y las medias de las mínimas, mucho más regulares, oscilan entre el 30% (Julio y Agosto) y el 46% (Diciembre y Enero) (Lázaro et al., 2004).

1.2.4. Radiación solar

En el Cautivo la radiación solar total incidente alcanza máximos diarios de alrededor de 1000 $w m^{-2}$ en los meses de días largos, con cielo despejado, soliendo superar los 900 $w m^{-2}$ aproximadamente entre las 12:30 y las 16 horas (hora local). Estos máximos se dan durante 4 ó 5 meses al año, a partir de mediados de abril. En los días más cortos los máximos están entre 500 y 600 $w m^{-2}$ (si no hay nubes). La radiación sube rápidamente durante el invierno, 3 ó 4 $w m^{-2}$ cada día, aunque también es durante el invierno cuando resulta más variable de unos años a otros (Lázaro et al., 2004).

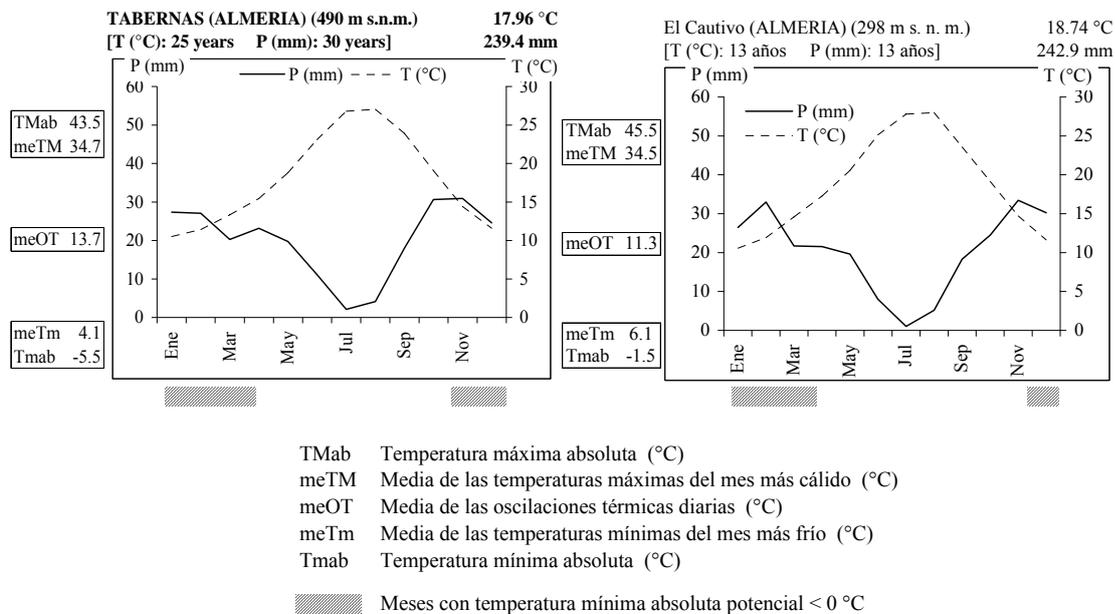


Fig 4.- Diagramas climáticos de la estación de Tabernas (25 años) y de El Cautivo (13 años).

1.2.5. ETP

La evapotranspiración potencial (ETP) promedio calculada con el método de Penman para la estación de Tabernas es de 779,5 mm por lo que el índice P/ETP es de 0,3, es decir *semiárido*, sin embargo, para Thornwaite (1948) la zona pertenece a la categoría *árida* (Palacio, 2002). Una estima por el método de Blaney y Criddle modificado por Doorrenbos y Pruitt (1976), da una ETP total anual media de 1666 mm para la estación de Tabernas. La ETP es siempre varias veces mayor que la precipitación (P), si bien oscila de unos a otros años y sobre todo de unos meses a otros. En el mes con mayor cociente P/ETP, Noviembre, la capacidad del medio para evaporar y transpirar sigue siendo triple que la precipitación. En el mes de Julio, la ETP alcanza unas 100 veces el valor de la precipitación. A escala mediterránea el cociente P/ETP de Tabernas es intermedio entre los valores subsaharianos y a los de la mitad norte del Mediterráneo (Palutikof et al., 1996).

En la Fig 4 se presentan los diagramas climáticos de la estación de Tabernas (30 años) y de El Cautivo (13 años).

1.3.- Topografía

La litología y el clima de la zona han configurado un paisaje de malpaís en el que se observan valles amplios y encajados y marcadas divisorias, largas y estrechas (Fig 5).

En general los valles siguen direcciones N-S en las partes altas y medias de los cauces y E-W en las partes bajas. Las laderas orientadas al N y E por un lado y las orientadas al S y W por otro difieren considerablemente en pendiente y con frecuencia también en morfología (Fig 6). Las laderas orientadas al N y E tienen una pendiente promedio de $28^\circ \pm 8^\circ$. Las laderas orientadas al S y W son más inclinadas ($47 \pm 9^\circ$) y de perfil más rectilíneo. Los barrancos nacen de cárcavas a diversas alturas en una cabecera general que se extiende hasta la cornisa superior de areniscas, a 380 m de altitud.



Fig 5.- Fotografía aérea del sector del Desierto de Tabernas en donde se ubica el área experimental, mostrando el típico malpaís o *badlands*, con divisorias largas y estrechas (foto Chadwick).

1.4.- Hidrología superficial

Todos estos barrancos son tributarios de la Rambla de Tabernas que a su vez vierte en el Río Andarax. Dicha rambla alcanza la zona procedente del NO y, tras describir un meandro de casi 90° , toma dirección SO; con 240 m de altitud, constituye el nivel de base.

La red hidrográfica del desierto de Tabernas, de tipo sub-dendrítico, con una elevada densidad y disección, está formada exclusivamente por ramblas, barrancos y cárcavas de régimen reducido y estacional, de tipo torrencial, procedentes de las sierras Alhamilla, al S, y de los Filabres, al N. La red hidrográfica de la zona de estudio procede del cerro el Cautivo, un bloque fallado y levantado a finales del Plioceno (Harvey, 1987).



Fig 6.- Típico valle asimétrico del área experimental (foto Solé Benet).

1.5.- Hidrogeología

Tanto algunas formaciones cuaternarias como terciarias incluyen niveles de calcarenitas que constituyen niveles acuíferos. Las formaciones cuaternarias tienen escasa potencia, con un potencial acuífero muy limitado. Las formaciones terciarias pueden contener mayores volúmenes de agua, pero por el origen marino de estos sedimentos, el agua es considerablemente salina.

En al menos dos puntos próximos al área experimental hay manantiales de caudal muy débil en la actualidad, probablemente procedentes de aguas profundas. Están asociados a depósitos de travertinos cuaternarios que todavía hoy en día se siguen formando (Villalobos et al., 2003).

1.6.- Suelos – propiedades estructurales

Los suelos del área experimental, formados en condiciones de elevada aridez sobre una roca madre de tipo blando y predominio de los procesos erosivos, son generalmente poco profundos aunque con un grado de desarrollo más acusado del que cabría esperar si consideramos exclusivamente la precipitación media anual. La cartografía edafológica existente al 1:100.000 (Perez Pujalte, 1987; Oyonarte, 2004) considera que el conjunto del área está dominado por *Solonchaks órticos* con inclusiones de *Regosoles calcáricos* (FAO-UNESCO, 1974). Sin embargo, un estudio detallado del área experimental revela notables

diferencias entre los suelos presentes en diferentes orientaciones y pendientes, así como mayor variedad de unidades de suelo (Cantón et al., 2003), proporcionando las claves de su formación y evolución y aporta elementos indispensables para su manejo sostenible. Son suelos, en general, franco limosos y limoso-francos con un bajo contenido en arcilla y un elevado contenido en limo fino. Su contenido en materia orgánica es generalmente muy bajo, y por el origen marino de la roca madre domina el yeso y los carbonatos secundarios, dando conductividades eléctricas entre 7 y 8,5 y oscilando los pH entre neutros y alcalinos. Las figuras 7 y 8 presentan dos perfiles de suelo en grados de desarrollo extremos: un *regosol calcárico* el primero y un *leptosol epiléptico* el segundo, ambos términos según FAO-ISRIC-ISSS (1998).



Fig 7.- *Regosol calcárico* (FAO-ISRIC-ISSS, 1998), suelo típico de las partes bajas de los pedimento de laderas orientadas al cuadrante NE (foto Cantón).



Fig 8.- *Lepsosol epiléptico* (FAO-ISRIC-ISSS, 1998), suelo, más bien regolito, típico de las laderas desnudas orientadas al cuadrante SO (foto Cantón).

1.7.- Vegetación

El área no puede sostener vegetación arbórea zonal por razones climáticas (Montero y G. Rebollar, 1983; Rivas - Martínez et al., 1987). La vegetación es un matorral mediterráneo de poca talla y escasa cobertura; caméfitos y terófitos así como algunos hemicriptófitos son los biotipos mejor adaptados a este entorno semiárido y templado y, en conjunto, suponen la gran mayoría de la flora vascular. Al menos la mitad de las especies son anuales, pero la mayor parte de la biomasa se debe a los arbustos enanos y las gramíneas vivaces que forman macollas; los líquenes terrícolas son muy frecuentes y cubren una importante extensión. Las áreas vegetadas alternan en mosaico con otras que lo están apenas; dentro de las vegetadas a menudo alternan también manchas dominadas por distintas formas vitales. El efecto combinado de la erosión, los varios milenios de asentamiento humano y la dificultad de recuperación, muy lenta en un entorno tan seco, mantiene la vegetación más o menos permanentemente rejuvenecida. Actualmente incluye pocas especies y muy pocos individuos pertenecientes a la clímax que se le supone (*Chamaeropo humilis* - *Rhamneto lycioidis* subsp. *salsoletosum webbii*, según Peinado et al, 1992); los restos de la clímax son casi siempre pies aislados de *Rhamnus lycioides*

El estrato arbustivo presenta comunidades seriales ricas y originales desde el punto de vista florístico, en las que prevalecen los caméfitos. En los lugares más estables y poco usados (casi siempre fuera o por encima de lo que es el área abarrancada propiamente) es un espartal dominado por *Stipa tenacissima*), salpicado ocasionalmente de *Genista umbellata* y *Rhamnus lycioides lycioides* y, encuadrable en la alianza *Stipion tenacissimae* de la clase de vegetación *Lygeo sparti - Stipetea tenacissimae*. El resto está, o desprovisto de vegetación, o poco cubierto con un matorral enano o tomillar dominado por caméfitos xerófilos y más o menos halófilos, que constituyen la asociación *Anabasio hispanicae - Euzomodendretum bourgaeani* o comunidades afines de *Anthyllido - Salsolion papillosae*, de la Clase *Rosmarinetea officinalis*. Este tomillar tiene una flora muy característica y original en el contexto europeo y aún ibérico, por abundar las plantas de distribución ibérico- norteafricana (*Fagonia cretica*, *Genista umbellata*, *Stipa tenacissima*, *Launaea arborescens*); endemismos SE ibérico - Norteafricanos (*Launaea arborescens*, *Rosmarinus eriocalix*); endemismos del SE ibérico (*Anabasis articulata* var. *hispanica*, *Anthyllis terniflora*, *Artemisia barrelieri*, *Frankenia corymbosa*, *Hammada articulata*, *Heliathemum almeriense*, *Launaea lanifera*, *Salsola genistoides*, *Suaeda pruinosa*, *Thymus hyemalis*); endemismos del Sector Almeriense (*Herniaria fontanesii* ssp. *almeriana*, *Limonium insigne*, *Salsola papillosa*, *Santolina viscosa*, *Sideritis pusilla* ssp. *pusilla*) y aún endemismos más o menos locales (del subsector Almeriense - Occidental: *Coris hispanica*, *Euzomodendron bourgaeum*, *Helianthemum almeriense* ssp. *almeriense*). Estas especies de limitada área de distribución son además las más frecuentes. El resto de taxones presentan distribuciones diversas pero principalmente son de la Región Mediterránea y de la mitad Sur de Europa. Alturas típicas de este estrato están entre 30 y 50 cm, unos 20 cm más en el espartal, y la cobertura es muy variable, aunque casi siempre inferior al 50%. Las manchas densas están asociadas a concavidades y ocupan poca extensión.



Fig 9.- Vegetación típica de pedimentos y/o partes bajas de laderas orientadas al cuadrante NE (foto Solé Benet).

El estrato herbáceo, más que debajo del anterior está en los espacios que dejan libres las vivaces. Está compuesto casi íntegramente por terófitos, también originales desde el punto de vista florístico aunque menos que los caméfitos: especies ibéricas o ibero - africanismos (*Aizoon hispanicum*, *Asphodelus tenuifolius*, *Asteriscus aquaticus*, *Bellis annua* ssp. *microcephala*); endémicas del SE o locales (*Diplotaxis crassifolia* (a menudo bianual), *Linaria nigricans*, *Moricandia foetida*), así como otras especies de interés (*Koelpinia linearis*, *Limonium echioides*, *Plantago amplexicaulis*, *Plantago ovata*...). Las comunidades principales se pueden encuadrar en *Stipion capensis*, de la clase *Tuberarietea guttatae* y están dominadas o bien por *Stipa capensis* y *Plantago ovata* o bien por *Moricandia foetida* (Lázaro y Puigdefábregas, 1994). La altura típica suele estar entre 10 y 25 cm, excepto para *Moricandia*, que suele alcanzar 40 ó 50 en los años buenos. La cobertura es muy variable.

El estrato muscinal está compuesto sobre todo por líquenes terrícolas, a menudo con coberturas densas, entre 50 y 90%, y es importante en la zona, tanto por la extensión que ocupa (aproximadamente un tercio del área) como por sus efectos sobre la superficie, sobre todo modificando la hidrología, la erosión y la fisico-química del suelo. Se han catalogado más de 30 especies de líquenes en el área, algunas de las más frecuentes, como *Diploschistes diacapsis* y *Squamarina lentigera* siendo típicas de las regiones semiáridas o áridas.



Fig 10.- Cobertura típica de líquenes en las partes altas de laderas orientadas al cuadrante NE. El liquen blanco es *Diploschistes diacapsis* y el verdoso, *Squamarina lentigera* (foto Solé Benet).

1.8.- Población y uso del suelo

Por tratarse de una zona de malpaís, la presencia humana ha sido tradicionalmente escasa, dando testimonio de ello algunos cortijos abandonados, la mayoría en estado de ruina, en donde se alojaban una o más familias dedicadas a la agricultura de subsistencia practicada en pedimentos y terrazas asociadas a las ramblas. En estas últimas incluso llegó a practicarse el regadío mediante captaciones de la escorrentía de las ramblas por el sistema de *boqueras* (desviación total o parcial del cauce principal que es canalizado para regar terrazas agrícolas aguas abajo) y a veces captación de escorrentía de laderas mediante aljibes. Sin embargo, el manejo deficiente tanto de un suelo con cantidades apreciables de sales solubles como del agua de escorrentía, contribuyó a la salinización progresiva de la tierra. Por otra parte, esta

agricultura casi de subsistencia no ha podido competir con otras actividades (como los cultivos forzados o la industria) que producen mayor nivel de vida. La consecuencia de todo ello ha sido el abandono de estos cortijos, en muchos casos hace ya 60 o más años. Sin embargo, en las topografías más favorables las actuales sociedades de cazadores siembran cereales esporádicamente para fomentar la presencia de especies cinegéticas (perdices y conejos sobre todo). La ganadería extensiva ovina y caprina dejó su huella en las numerosas pistas de ganado observables en las laderas margosas (Fig 11), aunque dicha ganadería, al parecer muy local, se abandonó prácticamente al mismo tiempo que los cortijos. A escala comarcal, la elevación general del nivel de vida, la mejora de las carreteras y la proximidad a la ciudad de Almería han favorecido en los últimos años la rehabilitación de cortijos abandonados e incluso algunas nuevas construcciones en las áreas más planas junto a nuevas plantaciones de olivar que se han beneficiado de subvenciones relativamente recientes. Pero esto no se da en el malpaís donde está nuestra estación experimental.

A partir de los años 1960 se ubicaron en varios puntos del paisaje construcciones utilizadas en el rodaje de películas sobre el Oeste americano. Algunas de dichas construcciones, rehabilitadas, se utilizan ahora como atracciones turísticas. Aunque con menor intensidad, el rodaje de películas y de anuncios publicitarios ambientados en entornos áridos continúa actualmente.



Fig 11.- Pistas de ganado generadas hace más de 15 años en las laderas más o menos vegetadas orientadas al cuadrante NE (foto Solé Benet)..

1.9.- Procesos ambientales y riesgo naturales

Entre los procesos abióticos que determinan el aspecto del paisaje actual dominan los de erosión hídrica: por movimientos en masa, por túneles, por escorrentía superficial concentrada, por escorrentía difusa y por salpicadura.

Cuando todo el espesor del suelo o del regolito se satura de agua, lo que ocurre con poca frecuencia, se producen movimientos en masa que afectan puntualmente la morfología del paisaje (Fig 12), dejando una huella en la ladera y con frecuencia produciendo un depósito puntual de sedimentos en el cauce, que serán transportados por precipitaciones posteriores. Estos movimientos son más frecuentes en las laderas ya erosionadas, las cuales muestran también mayor densidad de surcos producidos por la concentración de escorrentía. La escorrentía difusa a menudo es concentrada a escala centimétrica y también tiene algunos

efectos visibles, por ejemplo, junto con la erosión por salpicadura, define y resalta pedestales al circular entre los clastos o los líquenes. Estos últimos, aunque protegen del impacto de las gotas en menor grado que las piedras, protegen lo suficiente como para llegar a formar una especie de pedestales y pueden crecer y extenderse a pesar de la erosión por salpicadura. La sufusión es menos frecuente en el área y sólo es importante puntualmente. Las cárcavas pueden iniciarse a partir de surcos y a veces también de movimientos en masa y de colapsos producidos por sufusión y son las formas erosivas dominantes en el malpaís de Tabernas a escala general. Pero pueden observarse en la zona toda clase de formas de erosión a escalas desde centímetros a hectómetros, como surcos, acanaladuras, cárcavas, túneles de sufusión, pedestales, pináculos, marmitas, pozas, desplomes, caídas de bloques, etc. proporcionando al desierto de Tabernas el calificativo de inmejorable laboratorio geomorfológico natural (Cañadas y Claramunt, 2000; Villalobos et al., 2003; Cantón y Solé, 2004c).



Fig 12.- Pequeño coño de derrubios provocado por un movimientos en masa debido a las precipitaciones de Febrero de 1994 (111 mm en menos de tres días) (foto Solé Benet).

La erosión afecta a la gran mayoría de laderas margosas y en mucho mayor grado a las orientadas hacia el cuadrante SO, casi siempre desnudas y con una elevada densidad de surcos y acanaladuras (Fig 13). Cuando las margas yesíferas aparecen recubiertas por niveles de calcarenita, la incisión de la red de drenaje y el consiguiente retroceso de las laderas origina una importante caída de bloques (Fig 14). En los pedimentos colgados, aislados por cárcavas, suele observarse un pavimento de piedras, en general procedentes de los estratos de areniscas y conglomerados.

Sin embargo y debido a la baja pluviometría de la región, y a la baja proporción de lluvias intensas, las tasas de erosión a nivel general son bajas y mantienen aparentemente inalterable la morfología del paisaje.

Los riesgos derivados de la erosión se producen en general a nivel muy local, consistiendo en la destrucción parcial de caminos y campos de cultivo.



Fig 13.- Cárcava, surcos y acanaladuras en un típica ladera orientada al cuadrante SW, con fuerte pendiente (foto Solé Benet).



Fig 14.- Caída de bloques en la rambla de Tabernas (foto Solé Benet).

Otro proceso abiótico de interés es la salinización. Puede ser natural en algunas áreas mal drenadas, como terrazas recientes, pero se manifiesta en mayor grado en terrazas inducidas por el hombre en los laterales de algunas ramblas cuando se ha regado con aguas de baja calidad y/o con técnicas de riego poco adecuadas.

Otros posibles riesgos no evaluados podrían producirse aguas abajo: a) sellado temporal de los cauces por los limos finos resultantes de la erosión de las limolitas, con el consiguiente riesgo de avenidas y disminución de la recarga del acuífero del Bajo Andarax, b) contaminación difusa o concentrada por la sales solubles procedentes del área.

Los procesos bióticos más llamativos de la región son: a) la profusión de líquenes, que colonizan gran parte de las laderas orientadas entre el N y el E, sobre todo su parte superior, así como diversos otros espacios en las demás orientaciones, siempre que puedan competir con las plantas vasculares por tratarse de puntos relativamente secos a nivel local; b) la originalidad de la flora vascular, ya que son muy frecuentes las plantas de pequeña área de distribución y las ibérico-norteafricanas. Los líquenes tienen un efecto significativo en la mitigación de los fenómenos erosivos (Solé-Benet et al, 1997; Cantón et al, 2001a) y también en la colonización de los espacios denudados por movimientos en masa recurrentes; y el papel protector de la vegetación vascular es en general mayor.

2.- Investigación desarrollada, infraestructura científica y metodologías usadas

2.1.- Proyectos

Desde su constitución en 1990 en el marco de un proyecto del Plan Nacional (Erosión por acaravamiento en medio semiárido, NAT89-1072-C06-02), diversos proyectos consecutivos, tanto del Plan Nacional (DESERMA, AMB93 -0844-C06-01, PROHIDRADE, AMB95-0986-C02-01, EPOHIDRO, HID98-1056-C02-01, PROHISEM, REN2001-2268-C02-01, CANOA, GLC2004-04919-C02-01, PROBASE, CGL2006-11619/HID, ECONEXUS, REN2000-1513 GLO, PECOS, REN2003-04570 y PREVEA, CGL2007-63258/BOS), como de la Comisión Europea (MEDALUS, EPOC-CT90-0014-(SMA), MEDALUS II, EV5V-0128, MEDALUS III, ENV4-CT95-0118, y GEORANGE, CE EVK2-2000-22089) han utilizado las instalaciones y/o sus parámetros meteorológicos, hidrológicos y geomorfológicos contribuyendo asimismo a su mejora mediante la incorporación de infraestructura temporal o permanente. La estación El Cautivo forma parte de la RESEL (Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y Desertificación), financiada por la Dirección General para la Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente, desde 1995.

2.2.- Objetivos

Los objetivos generales que se han mantenido desde su puesta en funcionamiento han sido: I) caracterizar geo-ecológicamente las formaciones acaravadas del llamado desierto de Tabernas, y II) conocer su respuesta hidrológica y erosiva ante las precipitaciones y predecir la dinámica de este paisaje en condiciones de cambio climático. En el curso de los diversos proyectos llevados a cabo total o parcialmente en sus instalaciones, objetivos específicos han tratado de responder a las siguientes preguntas: 1) cómo controla la topografía la distribución espacial de los distintos tipos de cubiertas del suelo (superficies), 2) cual es el comportamiento hidrológico y erosivo de los distintos tipos de superficie del suelo y como contribuyen a la respuesta hidrológica de una pequeña cuenca, y concretamente 3) cuál es la respuesta de las costras físicas y biológicas y su papel en la evolución de un paisaje acaravado semiárido, 4) influye el patrón temporal de la precipitación en la distribución espacial de las costras biológicas y en sus efectos sobre la escorrentía y la erosión, 5) qué metodologías son más adecuadas para medir la erosión a diversas escalas espaciales y temporales, 6) cuales son los procesos que controlan la evolución y génesis de los suelos en el área, especialmente respecto al lavado y acumulación del yeso, 7) cómo son los regímenes de humedad del suelo en los distintos tipos de superficies y que factores los controlan, 8) cómo se meteoriza la roca madre de la zona acaravada y a qué velocidad, 9) qué limita la erosión: el proceso de meteorización o el transporte, 10) se puede predecir con fiabilidad el comportamiento hidrológico y erosivo de este malpaís, 11) cuál es el número mínimo de

variables hidrológicas que deben intervenir en un modelo de simulación hidrológica para zonas acarcavadas semiáridas, 12) a qué se debe la asimetría de los de la zona.

2.3.- Métodos

Los métodos utilizados se pueden agrupar en:

- 1. Mediciones directas en el campo: a) una sola vez, como la densidad aparente y la conductividad hidráulica del suelo o la frecuencia de las especies o la cobertura vegetal, mediante conteos en cuadrados reticulados; b) periódicas, bien sea manualmente, como la medición de clavos de erosión y la recogida de sedimentos procedentes de parcelas de erosión o de microcuencas (Fig 1), bien sea a través de sensores de tipo meteorológico o hidrológico, como los sensores de nivel de agua (Vidal et al., 1996) y carga de sedimentos en los cauces (Fig 15), o el seguimiento de actividad metabólica de líquenes en condiciones naturales; o bien mediante el uso eventual de dispositivos mecánicos o electrónicos como perfilómetro láser (Fig 16), infiltrómetro de tensión, sensores de humedad del suelo, etc.
- 2. Métodos de laboratorio que incluyen todas las caracterizaciones del agua de escorrentía, sedimentos y suelos, como pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, sales totales e iones solubles, materia orgánica, composición granulométrica, estabilidad de los agregados, límites de Atterberg, ensayos geotécnicos, contenido en carbonatos totales y yeso, capacidad e intercambio catiónico, agua retenida a 0,033 y 1,5 MPa, mineralogía total y de la fracción arcillosa, micromorfología óptica de suelos y rocas, etc. Así como la construcción de modelos de intercambio gaseoso en especies de líquenes escogidas controlando tanto la luz como el grado de hidratación.
- 3. Métodos experimentales que han permitido a) obtener parámetros de infiltración y producción de sedimentos en parcelas mediante lluvia simulada, b) saber las tasas de meteorización de la marga yesífera.
- 4. Sistemas de información geográfica y de análisis de imágenes. Entre los primeros se incluyen modelos digitales de elevaciones, hasta 1 m de resolución, y atributos topográficos. Entre los segundos, el análisis de imágenes espectrales procedentes de sensores remotos aereotransportados y el análisis de imágenes sobre fotografías y fotomosaicos repetidos periódicamente.
- 5. Construcción de modelos hidrológicos sencillos.



Fig 15.- Aforador tipo H en pleno funcionamiento (foto Lázaro).



Fig 16.- Microperfilómetro láser para medir la pérdida de suelo (foto Solé Benet).

2.4.- Instalaciones

Las instalaciones, algunas de las cuales han cumplido ya su función, están en tres cuencas adyacentes, cada una de las cuales con equipamiento propio, así como de 5 áreas igualmente instrumentadas fuera de esas cuencas:

- A. Cuenca Oeste: clavos de erosión y copas de salpicadura en zonas de costras físicas y biológicas representativas, para un proyecto específico (Downward, 2000).

- B. Cuenca Central: es la cuenca instrumentada cuyos datos se aportan a la RESEL. Consta del siguiente equipamiento:

a) una estación meteorológica en la parte media-alta de la cuenca donde se mide la precipitación y su intensidad, la temperatura y la humedad del aire, la dirección y la velocidad del viento, y la radiación solar global, cuyo instrumental y frecuencia de toma de datos se detallan en la tabla 1.

b) un aforador general de tipo H, otro en la cuenca encajada que forma la cabecera, y dos más en sub-cuencas elementales (Fig 17), todos ellos equipados con medidores de nivel capacitivos, balancines a la salida para medir pequeños caudales, muestreadores de caudal (para sólidos en suspensión y disueltos) y tanques de sedimentación a la salida del aforador (para medir el arrastre de fondo) (tabla 1) (Solé-Benet et al, 2003; Vidal et al, 1996).

c) además se mantienen dos zonas de 10 x 10 m de orientación contrastada con 80 clavos de erosión cada una y otras seis áreas de 2 x 2 m² representativas de las distintas superficies con 6 clavos de erosión cada una.

d) eventualmente se han llevado a cabo campañas de medición de la humedad del suelo en laderas contrastadas y a varias profundidades.

- C. Cuenca Este: se ha llevado a cabo el seguimiento de algunas variables hidrológicas y geomorfológicas para proyectos específicos:

f) seguimiento anual desde 1997 mediante perfilometría láser de una cárcava incipiente (Fig 16).

g) en quince pequeñas parcelas de escorrentía-erosión se llevó a cabo en 1994 una campaña de simulación de lluvia, y se prosiguió la medición periódica de escorrentía y erosión en condiciones de lluvia natural hasta 1997 (Cantón, 1999).

h) dos parcelas de meteorización sobre roca desnuda artificialmente en las cuales se midió la escorrentía y los sedimentos producidos durante cuatro años (Cantón et al, 2001b)

- D. Áreas *L*, *S* y *E*, instaladas en 2004 con motivo del proyecto PECOS. Son conjuntos de instrumentación similar sobre costras vivas en distintas posiciones y con diferente composición florística. Cada una de ellas contiene a) 2 parcelas de escorrentía abiertas de 2.2 m de anchura, con depósitos de decantación de sedimentos que incluye un dispositivo de medida automática del volumen de escorrentía b) unas series de jalones georreferenciados que permiten repetir fotografías sobre la superficie de ambas parcelas c) 3 parcelas de 50 x 50 cm para estudiar el crecimiento de los líquenes mediante seguimiento fotográfico d) una estación micro-meteorológica con registrador automático y sensores de temperatura y radiación PAR (radiación fotosintéticamente activa) sobre la superficie de los líquenes, temperatura y humedad relativa a 15 cm sobre la superficie y humedad del suelo debajo de los líquenes e) un pluviómetro capaz de registrar la distribución temporal de la lluvia. En el área "S" tanto las parcelas de crecimiento como los sensores de microclima están duplicados, para ver posibles diferencias entre *Squamaria* y *Diploschistes*.

Tabla 1.- Datos obtenidos en la estación de El Cautivo

DATOS	DISPONIBILIDAD	TIEMPO y/o resolución	MÉTODOS
Meteorología			
Temperatura del aire	Desde May 1991	5 a 10 min	Semiconductor, telemetría + datalogger
Humedad Relativa	Desde May 1991	5 a 10 min	Sensor capacitivo, telemetría + datalogger
Velocidad del viento	Desde May 1991	5 a 10 min	Anemómetro rotatorio
Dirección del viento	Desde May 1991	10 min	Veleta
Radiación solar total	Desde Jun 1992	10 min	Piranómetro con célula de Si
Intensidad de lluvia	Desde May 1991	1 a 20 seg	Balancines de 0,28 y 0,2 mm, telemetría + data logger
Suelos			
Descripción perfiles	1995	Única	Soil Survey Manual
Clasificación y mapa de suelos	1998	Única	Soil Taxonomy + FAO-UNESCO
Propiedades físicas por horizontes	1996	Única	Diversos
Propiedades químicas por horizontes	1996	Única	Diversos
Micromorfología (superficie y por horizontes)	1995	Única	Impregnación con resina
Infiltración	1994	Única	Simulación de lluvia
Conductividad hidráulica saturada	1998	Única	Método de Porchet
Rugosidad superficial	1992	Única	Perfímetro láser
Hidrología			
Escorrentía y sedimentos en parcelas 0,24 m ²	May 94 – Jun 97	Cada evento	Parcelas de escorrentía cerradas 0.24m ²
Escorrentía y sedimentos en cuencas	Desde Ene 1992	Cada evento	Aforador tipo H
Análisis químico de la lluvia	Sep 91- Dic 2000	Cada evento	Análisis químicos
Humedad del suelo	1996-97 (18 meses)	10 min	Sonda de impedancia SBIB
Geología - Geomorfología			
Meteorización rocas en campo	1995-1998	Bianual	Recoger y pesar sedimentos liberados
Mineralogía componentes rocas	1993	Única	Difracción de rayos X
Mapa geomorfológico 1:5.000	2000	Única	Cartografía de campo
Vegetación			
Inventario	1991 a 1995	Única	
Cobertura anuales, perennes y líquenes		Única	
Topografía			
Mapa topográfico (1:500), digital	Verano 1992	Única	Restitución fotografías aéreas (1:3500)
Modelo digital del terreno a 1 m	Verano 1992	Única	Programa ANUDEM

También se han instalado otros instrumentos que no permanecerán tras el proyecto PECOS: (i) Dos estaciones microclimáticas, con sensores similares a los de las áreas con parcelas, pero sin pluviómetros ni sensores de humedad del suelo; una de ellas incluyendo sensores de presencia de agua líquida en la superficie; (ii) dos estaciones ecofisiológicas, en solana y en umbría, que registran en continuo la actividad fotosintética de un líquen, y simultáneamente sus condiciones microclimáticas (temperatura, humedad del aire y radiación PAR) en el talo.



Fig 17.- Microcuenca elemental (cárcava) instrumentada con aforador H, junto a sistema de telecontrol (foto Solé Benet).

3.- Resultados

Los resultados se han agrupado en cinco apartados: i) evolución del material parental, formación y evolución de suelos, ii) controles geomorfológicos sobre los patrones de distribución espacial de las cubiertas del suelo y la evolución de la vegetación, iii) comportamiento hidrológico, incluyendo patrones de humedad del suelo y de escorrentía, iv) erosión; v) series temporales y eventos representativos.

3.1.- Evolución del material parental, formación y evolución de suelos.

Con a finalidad de conocer cómo se meteoriza la roca madre que da lugar al malpaís, una limolita calco-yesífera (o marga yesífera), se llevaron a cabo ensayos de meteorización in vitro y en el campo, como paso previo para comprender como se forman y evolucionan los suelos. En el laboratorio se sometieron una serie de réplicas de bloques de marga fresca a ciclos de humedecimiento (hasta saturación) - desecación (a 40°C), registrando el peso de los bloques después de cada ciclo y analizando la mineralogía y la química después de cada serie de 5 ciclos. Al aumentar el número de ciclos, la porosidad de las muestras aumenta según una curva potencial muy significativa que indica que unos pocos ciclos son suficientes para fragmentar y disgregar la roca (Fig 18); el yeso y su presión de cristalización son los principales responsables junto con los ciclos humedecimiento-desecación que se producen como consecuencia de las lluvias y períodos secos. En parcelas de meteorización en el campo, se han medido tasas de rebajamiento entre 8 mm año⁻¹ y 0.7 mm año⁻¹ según se retire o no el material meteorizado cada seis meses. Las tasas de rebajamiento están relacionadas significativamente con el número de episodios de lluvia superiores a 3 mm ocurridos en dichos períodos de seis meses, ratificando los resultados del ensayo in vitro (Cantón et al., 2001b).

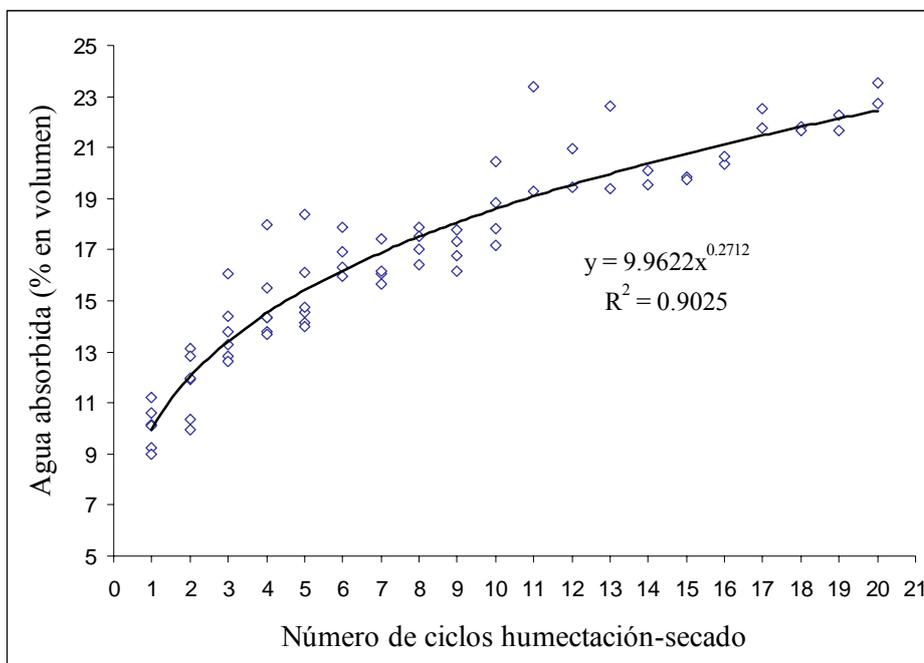


Fig 18.- El agua absorbida por los bloques experimentales sometidos a ciclos de humectación-secado se ajusta a una curva potencial (Cantón et al.,2001).

Estas relativamente elevadas tasas de meteorización, teniendo en cuenta las bajas precipitaciones (que limitan el transporte de sedimentos), originan regolitos de hasta 30 cm de

espesor en las partes altas de las laderas formándose suelos más desarrollados y profundos en los pedimentos aguas abajo. Debido a las fuertes pendientes, y en las pocas ocasiones en que el suelo se satura de agua, se producen movimientos en masa que afectan a la capa meteorizada, generalmente de poco espesor.

El mapa de suelos del área se muestra en la Fig 19. Los tipos de suelos mantienen una relación muy estrecha con la topografía. Así por ejemplo, los *Gypsisoles* (FAO-ISRIC-ISSS, 1998) sólo se forman en los parteaguas donde el área de contribución es muy reducida y la única agua disponible es la de la lluvia, demasiado escasa para eliminar el yeso fuera del perfil. En cambio no se forman *Gypsisoles* en los pedimentos donde, además del agua de lluvia, hay que añadir la de escorrentía procedente de las laderas cubiertas por líquenes situadas aguas arriba, toda la cual ya es suficiente para lavar de sales el perfil de suelo, formándose horizontes cálcicos en horizontes subsuperficiales y *Calcisoles* (FAO-ISRIC-ISSS, 1998). En las laderas desnudas orientadas entre el S y el O, debido a la elevada radiación y a la fuerte pendiente solo pueden formarse *Regosoles epilépticos* y *endolépticos* (FAO-ISRIC-ISSS, 1998) según Cantón et al (2003).

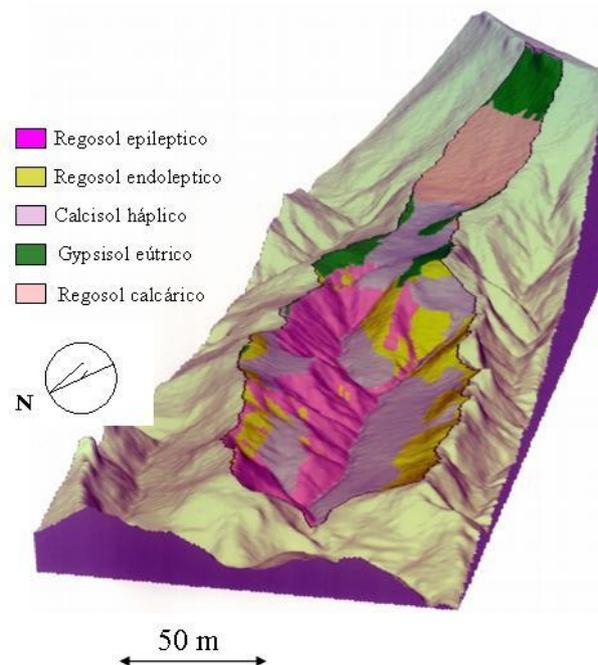


Fig 19.- Mapa de suelos de la cuenca instrumentada.

Para visualizar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en la cuenca instrumentada se representan algunas propiedades siguiendo un transecto longitudinal S-N y otro transversal O-E. En el transecto longitudinal, se observa una disminución del contenido en arena desde la parte alta de la cuenca y un aumento del limo hacia su parte baja (Fig 20), que se explica por dos razones: 1) en la parte baja es menor la influencia de la calcoarenita que constituye la parte más alta y 2) porque durante los procesos de erosión-deposición se transportan las partículas más finas a mayores distancias. También se observa que el contenido en yeso decrece hacia la parte baja de la cuenca sugiriendo una pérdida parcial probablemente por disolución durante el transporte de sedimentos que se acumulan en las partes bajas de la cuenca (Cantón et al., 2003).

En un transecto transversal tipo (NE-SO), que cruza el valle principal, la fracción limo disminuye ladera abajo y la fracción arena procedente de la parte alta de la cuenca aumenta en

los pedimentos (donde la pendiente es menor). Mientras que en las laderas con regolito desnudo y cubiertas de líquenes la tendencia es opuesta ya que estas unidades son más jóvenes, y están sobre laderas más inclinadas con mayor erosión y por lo tanto con características más similares al material parental. En este mismo transecto se observa que yeso y carbonatos presentan patrones de distribución opuestos, con mayor contenido de carbonatos y menor contenido de yeso en los pedimentos, y la tendencia contraria en las partes altas de las laderas. En los perfiles del centro del transecto el carbonato se concentra en los horizontes intermedios constituyendo horizontes cálcicos (Cantón et al, 2003) (Fig 20).

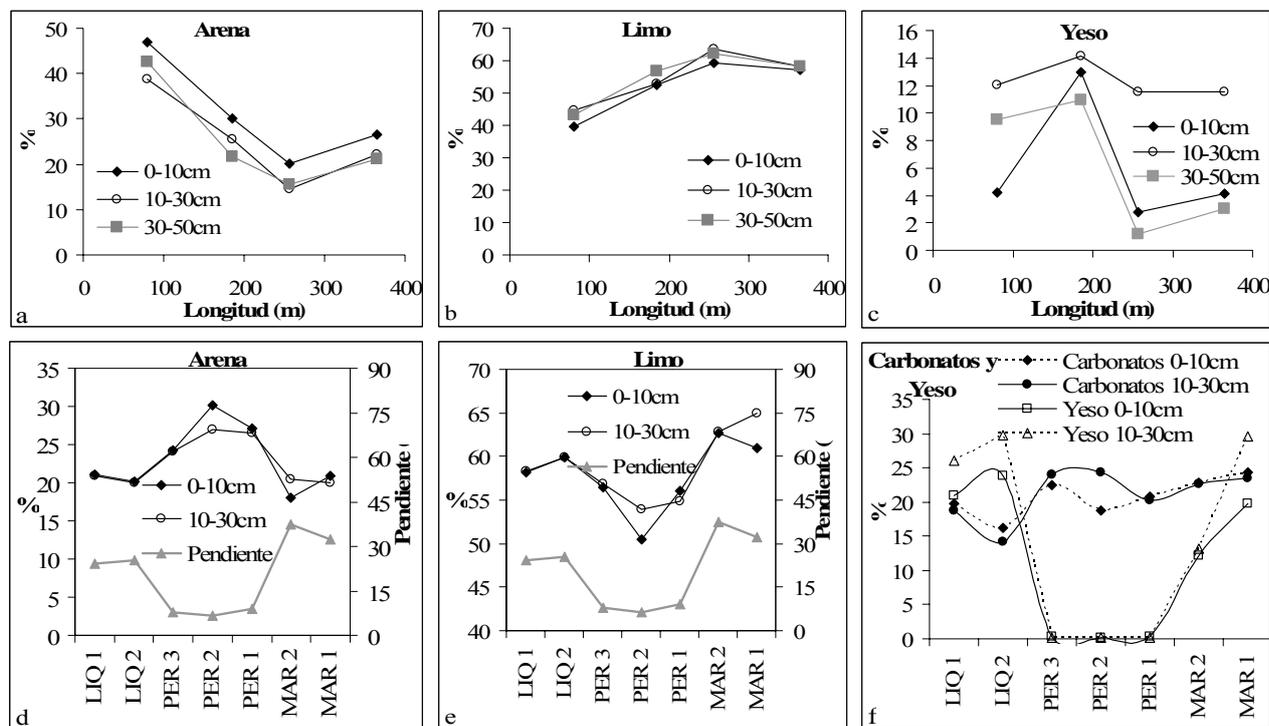


Fig 20.- Transectos texturales (a, b, d, e), yeso (c) y carbonatos (d). Los de la parte superior, longitudinales S-N (de arriba abajo). El cero del eje X es la posición más alta en la cuenca. Los de la parte inferior, transversales O-E (de izquierda a derecha, cruzando el cauce principal). Cada punto del eje X corresponde a un perfil muestreado. LIQ (perfiles bajo líquenes), PER (bajo matorral), MAR (bajo regolito desnudo).

3.2.- Relaciones de la vegetación con la geomorfología

La vegetación presenta notables adaptaciones a la aridez: a) alta proporción de especies anuales, que puede superar el 50%, b) sistemas radicales relativamente grandes en perennes, c) órganos capaces de almacenar agua, (tallos de *Anabasis articulata*, hojas de *Salsola papillosa* o raíces de *Asparagus horridus*), d) hojas diminutas o caedizas (*Salsola genistoides*) o espinas (*Lycium intricatum*) y e) adaptaciones fisiológicas o fenológicas, como la pérdida de todas las partes verdes en verano (*Euzomodendron bourgaeum*, *Helianthemum almeriense*, *Launaea lanifera*, etc) (Merlo et al., 2004).

El análisis de las variables ambientales muestra diversidad de microhábitats como consecuencia de la compleja geomorfología. Las geformas son diferentes en términos de coberturas de líquenes, anuales o perennes y controlan la vegetación a través de una serie de variables asociadas a ellas: a) topo-geomorfológicas (nivel de encajamiento, pendiente, orientación, posición en la ladera, profundidad del regolito, cobertura de piedras en superficie); b) fisicoquímica del suelo (pH, conductividad eléctrica, carbonato cálcico,

carbono orgánico, yeso); c) erosión (sobre todo movimientos en masa y escorrentía concentrada). La pendiente, orientación y posición en la ladera afectan a la disponibilidad de agua. El nivel de encajamiento con frecuencia está asociado a la antigüedad de estabilización de la superficie (Lázaro et al, 2000). Alexander et al (1994) y Lázaro (1995) mostraron que la edad relativa de las superficies es uno de los principales factores que afectan a la vegetación. Con el incremento de edad aumenta la cobertura total, disminuye la proporción de halofitos, aumentan primero las anuales y las perennes después, y aumenta la complejidad estructural de la vegetación. A estos cambios subyace la diferenciación del suelo.

La poca frecuencia de costras de líquenes terrícolas en orientación Sur se debe sobre todo a la erosión: en lugares estables son prácticamente constantes y, si se incluye la "costra indiferenciada", la cobertura de esta costra en solanas no es distinta a la de las umbrías (Lázaro et al, 2000), donde se desarrollan más los líquenes diferenciados porque tardan más en secarse y dura más tiempo la fotosíntesis.

En solanas y pedimentos expuestos, estables, se instalan algunas anuales y un tomillar muy abierto de *Anabasis articulata* y *Salsola genistoides* sobre costra parda de líquenes en la que domina una costra viva indiferenciada, y las especies *Catapyrenium lachneum*, *Endocarpon pusillum*, *Collema* sps., entre otras. En niveles antiguos las umbrías están dominadas por el esparto (*Stipa tenacísima*), con líquenes blancos como *Lepraria crassisima*, *Squamarina carthilaginea* y *Toninia coerulea* en los claros.

En niveles medios o recientes las solanas suelen estar erosionadas y casi sin vegetación, excepto individuos muy esparcidos de *Salsola genistoides* y las umbrías pueden ser de dos clases: a) de perfil recto, con cobertura baja o moderada de por arbustos pequeños y poco densos (*Helianthemum almeriense*, *Euzomodendron bougeanum*), líquenes similares a los del espartal ocupan la mayor superficie porque reciben bastante luz, y anuales muy escasas; b) cóncavas, en donde las partes inferiores son sumideros de escorrentía, materiales y nutrientes, y las superiores actúa de fuente. En la base aparecen, además de *Helianthemum almeriense*, camefitos más densos (*Hamada articulata*, *Artemisia barrelieri*, *Stipa tenacísima*, etc.) a menudo alternando con manchas de anuales (principalmente *Stipa capensis*); en la parte superior, líquenes como *Squamarina lentigera*, *Diploschistes diacapsis* y *Buellia zoharyi*, que no pueden competir por la luz con las plantas vasculares, pero soportan bien el suelo menos desarrollado y la menor disponibilidad de agua, la cual limita a las plantas vasculares. La zona media de estas laderas suele ser un amplio ecotono con diversas mezclas de biotipos (Lázaro, 1995).

La distribución de las especies vegetales en relación con la geomorfología muestra dos estrategias, con diferente efecto sobre el medio:

a) Resistentes (*R*), especializadas en soportar las condiciones generadas por la erosión y sin efecto apreciable en la evolución del suelo porque su cobertura es muy baja y variable. Son típicas y casi siempre las únicas en las laderas erosionadas y continuamente rejuvenecidas en las que la sucesión no progresa, con substratos que presentan concentraciones altas de yeso, cloruros y carbonato cálcico, muy poca materia orgánica y pH menor de 7 (*Salsola genistoides* y *Moricandia foetida*).

b) Edificadoras (*E*), que requieren previamente una baja tasa de erosión, pero luego contribuyen a la estabilización y modifican el medio progresivamente a su favor. Crecen en pedimentos o laderas más suaves, con suelo más desarrollado y con baja concentración de yeso y cloruros, más materia orgánica y pH mayor de 7 (*Stipa capensis*, *Plantago ovata* (anuales), *Stipa tenacissima*, *Hamada articulata*, etc). Las comunidades dominadas por

estas especies incluyen una larga representación de la flora local y regional (Lázaro, 1995; Gallart et al, 2002).

La multiplicidad de hábitats y su asociación con la geomorfología configuran un patrón espacial de vegetación. En las laderas más erosionadas, generalmente con orientaciones de Sur a Oeste, más cortas, con mayor pendiente y perfil a menudo recto, apenas hay vegetación. En las laderas opuestas, más largas, con menor pendiente, regolito más profundo, orientadas del Norte al Este y con frecuencia de perfil cóncavo, la parte superior y las divisorias están cubiertas de líquenes y los pedimentos y la mitad inferior de un mosaico de vivaces y anuales. Pendientes de más de 40° suelen ser limitantes tanto para los líquenes como para las plantas vasculares (Lázaro, 1995; Lázaro et al, 2000). Este patrón también es señalado por Cantón et al (2004a), añadiendo que las vivaces están algo más asociadas que las anuales a posiciones a favor de la escorrentía. Y sólo se encuentra en cuencas asimétricas por migración lateral del cauce. Las diferencias entre laderas en las cuencas con patrón bien desarrollado no pueden explicarse sólo por la orientación; ésta dispararía procesos retroalimentados divergentes en ambas laderas. La solana se coloniza con más lentitud y alcanza cobertura algo inferior, por lo que el cauce erosiona su base más que la de la umbría, lo cual aumenta la pendiente y retroalimenta el proceso (Lázaro, 1995).

Los anteriores resultados sobre el patrón de vegetación se basan sobre todo en la asociación entre datos semicuantitativos de frecuencias y coberturas de especies con variables topográficas y de fisicoquímica suelo. Pero el malpaís de Tabernas muestra gran variabilidad en la cubierta del suelo, a escalas desde metros a hectómetros, tanto por los mosaicos de vegetación como porque las áreas no vegetadas pueden tener o no costra mineral, clastos en superficie, depósitos de limos o bien el regolito margoso directamente expuesto. Y la distribución espacial de las clases de cubierta o tipos de superficies presenta patrones. Cantón et al (2004a) comprobaron que la distribución espacial de los tipos de cubiertas está efectiva y cuantitativamente controlada por la topografía. Además hay relación entre la distribución espacial de las geoformas resultantes de la regionalización (generada mediante una clasificación no jerárquica de las variables topográficas) y el patrón espacial de las cubiertas del suelo. Las cubiertas del suelo se organizan a lo largo de gradientes topográficos, de forma que por ejemplo las superficies vegetadas son más abundantes a medida que disminuye la pendiente, aumenta el área de contribución y la concavidad y disminuye el potencial para el transporte de sedimentos. Las superficies no vegetadas muestran la tendencia contraria y las superficies en las que domina la cubierta liquénica están asociadas a condiciones intermedias. La distribución espacial de los tipos de cubiertas presenta relaciones más fuertes con atributos topográficos locales como la pendiente, la altitud o la orientación que con atributos topográficos relacionados con los procesos de transferencia de agua y sedimentos (tales como el área de contribución, el índice de humedad del suelo o el índice del potencial para transporte de sedimentos) lo que se explica porque en este paisaje (como en muchas zonas áridas) la escorrentía es muy escasa, y los flujos de escorrentía discontinuos, muy heterogéneos y normalmente recorren distancias más cortas que el total de la ladera. Globalmente, las superficies erosionadas ocupan un 33% de la superficie total, las costras biológicas un 32% y las áreas con vegetación vascular un 35% (Cantón et al, 2004a). Dentro de esta última clase, la cobertura no suele pasar del 40% salvo para áreas de pocos metros cuadrados (Lázaro et al, 2000).

3.3.- Comportamiento hidrológico de las superficies

a) Comportamiento hidrológico a escalas de parcela y ladera.

Está ampliamente aceptado que las condiciones de la superficie del suelo, como cubierta vegetal, de piedras, o porcentaje de la superficie cubierta por costras desempeña un papel

fundamental en la generación de escorrentía y en la erosión. Se distinguieron 6 tipos principales de superficies del suelo (que denominamos teselas) que integran el área de estudio en función de su cobertura vegetal, sus características edáficas y topográficas y comportamiento hidrológico y erosivo. Se estudió el comportamiento hidrológico de las diferentes teselas mediante simulaciones de lluvia y a través del seguimiento de microparcels ($0,24m^2$) en condiciones de lluvia natural durante 3 años hidrológicos (Cantón et al., 2001a y 2002). Se comprobó que las teselas presentaban comportamientos hidrológicos y erosivos diferenciados. Las teselas vegetadas tenían mayor capacidad de infiltración. Las teselas con depósitos de limos encostrados y cubiertas de líquenes degradados presentaban un potencial medio-alto para producir escorrentía. Los coeficientes de escorrentía más elevados se asociaban a 2 tipos de teselas muy diferentes entre si: la completamente desprovista de cubierta vegetal y aquella en la que la baja permeabilidad de la cubierta criptogámica es responsable de altas tasas de escorrentía (Fig 21) (Solé et al,1997; Cantón, 1999).

A escala de ladera las interacciones de la vegetación con la escorrentía y el flujo de sedimentos son complejas y dependen de la densidad de la vegetación y de su estructura espacial. Un incremento de la densidad causa un decremento exponencial de la escorrentía y la salida de sedimentos. El efecto de la estructura espacial es dinámico y especie-específico Puigdefábregas & Sánchez (1996).

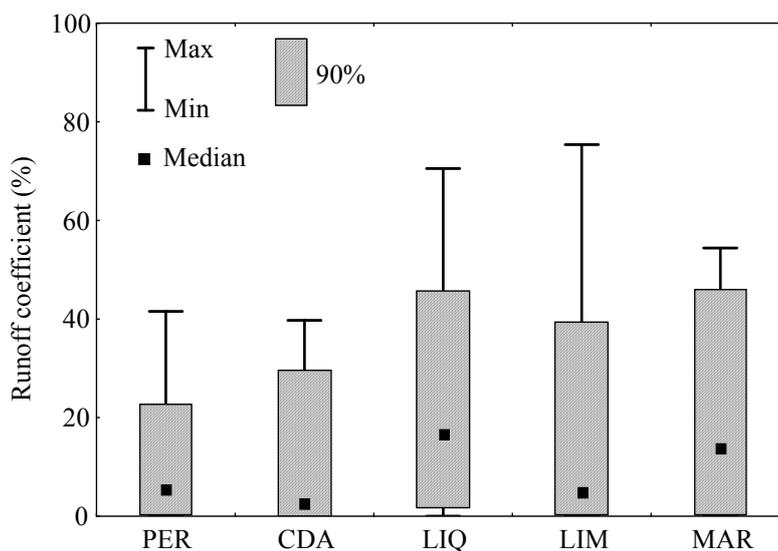


Fig 21.- Coeficientes de escorrentía para cinco de las principales superficies.

b) Comportamiento hidrológico a escalas de microcuena.

Los resultados de los aforadores muestran (Cantón et al, 2001a) que la escorrentía es diferente en las cuatro microcuenas, lo que se explica por el tamaño de las mismas y por las proporciones en cada una de los distintos tipos de superficies. Las mayores tasas de escorrentía se registran en las microcuenas 2 y 3, desprovistas de vegetación. La microcuena 4, la más vegetada, muestra las menores tasas (a menudo inferiores al 5%). Y la microcuena 1, formada por un mosaico de los 6 tipos de superficies, presenta tasas intermedias (Fig 22).

En la Fig 23 se presenta un evento de escorrentía típico durante un lluvia de 21 mm caída en una hora y media (intensidad promedio $14,5 \text{ mm h}^{-1}$): un primer pulso con una I_5' de 31 mm h^{-1} no es capaz de producir escorrentía puesto que solo han caído 5.5 mm, pero 5 minutos más tarde y cuando han caído 7.5 mm desde el principio del evento, y con una I_5' de 24 mm h^{-1} , se inicia la escorrentía. Esta alcanza su pico máximo gracias a un pulso de precipitación con una

I_5 de 63 mm h^{-1} seguido de un segundo pico de I_5 de 34 mm h^{-1} , originando los dos picos de escorrentía que se observan en la figura.

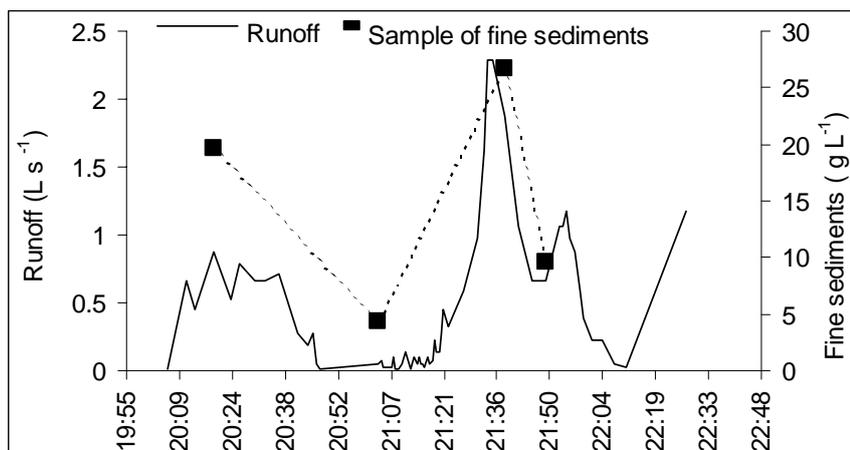


Fig 22.- Episodio típico de lluvia y escorrentía (valores acumulados) en las 4 cuencas de El Cautivo en Octubre de 1993.

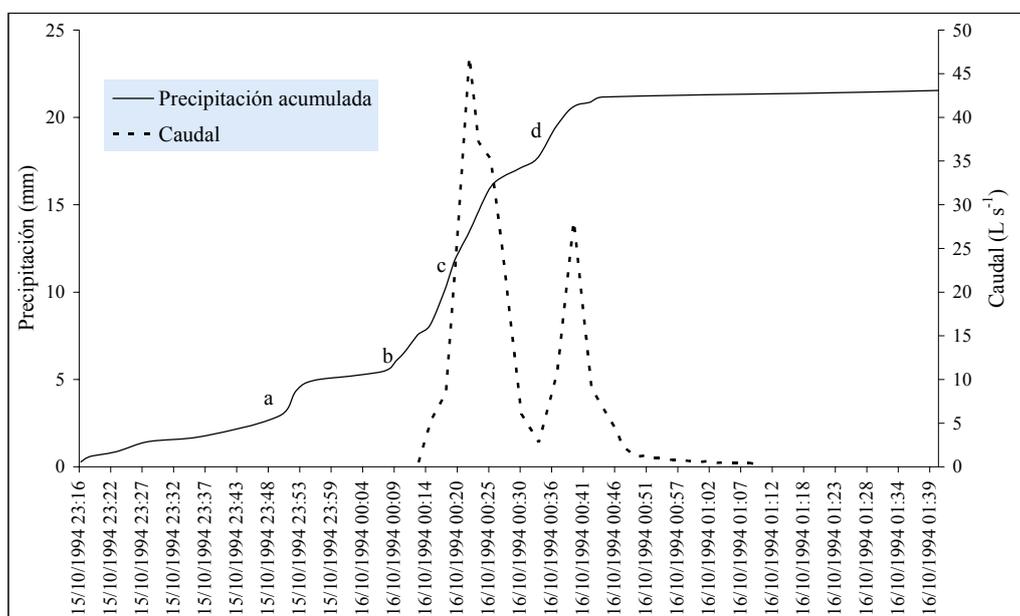


Fig 23.- Hidrograma de escorrentía del evento ocurrido el 16-10-1994 en el cauce principal de la cuenca, junto con la precipitación acumulada en la que se muestran los tramos de máxima intensidad (I_{5min}): a = 31 mm h^{-1} , b = 24 mm h^{-1} , c = 63 mm h^{-1} , d = 34 mm h^{-1} .

Para identificar las áreas fuente de escorrentía y su contribución a la escorrentía total y para analizar los flujos de escorrentía entre las teselas se construyó un modelo de infiltración-escorrentía espacialmente distribuido que simulaba la escorrentía de una microcuenca a escala de evento de precipitación a partir de las tasas de infiltración de las teselas que la integran. Se utilizó la ecuación de infiltración de Horton y se calculó la escorrentía como la diferencia entre la intensidad de la lluvia y la tasa de infiltración en cada intervalo de tiempo (2 minutos). Los parámetros de la ecuación de Horton se determinaron a escala de parcela mediante simulaciones de lluvia (Solé-Benet et al, 1997). Al final de cada intervalo de tiempo el exceso de lluvia simulado en cada celda es transferido aguas abajo, distribuyéndose sobre el mapa de dirección local de drenaje (obtenido a partir del modelo digital de elevaciones con 1 m de resolución). Parte de esta escorrentía puede infiltrarse en celdas aguas abajo o discurrir

por los cauces hasta el aforo. El modelo está integrado en el Sistema de Información Geográfica PC-RASTER. Para validarlo, se usaron las escorrentías bajo condiciones de lluvia natural en pequeñas parcelas ($0,24 \text{ m}^2$) y en las microcuencas (Cantón et al, 2002). El modelo se ajusta bastante bien para eventos sencillos con hidrogramas con uno o dos picos y demuestra que no todo el área contribuye a la escorrentía total de la cuenca, si no que existen algunas teselas como las cubiertas por perennes y anuales donde normalmente no se genera escorrentía. Las principales zonas de contribución a la escorrentía la constituyen la marga desnuda y los limos encostrados. En las teselas con líquenes sólo se genera escorrentía en determinados momentos del evento y no en todos los eventos. En los espartales no suele generarse escorrentía excepto en eventos extremos. Además la escorrentía que se genera en ellos y buena parte de la generada en los líquenes se infiltra en los pedimentos aguas abajo. Solo en algunas zonas de convergencia de agua la escorrentía procedente de una zona de líquenes bastante extensa puede exceder la capacidad de infiltración del pedimento y se dirige hacia los cauces siguiendo flujos preferentes (Cantón et al, 2002). La Fig 24 muestra el hidrograma real y simulado para el evento del 19/02/92 (uno de los eventos más intensos registrados) y los mapas con las tasas de escorrentía en cada una de las celdas de la microcuenca ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) en los momentos indicados del hidrograma. La respuesta hidrológica de este paisaje está controlada aparte de por la magnitud e intensidad de la de precipitación, por los tipos de superficies y por su organización espacial (Cantón et al, 2002).

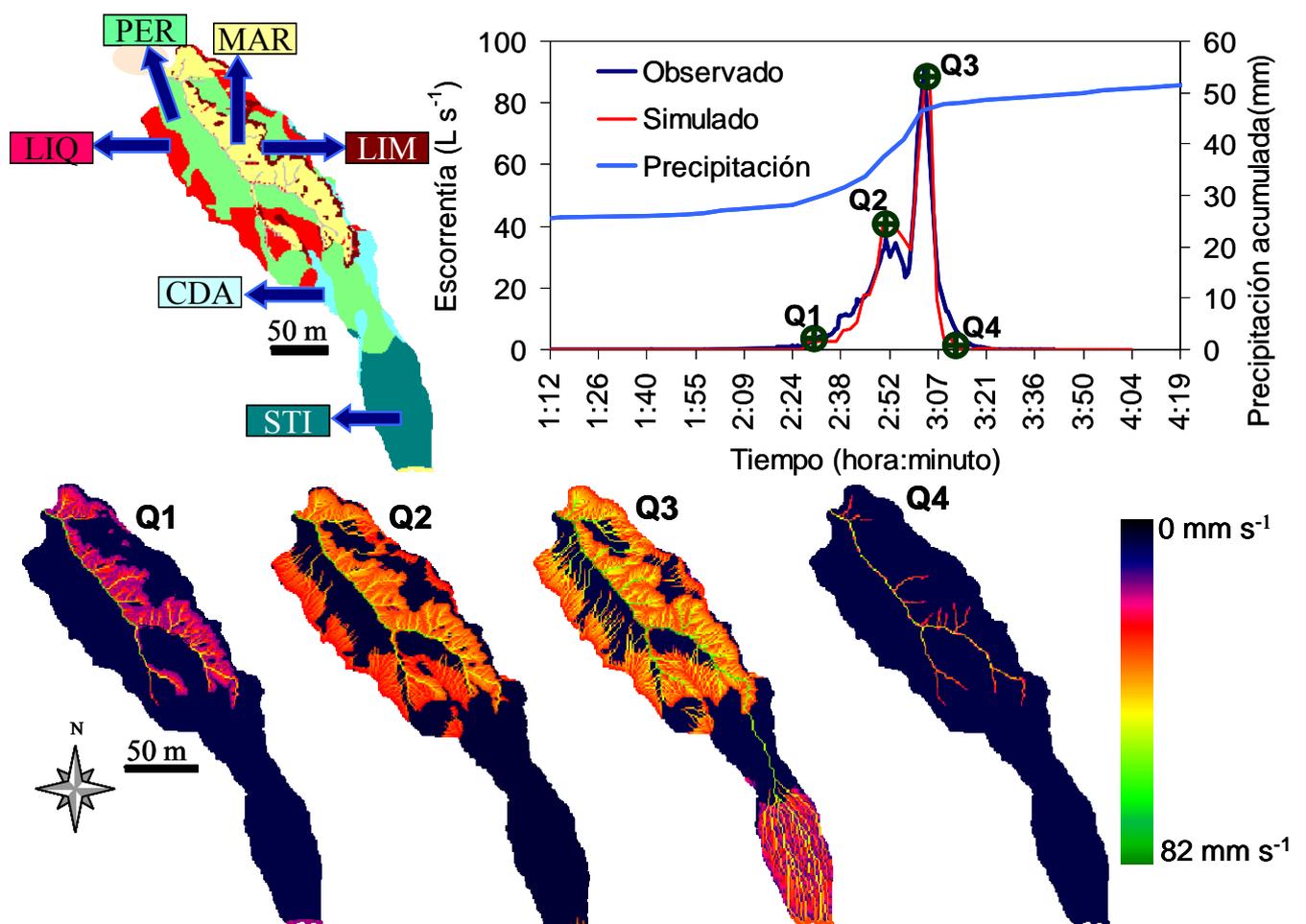


Fig 24.- Parte superior izquierda: mapa de los tipos de superficies del suelo con su red de drenaje. Parte superior derecha: hidrogramas modelado y real del evento del 20 de Febrero de 1992. Parte inferior: mapas de los flujos de escorrentía simulada en los momentos (Q1, Q2, Q4 y Q4) indicados en el hidrograma (Cantón et al., 2002).

c) *Patrones espaciales de la humedad del suelo y su influencia en la hidrología a nivel de pequeña cuenca.*

La evolución de la humedad del suelo presenta una elevada variabilidad en pequeñas áreas en diferentes escalas temporales, relacionada con la diferente cobertura y las propiedades del suelo. Los regimenes más áridos se producen en las superficies desnudas sin desarrollo edáfico. Donde el suelo es más profundo y está cubierto por plantas, la disponibilidad de agua es obviamente mayor. Sin embargo, bajo líquenes, el contenido de agua en verano es mayor y se mantiene mayor tiempo que bajo otras superficies, aunque las propiedades del suelo subyacente no favorezcan la retención hídrica (Fig 25). Los líquenes tienen pues un papel esencial en la conservación del agua en el suelo; particularmente los del género *Diploschistes*, muy abundantes en la zona, que presentan los espacios intercelulares del córtex superior rellenos con pequeños cristales de oxalato cálcico, formando junto con las células del cortex una capa continua que reduce la evaporación cuando el liquen está seco; cuando llueve o la humedad ambiental es elevada los cristales pueden disolverse; poco después de la lluvia estas superficies con líquenes se secan rápidamente. Por otro lado los líquenes tienen un papel hidrológico ambiguo según sea la intensidad de la lluvia: a bajas intensidades favorecen la infiltración y aumentan el contenido hídrico, mientras que a elevadas intensidades, favorecen la escorrentía (Cantón et al, 2004b).

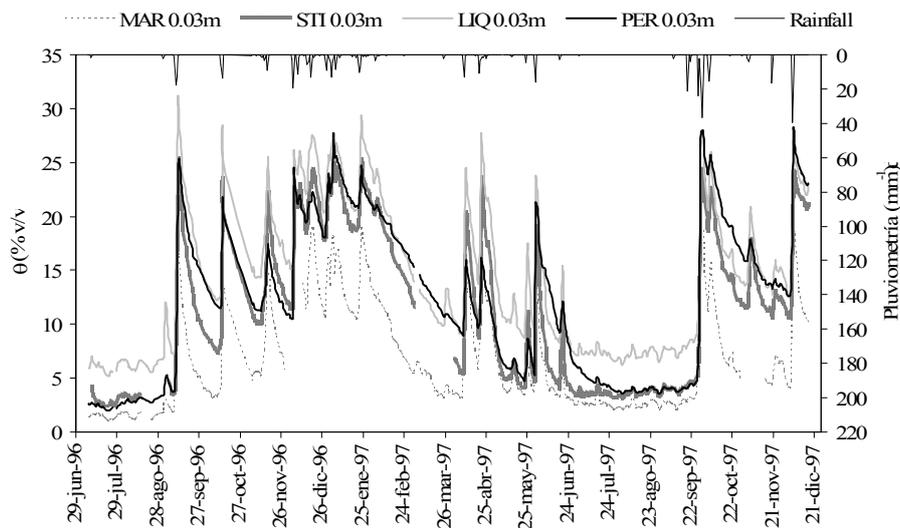


Fig 25.- Evolución de la humedad del suelo bajo diferentes tipos de superficie: MAR = marga desnuda, STI = esparto, LIQ = líquenes, PER = pedimento, entre Julio de 1996 y Diciembre de 1997 (Cantón et al., 2004b).

La humedad se mantiene más elevada bajo las plantas que en los claros, tanto a 3cm como a 15cm de profundidad, y es mayor en la mayor profundidad. Bajo las plantas existe un retardo en el aumento de la humedad cuando llueve respecto a los claros, pero a partir de cierto momento (cuando han caído en torno a 6mm) se produce un aumento muy rápido bajo la planta. Esto se explica por la interceptación que ejerce la copa, la cual, una vez saturada, produce sin embargo un efecto de embudo.

Por último, no se encuentran relaciones entre las humedades antecedentes y los coeficientes de escorrentía. Sin embargo, como el coeficiente de escorrentía depende de diversos factores, podría ser que el efecto de la humedad antecedente quedase enmascarado, porque un análisis a escala temporal muy detallada permite comprobar que en eventos con múltiples picos de lluvia, cuando el suelo está casi saturado, unos pocos milímetros del lluvia son suficientes para generar de nuevo escorrentía (Fig 26). El efecto de la humedad antecedente en estos

casos es difícil de establecer y podría explicarse porque la propia humedad antecedente afecta a la tasa de infiltración o porque el suelo se ha encostrado y disminuye la infiltración.

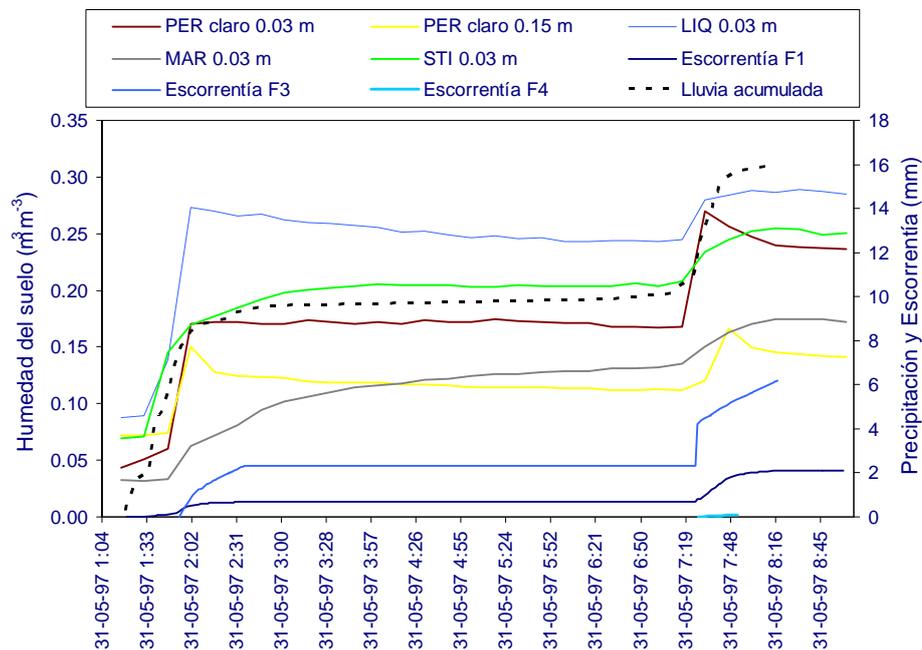


Fig 26.- Evolución de la humedad del suelo bajo diferentes tipos de superficie (PER: pedimento; LIQ: ladera con líquenes; MAR, regolito margoso desnudo; STI, parte alta de la cuenca cubierta de esparto) junto con los hidrogramas de la cuenca principal (F1) y dos sub-cuencas (F3 y F4) y la lluvia acumulada en el evento del 31-5-1997 (Cantón et al., 2004b).

3.4.- Erosión

En este apartado se presentan las tasas de erosión registradas a diferentes escalas espaciales (parcela, ladera, pequeña cuenca) y temporales (evento, período estacional o irregular, anual).

- a escala de parcela

La escala de mayor detalle está representada por las *copas de salpicadura* que reciben sedimentos producidos por un área aproximadamente similar a la de las *copas*, es decir unos 100 cm². Durante el año de máxima erosión las costras físicas se erosionan mucho más (38.36 ± 3.3 g, lo que podría equivaler a 3.836 g m⁻² ó 2,8 mm) que las criptogámicas indiferenciadas (16 ± 1 g, es decir 1.693 g m⁻² ó 1,23 mm) y éstas que las líquénicas (3.38 ± 0.5 g, o bien 338 g m⁻² ó 0,22 mm). La misma secuencia se produce durante el año de mínima erosión, con valores muy inferiores: a) $9,31$ g (ó 931 g m⁻² ó 0,67 mm) en las costras físicas, b) $3,38$ g ó 338 g m⁻² ó 0,24 mm en las costas indiferenciadas y c) $1,48$ g ó 148 g m⁻² ó 0,11 mm en las costras líquénicas. La máxima recogida de sedimentos en un solo período y en un solo punto fue de $25,86$ g (es decir, 2.586 g m⁻² ó 1,88 mm) para una precipitación total de 137 mm, el 85% de la cual se produjo durante 20 días en el mes de Septiembre de 1997. Las tasas por unidad de superficie proporcionadas por las copas de salpicadura en realidad solo deberían servir para comparar diferentes tipos de superficie entre sí y no tasas procedentes de áreas de captación con distinta superficie.

En orden de tamaño, siguen las mini-parcelas de erosión de 0,24 m² que, por el hecho de estar cerradas, es decir, aisladas del resto de la ladera, registran tasas de escorrentía limitadas y por lo tanto una producción de sedimentos un orden de magnitud inferior a la registras por las copas de salpicadura: entre $1,6$ y 32 g m⁻² (0,001 mm y 0,023 mm) en laderas orientadas al N

y E, cubiertas por líquenes o plantas superiores, y entre 161 y 397 g m⁻² (0,117 mm y 0,239 mm) en laderas orientadas al S y O, desnudas o con líquenes degradados. Dichos datos son del mismo orden de magnitud que los producidos por una lluvia una simulada (55 mm h⁻¹ durante 30 minutos, lo que puede considerarse un evento extremo):

Los diferentes tipos de superficies también están siendo monitorizadas mediante clavos de erosión dispuestos en parcelas abiertas (2 x 2m). Las tasas medidas, si bien siguen el mismo orden que las tasas medidas con copas y microparcels en los mismos tipos de superficie, son dos ordenes de magnitud superiores a las microparcels y un orden de magnitud superior a las copas de salpicadura. Esto se debe a que a) los clavos registran erosión producida conjuntamente por la mayoría de los procesos (salpicadura, escorrentía concentrada, escorrentía difusa, pequeños movimientos en masa) en lugar de sólo por salpicadura como las copas y, b) la escorrentía actúa sobre longitudes de ladera mucho mayores que en las parcelas y además se trata de áreas abiertas. La mayor tasa de rebajamiento anual la registró la cuerda desnuda con 15,19 mm (20810 g m⁻²) mientras que la mayor tasa anual de deposición la registró una parcela orientada al N con una cubierta parcial de líquenes degradados, con 11,2 mm (15344 g/m⁻²).

- a escala de ladera

A escala de ladera, los 81 clavos de erosión proporcionan datos promedio, después de 10 años, relativamente similares a los de las parcelas, es decir: 2,67 mm año⁻¹ (3.567,9 g/m⁻²) en la ladera orientada al SO y 1,19 mm año⁻¹ (1.630,3 g/m⁻²) en la orientada al NE. Sin embargo, por el hecho de haberse monitorizado una superficie mucho mayor, los máximos y mínimos son superiores a los alcanzados en las parcelas: así en un surco incipiente, se alcanzó un rebajamiento anual de 87 mm (ó 119.190 g/m⁻² si bien este dato solo se proporciona con finalidades comparativas pues se refiere al rebajamiento producido en el fondo de un surco).

El seguimiento durante 5 años mediante perfilometría láser de una ladera desnuda orientada al SO en la que se estaba desarrollando una cárcava, presenta valores anuales promedio de rebajamiento de 1,27 mm (g/m⁻²), 3,23 mm (g/m⁻²) y 2,01 mm (g/m⁻²) en el transecto alto, medio y bajo de la ladera. Sin embargo estos valores promedio están fuertemente influidos por máximos de hasta 88 mm (120.560 g/m⁻²) en el fondo del canal de desagüe mientras que el resto de la ladera permanece invariable. Este valor es similar al máximo registrado con los clavos de erosión, como se indica en el párrafo anterior.

- a escala de cuenca

Desde 1991, se han registrado 83 eventos de escorrentía y prácticamente en todos ellos se recogieron sedimentos en alguna e las cuencas. La excepción a esta regla es la subcuenca de la parte alta, F4, que, por estar en gran parte cubierta de vegetación, reduce considerablemente la producción de sedimentos.

En general se comprueba que la producción de sedimentos es directamente proporcional a la escorrentía producida durante los eventos (Fig 27). Sin embargo, se registran excepciones, cuando lluvias moderadas no muy intensas tras largos períodos con lluvias muy pequeñas no generadoras de escorrentía pero durante los cuales los abundantes ciclos humedad-desección han generado gran cantidad de sedimentos que son evacuados por escorrentías moderadas. A modo de ejemplo de ambos casos, se describen algunos eventos:

El 7-11-1992, una lluvia de 83 mm que una duración de 33,5 horas y una intensidad máxima en cinco minutos (I₅) de 35 mm h⁻¹ y un coeficiente de escorrentía del 15%, produjo 375 gm⁻², es decir una tasa de rebajamiento de 0,27 mm en la cuenca principal.

El 10-10-2001, una lluvia de 16,3 mm en 2,26 h con una I₅ máxima de 70 mm h⁻¹ provocó los siguientes caudales máximos: 0,93 L s⁻¹ en F1, 0,03 L s⁻¹ en F3 y 1,15 L s⁻¹ en F4, que

arrastraron en total los siguientes sedimentos: 54,5 g m⁻² (0,04 mm) en F1, 318 g m⁻² (0,23 mm) en F2, 512 g m⁻² (0,37 mm) en F3 y 6 g m⁻² (0,004 mm) en F4.

El 30-6-2002, una lluvia de 22 mm en menos de 2 h con una I₅ de 100 mm h⁻¹ dio los siguientes caudales: 121 L s⁻¹ en F1, 4,3 L s⁻¹ en F2, 0,93 L s⁻¹ en F3 y 5 L s⁻¹ en F4. Los sedimentos correspondientes fueron: 159 g m⁻² (0,11 mm) en F1, 1.024 g m⁻² (0,75 mm) en F3 y 40 g m⁻² (0,03 mm) en F4.

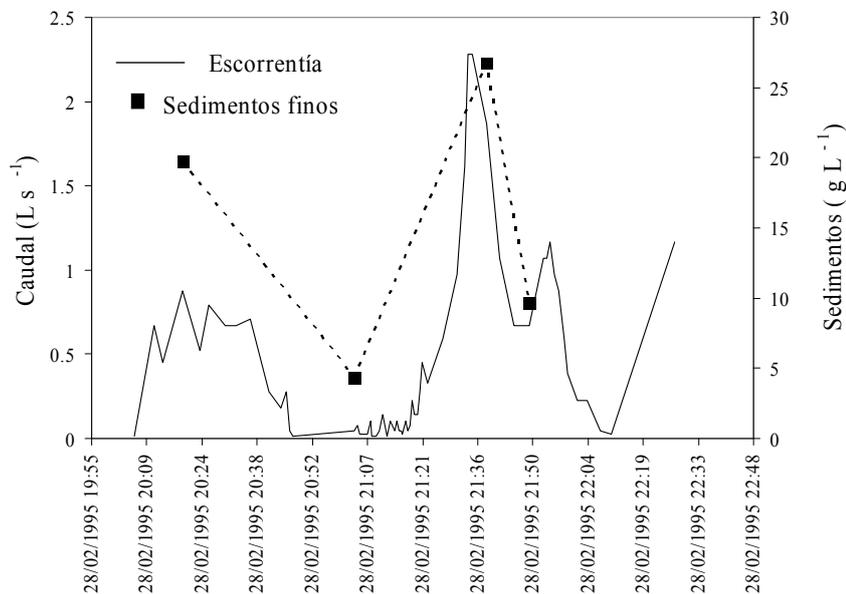


Fig 27.- Hidrograma y sedimentograma (partículas < 1 mm) durante el episodio del 1-02-1993 en la cuenca 1.

En la tabla 2 se comparan las tasas de erosión producidas en las cuatro microcuencas durante eventos representativos de un año seco y un año lluvioso. Se observa que la relación entre la pluviometría y los sedimentos movilizados es compleja. Además de cierta relación con el volumen de la precipitación, la producción de sedimentos es afectada especialmente por la distribución temporal de la misma, tanto a escala de minutos (intensidad de la lluvia) como a escala diaria (humedad antecedente) y a escala mensual e incluso anual (preparación de sedimentos a lo largo de los meses previos). En la cuenca principal, la tasa anual registrada en 2003-04, una de las mayores de todo el período de seguimiento, fue de 1647,37 g m⁻², es decir, 16,5 t ha⁻¹. La tasa anual promedio de período de seguimiento es un orden de magnitud inferior a dicha cifra, es decir, entre 1 y 2 t ha⁻¹.

3.5.- Series temporales, eventos representativos y relaciones significativas.

Durante los 14 años hidrológicos entre 1991-92 y 2004-05 se han producido 83 eventos de escorrentía, lo que corresponde al 11% de los días con lluvia, al 33% considerando los días con precipitación superior a 3 mm y al 80% de los días con precipitación superior a 10 mm (Tabla 3). Este último umbral es el más frecuente para producir escorrentía en la cuenca. Dichas precipitaciones tienen una frecuencia del 14% en el total de precipitaciones. Sin embargo, en alguna ocasión y cuando las intensidades máximas son inferiores a los 5 mm h⁻¹, precipitaciones de hasta 15 mm no han producido escorrentía.

Tabla 2.- Producción de sedimentos (g m^{-1}) registrada para las microcuencas F1, F2 y F3 durante los años hidrológicos 2002-2003 (seco) y 2003-2004 (húmedo). * indica que en dichos eventos los sedimentos en suspensión no se registraron. n.d. = no disponible.

	Evento	P (mm)	max I_5 (mm h^{-1})	F1	F3	F4
2002-03	14/11/02	23.8	19.0	0.03*	417.12	0.17*
	10/01/03	15.4	7.0	0.91*	0	0
	25/02/03	14.0	21.0	0.26*	16.13	0.09
	22/04/03	7.6	41.9	0.006	0	0
	annual rate	135.9	41.9	>1.26*	433.25	0.26
2003-04	07/10/03	17.9	80.3	2.55	2,635.58	n.d.
	18/11/03	62.4	14	92.20	23,063.27	65.47
	23/11/03	19.3	31.4	396.42	1,042.81	11.6
	09/12/03	25.6	21.0	14.51	0	25.58
	28/03/04	31.0	10.5	80.63	156.42	20.33
	09/04/04	56.7	31.4	961.97	208.56	160.70
	15/04/04	20.4	7.0	28.15	8.06	0.17*
	02/05/04	7.8	28.0	23.95	12.9	5.87*
	13/06/04	9.6	63.0	46.99	270.7	12.85
	annual rate	347.9	80.3	1,647.37	27,398.3	302.57

Tabla 3.- Para cada año del período monitorizado: días con precipitación (P), días con P igual o superior a 3 mm y a 10 mm, P máxima en 24 horas y días con escorrentía.

año	días con P	días P > 3 mm	días P > 10 mm	max P_{24h}	días con escorrentía
91-92	31	17	11	66.62	7
92-93	43	17	7	53.65	4
93-94	40	13	6	65.54	4
94-95	45	14	11	24.94	6
95-96	53	18	3	15.37	5
96-97	70	24	11	19.42	6
97-98	54	18	9	39.42	5
98-99	48	14	6	37.25	6
99-00	72	24	10	17.17	6
00-01	40	16	3	53.31	4
01-02	80	26	7	66.62	8
02-03	46	9	4	31.7	6
03-04	74	25	9	39	11
04-05	55	14	7	17.7	5
total días	751	249	104		83
promedio anual	54	18	7		6
año con max	80	26	11	66.62	11
año con min	31	9	3	17.7	4

El papel del resto de precipitaciones, el 86%, no es despreciable ya que los sucesivos ciclos de humectación-desección son esenciales para la meteorización de la roca madre, que proporciona de este modo sedimentos limosos fáciles de transportar. Por otra parte esos numerosos eventos débiles, aunque de poco provecho para la vegetación vascular, no son erosivos y posibilitan la fotosíntesis de los líquenes, cuyas costras han podido así extenderse hasta ocupar casi todos los espacios no erosionados entre plantas, contribuyendo a su estabilidad.

En la tabla 4 se indica para un período representativo de 5 años las características de las precipitaciones y las escorrentías producidas en la cuenca principal.

Tabla 4.- Eventos de escorrentía registrados en la cuenca principal de El Cautivo entre 1992 y 1997.

FECHA EVENTO	Precipitación (mm)	I ₅ promedio (mm/h)	I ₅ máximo (mm/h)	Escorrentía (mm)	Coef. Escorr. (%)
28/01/1992	141.25	4.01	15.93	10.32	7.31
19/02/1992	52.27	1.89	55.9	3.6	6.9
31/03/1992	14.24	2.68	16.85	0.02	0.17
03/05/1992	31.92	1.42	8.33	0.47	1.48
07/05/1992	10.9	n.d.	n.d.	0.001	0.01
13/06/1992	40.61	2.07	13.39	0.54	1.33
21/06/1992	30.84	1.19	19.86	1.39	4.51
18/10/1992	9.29	2.64	20.36	0.005	0.05
07/11/1992	87.56	1.94	29.44	13.3	15.19
01/02/1993	18.86	0.89	13.44	0.18	0.95
02/02/1993	70.26	1.9	11.76	3.58	5.1
31/10/1993	13.94	2.5	17.37	0.3	2.16
06/01/1994	11.02	2.77	9.04	0.02	0.21
16/02/1994	65.57	3.13	10.05	2.33	3.55
28/02/1994	18.85	1.54	14.8	0.16	0.85
15/10/1994	21.87	7.61	51.31	2.09	9.57
04/11/1994	22.63	2.65	23.75	1.15	5.1
28/02/1995	24.95	3.38	13.37	0.27	1.09
17/01/1996	11.9	1.24	16.76	0.01	0.11
23/01/1996	15.67	1.35	12.79	0.42	2.66
01/02/1996	20.6	0.91	14.12	1.03	5.01
09/04/1996	9.01	2	35.02	0.37	4.07
06/05/1996	8.21	24.65	49.29	0.75	9.11
14/10/1996	19.48	1.55	11.62	0.35	1.81
29/12/1996	8.99	1.72	14.62	0.06	0.63
31/05/1997	18.5	2.58	30.03	2.13	11.5

Si bien durante los primeros años no se había resuelto satisfactoriamente la medición precisa de la escorrentía, debido a problemas de enlodamiento de los sensores de nivel, se han conseguido buenas estimas gracias a considerar que la gran mayoría de hidrogramas presentan una rama descendente de corta duración (Fig 23). En la actualidad, un balancín a la salida del aforador proporciona una precisión adecuada en los caudales bajos a la vez que indica cuando cesa exactamente la escorrentía. En general, los eventos de escorrentía son predecibles a partir de la magnitud de la precipitación y de las tasas de infiltración de las distintas superficies y su distribución espacial, ya conocidas (Cantón et al., 2002).

A diferencia de la escorrentía, la producción de sedimentos es más difícil de predecir ya que además de depender de la humedad antecedente y de la precipitación tiene que ver con el número de ciclos de humectación-deseccación que ha sufrido el regolito en períodos largos (desde varios meses a varios años). El número e intensidad de dichos ciclos van aumentando el espesor de regolito a partir de la meteorización de la roca madre, por lo que también aumenta la disponibilidad de sedimentos. La producción de sedimentos depende también de

de la cantidad y situación de sedimentos temporalmente depositados en los cauces, la distribución de bloques en los mismos, etc.

Si bien la subcuenca 4, en gran parte vegetada, solo presenta escorrentía o bien cuando su suelo está saturado o en eventos de gran magnitud, en la Fig 22 se presenta un episodio con escorrentía en las cuatro cuencas. Hay que reseñar que las tasas de escorrentía producidas en F2 y F3 representan tan sólo al 30% de la superficie de la cuenca (laderas desnudas orientadas al cuadrante SO), aunque su contribución al caudal general de F1 es considerable.

A pesar de las diferencias existentes entre superficies, las (Fig 28).

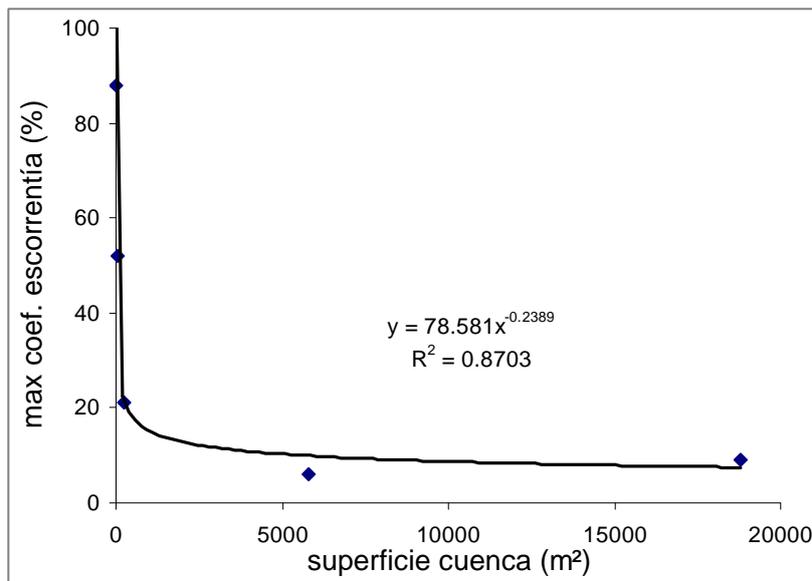


Fig 28.- Relación entre áreas de contribución y coeficientes de escorrentía (Solé Benet et al., 2003).

4.- Síntesis y recomendaciones.

4.1.- Síntesis

En el paisaje del subdesierto de Tabernas ocupan una importante extensión determinadas unidades litológicas, como las margas yesíferas, las cuales están afectadas por un elevado acarcavamiento que ha originado un paisaje de malpaís en el que dominan los procesos de erosión hídrica. Esto sugiere elevadas tasas de erosión, pero nuestros estudios revelan lo contrario, por lo que es muy probable que el aspecto actual haya sido similar desde hace al menos dos mil años, como también se ha demostrado respecto al *malpaís* de la hoya de Guadix (Granada), bajo clima relativamente parecido. En realidad las cárcavas y barrancos del subdesierto de Tabernas son escasamente activos porque la erosión y el transporte de sedimentos están limitados por la escasez de precipitaciones y por su baja intensidad general.

La geología y el clima del desierto de Tabernas explican la vulnerabilidad del área a los procesos de degradación del terreno, por tratarse en general de rocas blandas con alta erodibilidad y porque la aridez reduce bastante el margen de resiliencia de la vegetación, por lo que alteraciones relativamente pequeñas pueden ser suficientes para que se traspasen umbrales de procesos y por tanto tener consecuencias relativamente importantes.

Las laderas desnudas con fuerte pendiente son las principales fuentes de escorrentía y sedimentos. La erosión de las laderas margosas depende esencialmente de la disponibilidad de

sedimentos, que a su vez depende de la meteorización. Las sales solubles, en la que el yeso es dominante, y los ciclos anuales humedecimiento-deseccación controlan el proceso de la alteración de la roca y los subsiguientes procesos de erosión hídrica.

En cambio los pedimentos son los principales sumideros de la escorrentía. La erosión y la acumulación de sedimentos en los pedimentos dependen de la densidad de la vegetación.

La respuesta hidrológica de este paisaje está controlada aparte de por la magnitud de la de precipitación y la intensidad de la misma, por los tipos de superficies que lo integran (incluyendo tanto la vegetación como las costras y otras características) y por la organización espacial de las mismas.

La flora es original en los contextos nacional y europeo, y la vegetación vascular constituye el principal factor de estabilización. La cobertura líquénica también es importante, como mecanismo estabilizador, por sus efectos sobre la escorrentía y como etapa inicial de la sucesión vegetal; pero es muy sensible al pisoteo y a los movimientos en masa. El estado de la superficie, incluida la vegetación, determina buena parte de la respuesta hidrológica del material. Las plantas vasculares pueden disminuir la escorrentía y la exportación de sedimentos en más de un orden de magnitud. Incluso la anual *Stipa capensis* pionera edificadora es capaz de una retroalimentación importante hacia la estabilidad. Pero la vegetación sólo puede establecerse cuando se han desacelerado los procesos erosivos. Se trata de un área donde los factores abióticos son claves en la dinámica del conjunto.

Sin embargo, aunque los flujos de escorrentía pueden llegar a ser muy elevados, con una gran carga de sedimentos, la erosión es relativamente baja comparada con otras áreas del levante español. Como las tasas anuales de erosión la mayoría de los años implican un proceso de denudación más lento que el de meteorización, el regolito se acumula. La limitación a los procesos de erosión en este paisaje no es la disponibilidad de material meteorizado, sino la frecuencia y magnitud de los eventos capaces de transportar dicho material. Los procesos de erosión en este paisaje están limitados fundamentalmente por 2 factores: las superficies vegetadas (tanto matorral como con líquenes) ambas con tasas de erosión muy bajas constituyen casi las 2/3 partes del área de estudio y la escasez de lluvias con energía suficiente para generar escorrentía y transportar sedimentos.

4.2.- Avenidas

Debido a sus características generales de impermeabilidad, toda la zona se puede considerar como generadora de avenidas. Casi todos los años, pero en pocas ocasiones cada año, el agua acumulada en la rambla de Tabernas procedente de las cabeceras de las sierras Filabres y Alhamilla alcanza el Mediterráneo. Pero las ramblas suelen ser amplias y estas avenidas suelen estar lejos de desbordar los cauces. En general el único perjuicio que causan es el de inutilizar temporalmente el uso de los lechos de las ramblas como vías de comunicación entre fincas.

4.3.- Recomendaciones de uso y gestión para un desarrollo sostenible

Por ser un paisaje único en Europa, con un significativo valor geomorfológico y paisajístico y una vegetación singular, la alternativa más atractiva y razonable es la de conservarlo en su estado actual para las generaciones venideras. Por otra parte eso es fácil porque su nivel actual de uso es mínimo y cualquier actividad agropecuaria en la zona tendría elevado coste y poco sentido dadas las características de la misma. Su grado de protección actual es mínimo por tener la calificación de “Paraje Natural del Desierto de Tabernas”. Curiosamente los límites de dicho espacio protegido no incluyen la margen izquierda de la rambla de Tabernas, sector

donde se ubica el área experimental El Cautivo, y precisamente donde se han producido y producen algunos de los procesos de acaravamiento más activos e interesantes y donde es más conspicua la presencia de líquenes.

Su posible inclusión como parte de los patrimonios geológico y biológico nacionales y su valor como georrecurso están recogidos en varios documentos, entre los que destacan la propuesta de calificarlo como futuro Parque Nacional de los Sub-Desiertos de Almería (Mota et al., 2004), y el Inventario Andaluz de Geodiversidad (TECNA, 2004). El uso pasado y actual como escenario natural para películas se puede compatibilizar con la conservación si se toman las necesarias precauciones. Otras opciones que impliquen su puesta en valor agrícola o ganadero requerirían forzosamente un elevado coste económico, modificaciones topográficas severas, implementación de sistemas de riego y drenaje, y la total destrucción de su valor paisajístico y eco-turístico actual.

Por todo ello el uso más aconsejable de esta zona es su conservación, en un marco de ordenación del territorio más adecuado que el actual, que ni tan solo lo incluye en el vecino Paraje Natural. Sin embargo la zona está considerada de protección de grado A en una propuesta reciente de delimitación y ordenación del espacio (Mota et al., 2004).

En el nuevo marco, deberían quedar prohibidas las actividades mineras y extractivas y restringirse en el mayor grado posible las infraestructuras tales como antenas, caminos, carreteras, tendidos eléctricos, canalizaciones, edificaciones, vertederos, etc. Asimismo el tránsito de vehículos a motor y personas debería restringirse a caminos ya existentes rehabilitados al efecto, con la finalidad de evitar destruir los frágiles ecosistemas de la zona. Debería así mismo excluirse la ganadería extensiva y las actividades agrícolas. El posible uso como coto de caza debería ir precedido por los oportunos estudios de impacto con la finalidad de delimitar áreas de exclusión en donde la fragilidad de los ecosistemas así lo aconseje.

Agradecimientos

El trabajo presentado en este capítulo ha sido financiado total o parcialmente por los siguientes proyectos de investigación: 1) Erosión por acaravamiento en medio semiárido: causas, evolución y restauración (NAT89-1072-C06-02), 2) DESERMA (AMB93-0844-C06-01), 3-4-5) MEDALUS I, II y III (EPOC-CT90-0014-SMA; EV5V-0128; ENV4-CT95-0118), 6) PROHIDRADE (AMB95-0986-C02-01), 7) EPOHIDRO (HID98-1056-C02-01), 8) PROHISEM (REN2001-2268-C02-01/HID), 9) GEORANGE (CE EVK2-2000-22089, CSIC ENVIR/992/0630), 10) ECONEXUS (REN2000-1513 GLO) y 11) PECOS (REN2003 - 04570/ GLO). Sin la ayuda inestimable de Sebastián Vidal, Alfredo Durán y Montse Guerrero la adquisición remota de datos ni los necesarios trabajos de campo y laboratorio no se hubieran podido llevar a cabo, ni sin la de Marieta Sanjuán y Pascual Noguera en la cartografía topográfica y geomorfológica de la zona. Los autores agradecen asimismo a los profesores R. Alexander, A. Calvo, F. Gallart, A. Harvey, M. Kirkby, A. Mather y A. Yair las constructivas conversaciones mantenidas en el campo. Finalmente un agradecimiento muy especial para los hermanos Viciñana, propietarios de la finca en donde se encuentra la estación experimental, con cuyo permiso se han instalado todos los equipos.

Referencias citadas

- Alexander,R.W., Harvey,A.M., Calvo,A., James,P.A. and Cerda,A. 1994. Natural stabilisation mechanisms on badland slopes: Tabernas, Almería, Spain. in Millington and Pye (eds.): *Environmental Change in Drylands*, John Wiley & sons, London, pp. 85-111.
- Cantón,Y. 1999. *Efectos hidrológicos y geomorfológicos de la cubierta y propiedades del suelo en paisaje de cárcavas*. Tesis doctoral, Universidad de Almería. Spain. 394 p. Publicada como CD-ROM. Universidad de Almería.
- Cantón, Y. Domingo, F., Solé-Benet, A. Puigdefábregas, J. 2001a. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *Journal of Hydrology*, 252: 65-84.
- Cantón,Y., Solé-Benet, A., Queralt,I., and Pini,R. 2001b. Weathering of a gypsum-calcareous mudstone under semi-arid environment at Tabernas, SE Spain: laboratory and field-based experimental approaches. *Catena*, 44:111-132.
- Cantón, Y., Domingo, F., Solé-Benet, A., and Puigdefábregas, J. 2002. A physically-based distributed model for runoff generation for the Tabernas badlands, SE Spain. *Hydrological Processes*, 16: 2621-2643.
- Cantón, Y., Solé-Benet, A., Lázaro, R. 2003. Soil-geomorphology relations in gypsiferous materials of the Tabernas desert (Almería, SE Spain) *Geoderma*, 115: 193-222.
- Cantón,Y., Del Barrio,G., Solé-Benet,A., Lázaro,L. 2004a. Topographic controls on the spatial distribution of ground cover in a semiarid badlands area. *Catena*, 55: 341-365.
- Cantón,Y., Solé-Benet,A., Domingo,F. 2004b. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain. *Journal of Hydrology*, 285: 199-214.
- Cantón,Y., Solé-Benet,A. 2004c. Geomorfología y procesos actuales. En Mota,J., Cabello,J., Cerrillo,M.I., Rodríguez-Tamayo,M.L. (eds) *Subdesiertos de Almería: naturaleza de cine*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, pp 39-50.
- Cañadas,S. Y Claramunt,T. 2000. Erosión y desertificación: recursos didácticos para el diseño de actividades de educación ambiental. En *Desertificación en Almería: de los tópicos y malentendidos a las causas y consecuencias*, pp 129-140, Grupo Ecologista Mediterráneo, Almería.
- Capel Molina, J.J. 1982. La aridez en la península Ibérica. Algunos índices bioclimáticos. En: *Homenaje almeriense al botánico Rufino Sagredo*. Instituto de Estudios Almerienses. Almería.
- Capel Molina, J. J. 1986. *El clima de la provincia de Almería*. Publicaciones de la Caja de Ahorros de Almería. 262 p.p. Almería.
- Castillo-Requena, J.M. 1989. *El Clima de Andalucía*. Instituto de Estudios Almerienses. Almería. 293 pp.
- Doorembos,J. y Pruitt,W.O. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos. *Estudio FAO – Riego y Drenaje*, 24. FAO, Roma, 194 p.
- Downard, K. 2000. Relationship between surface crusts and erosion in the Tabernas badlands, Almería, SE Spain. Tesis doctoral inédita, Universidad de Wolverhampton, Inglaterra, 274 p.
- Elias Castillo, F. y Ruiz Beltrán, L. 1979. Precipitaciones máximas en España. Estimaciones basadas en métodos estadísticos. Monografías del ICONA, nº 21. ICONA, Ministerio de Agricultura. Madrid.

- Esteban-Parra, M.J., Rodrigo, F.S. y Castro-Díez, Y. 1997. Estudio de variaciones climáticas en Almería. En: García-Rosell, L. y Navarro-Flores, A. (Eds.), *Recursos Naturales y Medio Ambiente en el Sureste Peninsular*, pp. 489-501. Almería: Instituto de Estudios Almerienses y Ayuntamiento de Cuevas de Almanzora.
- Esteban-Parra, M.J., Rodrigo, F.S. y Castro-Díez, Y. 1998. Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880-1992. *International Journal of Climatology*, 18: 1557-1574.
- FAO-UNESCO. 1974. *Soil map of the world, 1:5.000.000, vol 1, Legend*. UNESCO, Paris.
- FAO-ISRIC-ISSS. 1998. *World reference base for soil resources*. FAO, Roma.
- Gallart, F., Solé-Benet, A., Puigdefábregas, J., Lázaro, R. 2002. Badland systems in the Mediterranean. In L.Bull & M.Kirkby (eds.) *Dryland rivers. Hydrology and geomorphology of semi-arid channels*, cap. 10, pp 299-326, John Wiley & sons, Chichester, Reino Unido.
- Harvey, A., M. y Calvo, A. 1991. Process interactions and rill development on badland and gully slopes. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband*, 83: 175-194.
- IGME. 1975. *Mapa geológico de España, escala 1:50.000, hoja 1030 – Tabernas*. Servicio de publicaciones, Ministerio de Industria. Madrid.
- Kleverlaan, K. 1987. Gordo megabed: a possible seismite in a Tortonian submarine fan, Tabernas basin, Province Almería, SE Spain. *Sediment. Geol.*, 51:165-180.
- Kleverlaan, K. 1989a. Neogene history of the Tabernas basin (SE Spain) and its Tortonian submarine fan development. *Geologie en Mijnbouw*, 68:421-432.
- Kleverlaan, K. 1989b. Three distinctive feeder-lobe systems within one time slice of the Tortonian Tabernas fan, SE Spain. *Sedimentology*, 36:25-45
- Lázaro, R. & J. Puigdefábregas. 1994. Distribución de la vegetación terofítica en relación con la geomorfología en áreas acarcavadas cerca de Tabernas, Almería. *Monografías de flora y vegetación Bética*, 7-8: 127-154.
- Lázaro-Suau, R. 1995. *Relaciones entre vegetación y geomorfología en el área acarcavada del Desierto de Tabernas*. PhD Thesis, Fac. Biología, University of Valencia.
- Lázaro, R., R.W. Alexander & J. Puigdefábregas. 2000. Cover distribution patterns of lichens, annuals and shrubs in the Tabernas Desert, Almería, Spain. R.W. Alexander and A.C. Millington Eds. In *Vegetation Mapping: from patch to planet*. Libro 350: 19-40. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester.
- Lázaro, R., F.S. Rodrigo, L. Gutiérrez, F. Domingo y J. Puigdefábregas. 2001. Analysis of a thirty-year rainfall record (1967-1997) in semi-arid SE Spain for implications on vegetation. *Journal of Arid Environments*,
- Lázaro, R. Rodríguez-Tamayo, M.L., Ordiales, R. y Puigdefábregas, J. 2004. El clima. En Mota, J., Cabello, J., Cerrillo, M.I., Rodríguez-Tamayo, M.L. (eds) *Subdesiertos de Almería: naturaleza de cine*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, pp 62-79.
- Mota, J., Cabello, J., Cerrillo, M.I., Rodríguez-Tamayo, M.L. (eds). 2004. *Subdesiertos de Almería: naturaleza de cine*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. 461 p + 5 mapas.
- Merlo, M.E., Rodríguez-Tamayo, M.L., Cabello Piñar, J., Lázaro, R. 2004. Adaptaciones de la flora y vegetación: implicaciones del clima y biotopos. En Mota, J., Cabello, J., Cerrillo, M.I.,

- Rodríguez-Tamayo, M.L. (eds) *Subdesiertos de Almería: naturaleza de cine*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, pp 227-247.
- Montero de Burgos, J.L. y González Rebollar, J.L. 1983. (2ª Edición). *Diagramas Bioclimáticos*, ICONA, 379 pp. Madrid.
- Neumann, H. 1961. El clima del sudeste de España. *Estudios Geográficos*, 21 (79): 171-209.
- Oyonarte, C. 2004. La diversidad edáfica. En Mota, J., Cabello, J., Cerrillo, M.I., Rodríguez-Tamayo, M.L. (eds) *Los subdesiertos de Almería. Naturaleza de cine*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, pp 51-62.
- Palacio, J. F. 2002. *Assessment of morphodynamic processes and soil pollution as indicators of land degradation. A case study in the Tabernas area, southeastern Spain*. Master of Science Thesis, ITC - Holanda, 131 p.
- Palutikof, J.P., Conte, M., Casimiro Mendes, J., Goodess, C.M., Espirito Santo, F. 1996. Climate and climate change. En J. Brandt y J. B. Thornes (eds) *Mediterranean Desertification and Land Use*, pp 43-86. John Wiley & Sons, Ltd.
- Peinado, M., Alcaraz, F. y Martínez - Parras, J.M. 1992. *Vegetation of Southeastern Spain*. J. Cramer. Berlin - Stuttgart. 487 p.
- Puigdefábregas, J. & G. Sánchez. 1996. Geomorphological Implications of vegetation patchiness on semi-arid slopes. M. G. Anderson & S. M. Brooks Eds. John Wiley & Sons Ltd. In *Advances in Hillslope Processes*, 2: 1027-1060.
- Pérez Pujalte, A. 1987. *Proyecto LUCDEME, Mapa de Suelos Escala 1:100.000, Tabernas-1030*. ICONA-CSIC.
- Rivas-Martínez, S., Gandullo- Gutiérrez, J.M., Allue- Andrade, J.L., Montero de Burgos, J.L. y González- Rebollar, J.L. 1987. *Memoria del mapa de Series de Vegetación de España*; y Hojas 24 (Murcia) y 27 (Granada). ICONA (Serie Técnica). Madrid, 268 pp.
- Rohdenburg, H. & Sabelberg, U. 1973. Quartäre Klimazyklen im westlichen Mittelmeergebiet und ihre Auswirkungen auf die Relief- und Bodenentwicklung. *Catena*, 1: 71-80.
- Servicio Cartográfico del Ejército. 1979. *Mapa topográfico de Tabernas (hoja 1030), escala 1:50.000*. Madrid.
- Sole-Benet, A., Calvo, A., Cerda, A., Lázaro, R., Pini, R. and Barbero, J. 1997. Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena*, 31: 23-38.
- Solé-Benet, A., Cantón, Y., Domingo, F., DelBarrio, G., Lázaro, R., Domene, M.A., Vidal, S., Puigdefábregas, J. 2003. Long term hydrological monitoring of two micro-catchments in semi-arid SE Spain. En Holko, L. & Miklanek, P. (eds.) *Interdisciplinary approaches in small catchment hydrology: Monitoring and research*. IHP-VI Technical Documents in Hydrology No. 67, UNESCO, Paris, pp 183-188.
- TECNA. 2004. *Propuesta de estrategia andaluza de conservación de la geodiversidad*. Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía) – Universidad de Granada. Granada. 103 p.
- Vidal, S., Solé-Benet, A., Lázaro, R., Durán, A. y Puigdefábregas, J. 1996. Estaciones automáticas de aforo y muestreo de caudales de bajo costo y mantenimiento para zonas remotas. *IV Simposio sobre el Agua en Andalucía*, pp 193-203. ITGME, Madrid.

Villalobos,M., Braga,J.C., Baena,J., Calaforra, Coves,J.V., J.M., Dabrio,C., Feixas,C., Fernández,J.M., Gómez,J.A., Goy,J.L., Harvey,A., Martín,A., Martín,J.M., Mather,A., Stokes,M. 2003. *Geología del entorno árido almeriense. Guía didáctica de campo*. TECNA - ACUSUR – Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía). Granada. 163 p.

Weijemars,R. 1991. Geology and tectonics of the Betic zone, SE Spain. *Earth Science Reviews*, 31: 153-236.

Tesis doctorales y de master llevadas a cabo total o parcialmente en el área experimental

Afana, A. 2003. *Effect of topographic landforms on vegetation cover density of arid landscape of the Southeast of Spain*. MS Thesis, Mediterranean Agronomic Institute of Zaragoza, CIHEAM, IAM, Zaragoza, 123 p.

Afana, A. *Relaciones y tendencias entre topografía y vegetación a distintas escalas en los paisajes semiáridos*. Universidad de Almería. (previsto finales 2008).

Bevan, J. *Dynamics of Terricolous Lichens in the El Cautivo Badlands, Southeast Spain*. Department of Geography, University of Chester (Reino Unido). (previsto finales 2008).

Cantón Castilla, Y. 1999. Efectos hidrológicos y geomorfológicos de la cubierta y propiedades del suelo en paisaje de cárcavas. Tesis doctoral, Universidad de Almería. 394 p.

Del Prado, R. 2002. *Estrategias de adaptación de líquenes a ambientes semiáridos*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Farmacia, Dpto. de Biología Vegetal II.

Downward, K. 2000. *Relationships between surface crusts and erosion in the Tabernas badlands, Almería, SE Spain*. PhD thesis, University of Wolverhampton (Reino Unido).

Lázaro Suau, R. 1995. *Relaciones entre vegetación y geomorfología en el área acarcavada del Desierto de Tabernas*. Tesis doctoral Facultad de Biología, Universidad de Valencia, 242 p + anexos.

Souza-Egipsy, V. 2001. *Estrategia adaptativa de líquenes saxícolas y terrícolas en ambientes semiáridos. Aspectos morfológicos, ultraestructurales, moleculares, ecofisiológicos y relaciones talo-substrato*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biológicas, Depto. de Biología Vegetal I.

Otra bibliografía generada en el area de estudio

Alexander,R.W. and Calvo,A. 1990. The influence of lichens on slope processes in some Spanish badlands. in J.B.Thornes (ed.) *Vegetation and Erosion*, Wiley, Chichester.

Alemayehu, T. 2001. *Environmental indicator mapping and change detection using remotely sensed data and an indicator based approach, a case study in the Desert of Tabernas, Spain*. Tesis de Master, ITC, Holanda.

Calvo,A. and Harvey,A.M. 1989. Morphology and development of selected badlands in SE Spain. in Imeson & De Groot (eds) *Landscape-ecological impact of climatic change. Discussion report on Mediterranean region*.

- Calvo,A., Harvey,A.M. and Paya-Serrano,J. 1991. Processes interactions and badland development in SE Spain. in Sala,Rubio & García-Ruiz (eds.) *Soil erosion studies in Spain*, pp 75-90, Geoforma Ediciones, Logroño.
- Calvo,A., Harvey,A.M. and Paya-Serrano,J. and Alexander,R.W. 1991. Response of badlands surfaces in south east Spain to simulated rainfall. *Cuaternario y Geomorfología*, 5:3-14.
- Calvo,A. and Harvey,A.M. 1996. Morphology and development of selected badlands in SE Spain: implications of climatic change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21:725-735.
- Campbell,I.A.. 1989. Badlands and badland gullies. In D.S.G. Thomas (ed) *Arid zone geomorphology*, capítulo 8, pp 150-183. Belhaven-Halsted Press, London.
- Cantón,Y., Domingo,F., Solé-Benet,A., Puigdefábregas,J. 2001c. Análisis de la respuesta hidrológica de una microcuenca en el Desierto de Tabernas. Modelización de la escorrentía. En A.Pulido, P.A.Pulido, A.Vallejos (eds) *V Simposio sobre el agua en Andalucía*, vol I, pp 169-183, Universidad de Almería.
- Cantón,Y., Solé-Benet,A., Domingo,F., R.Lázaro, Puigdefábregas,J. 2001d. Análisis de los regímenes de humedad del suelo en el Sub-Desierto de Tabernas y su influencia en la escorrentía. En A.Pulido, P.A.Pulido, A.Vallejos (eds) *V Simposio sobre el agua en Andalucía*, vol I, pp 185-199, Universidad de Almería.
- Costa,M., Lázaro,R., López,J.G., Puigdefábregas. 1991. *Guía de la Excursión a las Sierras Béticas Orientales*. Seminario Hispano-francés sobre desertificación.
- Delgado,L., Pascual,A. y Ruiz,A. 1993. Geology and micro-mammals of the Serra-1 site (Tabernas Basin, Betic Cordillera). *Estudios Geológicos*, 49:361-366.
- Delgado Castilla, L. & J. Puigdefábregas. 1994. Caracterización geomorfológica y sedimentológica de los glaciares de la zona de El Cautivo, Tabernas (Prov. de Almería). J. Arnaez, J. M. García & A. Gomez (eds.) *Geomorfología en España*. pp 305–311.
- Delgado Castilla, L. 1996. Interpretación geomorfológica del área de las salinas y su implicación en el modelado actual de la cuenca Neógena de Tabernas, Almería. Grandal d'Anglade, A. & Pagés Valcarlos, J., Eds. *Cuadernos Laboratorio Xeológico de Laxe*, 21: 495–504.
- Ferré, E. y Senciales, J.M. 1992. Niveles de aplanamiento en la Rambla de Tabernas (provincia de Almería). En López, Conesa y Romero (eds.) *Estudios de Geomorfología en España (Actas de la IIª Reunión Nacional de Geomorfología)*, Sociedad Española de Geomorfología, Murcia, pp. 307-314.
- Gallart, F., Puigdefábregas, J., Solé-Benet, A. 2000. Gully dynamics and slope development in recent times. Tabernas badlands (SE Spain). In Wainwright,J., Puigdefábregas,J. & Calvo,A. (eds.) *COST 623 "Soil Erosion and Global Change" meeting Abstracts and Field Guide*, pp 68-77.
- Harvey,A. 1982. The role of piping in the development of badlands and gully systems in south-east Spain. In Bryan & Yair (eds.) *Badland geomorphology and piping*, pp 317-335, Geo Books, Norwich, England. EEZA
- Harvey,A.M. 1987. Patterns of aggradational and dissectional landform development in the Almeria region, SE Spain: a dry-region tectonically active landscape. *Die Erde*, 118: 193-215.
- Harvey,A.M. y Calvo,A. 1989. Distribution of badlands in SE Spain: implications of climatic change. in Imeson & De Groot (eds) *Landscape-ecological impact of climatic change, discussion report on Mediterranean region*.

- Harvey,A.M., Foster,G., Hannam,J., Mather,A.E. 2003. The Tabernas alluvial fan and lake system, southeast Spain: applications of mineral magnetic and pedogenic iron oxide analyses towards clarifying the Quaternary sediment sequences. *Geomorphology*, 50 (1-3): 151-171.
- Lázaro-Suau, R. y J. Puigdefábregas. 2000. Erosión y desertificación en Almería: Aclarando conceptos. En: Carmona, M. y Sánchez, M. (Eds.): *Desertificación en Almería: De los tópicos y malentendidos a las causas y consecuencias*. Volumen: 156 pp. Capítulo: 21-29. Grupo Ecologista Mediterráneo. Almería
- Lázaro, R. 2004. Implications of precipitation on vegetation of water-limited lands. En: *Recent Research Development in Environmental Biology*, Vol. I, pp: 553 – 591. Research Signpost. Kerala (India)
- Li, X-Y., González, A., Solé-Benet, A. Evaluation of two infiltration measurement techniques for different soil crusts. *Catena*, 60: 255-266. 2005.
- Pintado, A., L.G. Sancho, T.G.A. Green, J.M. Blanquer y R. Lázaro. 2005. Functional ecology of the biological soil crust in semiarid SE Spain: sun and shade populations of *Diploschistes diacapsis* (Ach.) Lumbsch. *Lichenologist*, 37 – 5: 425- 432
- Nogueras,P., F. Burjachs, F. Gallart, J. Puigdefabregas. 2000. Recent gully erosion in the El Cautivo badlands (Tabernas, SE Spain). *Catena*, 40: 203-215.
- Puigdefábregas, J. 1995. Desertificación: una perspectiva sobre la cuenca mediterránea. *Fronteras de la Ciencia y la Tecnología*, 3: 15–19.
- Puigdefábregas,J., Solé-Benet,A., Lázaro,R., Vidal,S., Cantón,Y., Nogueras,P. 1997. Field guide. GCTE Workshop “Impact of Global change on semi-arid processes”. EEZA-CSIC.
- Puigdefábregas, J. 1998. Ecological impacts of global change on drylands and their implications for desertification. *Land degradation & Development*, 9: 393–406.
- Solé-Benet,A. y Alexander,R. 1996. Contemporary processes in the Tabernas basin, SE Spain. In Mather,A.E. y Stokes,M. (eds.) *2nd Cortijo Urra Field Meeting, SE Spain: Field Guide* pp 28-38. University of Plymouth, England.
- Villalobos,M. 2004. Los subdesiertos de Almería: un paisaje geológico único. En Mota,J., Cabello,J., Cerrillo,M.I., Rodríguez-Tamayo,M.L. (eds) *Los subdesiertos de Almería. Naturaleza de cine*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, pp 25-37.