

ESTACION EXPERIMENTAL DE “RAMBLA HONDA” (ALMERIA)

Juan Puigdefábregas¹, Yolanda Cantón², Sergio Contreras¹, Gabriel del Barrio¹,
Francisco Domingo¹, Leonardo Gutiérrez, Roberto Lázaro¹, Albert Solé Benet¹,
Sebastián Vidal¹, Luis Villagarcía³, Ana Were¹

¹Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC, General Segura, 1 04001-Almería

²Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Almería

³Universidad Pablo de Olavide, Sevilla

1.- Introducción

El Área Experimental de *Rambla Honda* es una instalación permanente, mantenida y gestionada por el Departamento de Desertificación y Geoecología de la Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA) del CSIC. *Rambla Honda* fue iniciada en 1989 en el marco de un Subproyecto del Programa LUCDEME y se consolidó como facilidad normalizada con el Proyecto MEDALUS (1990-1999) y ha funcionado sin interrupción desde entonces asociada a otros proyectos de investigación. Está enfocada hacia las interacciones entre vegetación, régimen hidrológico y procesos geomorfológicos en un clima mediterráneo semiárido. El problema científico básico es la respuesta de territorios semi-naturales áridos frente al abandono y al cambio climático. Las escalas de trabajo cubren todos los niveles entre parcela y paisaje.

Los productos generados incluyen series temporales de variables geoecológicas, facilidades logísticas para el desarrollo de experimentos, un extenso conocimiento local y regional, y el desarrollo de instrumentos. Los usuarios inmediatos son grupos de investigación. Los destinatarios de la información producida son organizaciones internacionales como la Convención de las Naciones Unidas para la Lucha Contra la Desertificación y administraciones públicas nacionales como el Programa Nacional Español de Lucha contra la Desertificación.

El Área Experimental de *Rambla Honda* puede albergar proyectos específicos a corto plazo, cuyo objetivo sea identificar procesos relevantes en la dinámica de paisajes semiáridos. En la mayoría de los casos la aproximación combina la observación de campo con la experimentación. Los resultados favorecen la evolución de modelos de cambio en el paisaje como respuesta a factores climáticos o de uso del suelo. A su vez, la información así añadida a la base de datos estimula nuevas investigaciones.

Este tipo de actividad se refiere sobre todo al papel de la vegetación dispersa en generar heterogeneidad espacial, y sus implicaciones hidrológicas y erosivas. Algunos ejemplos son: la valoración de la importancia relativa de distintas fuentes de agua en el flujo de evapotranspiración; las interacciones entre vegetación agrupada y suelo desnudo en la distribución espacial de recursos; y las relaciones entre arbustos y herbáceas en el desarrollo de mosaicos de vegetación.

Las instalaciones cubren 26 ha, y están registradas en un Sistema de Información Ambiental a 1 m de resolución. Ambas están cubiertas por un sistema integrado de control remoto y monitorización que permite recibir datos y controlar su adquisición en tiempo real. Este sistema ha sido desarrollado conjuntamente con el Grupo de Instrumentación de la EEZA, y permite la publicación en Internet de datos e imágenes en tiempo real (<http://rhonda.eeza.csic.es>).

Una selección de variables meteorológicas, hidrológicas y ecológicas es monitorizada a varias escalas temporales en el Áreas Experimental. En ambientes áridos, las escalas más finas son esenciales para obtener información sobre eventos extremos, como la precipitación, que son los factores principales que explican el cambio en el paisaje. Por otra parte, las escalas temporales menos detalladas permiten la detección de respuestas al cambio global.

La monitorización a largo plazo en las instalaciones pretende identificar respuestas a la variabilidad climática y al abandono agrícola en tierras marginales. Entre las variables que se registran regularmente se encuentran: la meteorología básica; escorrentía y producción de sedimentos a varias escalas espaciales; propiedades hidrológicas y humedad del suelo. Durante varios años se han registrado también y balances y flujos de biomasa vegetal, tales como productividad primaria neta, necromasa y mantillo. Las instalaciones forman parte del Observatorio Ecológico en el Proyecto SURMODES.

2.- Situación y descripción del área experimental y su entorno

El área experimental (Fig 1) se sitúa en la margen derecha de la Rambla Honda, un cauce efímero bastante encajado que drena un área de 30,6 km² en la vertiente Sur de la Sierra de Los Filabres. El área experimental forma una catena de vegetación dispersa y suelos que se extiende desde el cauce actual de la rambla, a 600 m s.n.m., hasta el parteguas a 800 m (Puigdefábregas et al., 1996).

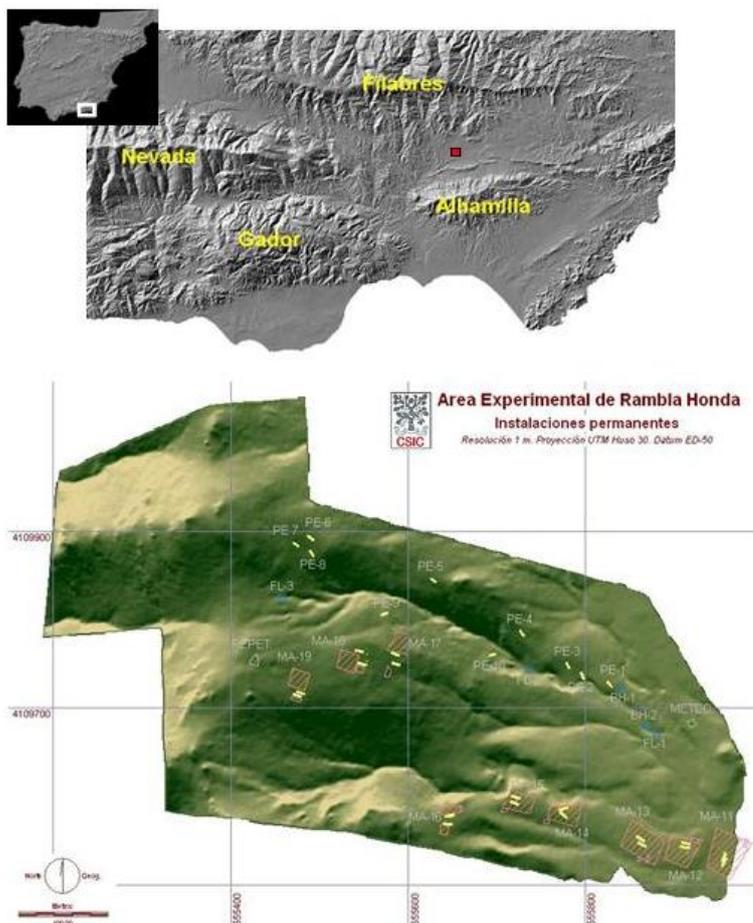


Fig 1 Localización de Rambla Honda y modelo digital de elevaciones del área de estudio

El área de estudio se localiza en la zona de contacto entre la vertiente sur de la Sierra de los Filabres, esencialmente formada por rocas metamórficas del Precámbrico al Triásico (pertenecientes al complejo Nevado-Filábride) y la depresión Neógena de Sorbas-Tabernas, al Sur y Este de la Cordillera Bética.

La secuencia litológica en la zona de estudio está formada por una potente y monótona serie de micasquistos gris oscuro, grafitosos, con granates y abundantes filones y venillas de cuarzo y cuarcitas, estando todo el conjunto fuertemente tectonizado (marcada esquistosidad, estructuras plegadas y cabalgamientos que producen una intensa trituración en las zonas de contacto, así como fallas y fracturas con direcciones N-S y E-W) (Fig 2).

La Rambla Honda es un valle disimétrico muy encajado en los materiales descritos, con una vertiente izquierda con laderas muy escarpadas y rocosas y una vertiente derecha más suave, menos escarpada con un sistema de abanicos aluviales en su base, desarrollados desde el Pleistoceno (Harvey, 1984a) y en vías de destrucción por incisión de la red fluvial actual (Fig 3).



Fig 2.- Micasquistos con vetas de cuarzo y cuarcitas son la litología dominante en la zona.



Fig 3.- Vista general de Rambla Honda desde la parte alta del área experimental. En primer término, espartal (*Stipa tenacissima*) sobre ladera de micasquistos. En la parte media de los conos aluviales, albardal (*Anthyllis cytisoides*) y en la parte baja, retamar (*Retama sphaerocarpa*), ambos sobre campos de cultivo abandonados.

2.2.- Topografía

La restitución fotogramétrica de fotografías aéreas detalladas a escala 1:3500 permitió llevar a cabo un mapa topográfico 1:500 de una gran parte de la zona de estudio, incluyendo toda la cuenca instrumentada (Fig 1). A partir de las curvas de nivel digitalizadas se construyeron modelos digitales de elevación (MDE) mediante dos algoritmos distintos, "r.surf.countour" de USA-CERL (1991) y "ANUDEM" (Hutchinson, 1989), obteniéndose MDEs a resoluciones de 4 m y 1 m respectivamente. A partir de los MDE se calcularon distintos atributos topográficos como la pendiente (SLO), el área específica (ARE), el índice topográfico (W), el índice de humedad (ATB) y el índice de transporte potencial de sedimentos (LSF).

La mayoría de dichos atributos presentan una correlación significativa con las geoformas presentes en Rambla Honda, y algunos de dichos atributos con algunas propiedades de sus suelos, como porosidad y contenido de humedad a capacidad de campo, y también con los promedios de humedad del suelo en las estaciones más húmedas de algunos años (Puigdefábregas et al, 1998).

2.3.- Clima.

En el capítulo de El Cautivo se describen las características generales del clima de la región a partir de la estación del INM de Tabernas, que es la de referencia para la zona.

El clima de Rambla Honda es semiárido, aunque algo menos árido que el de Tabernas y el Cautivo. Las temperaturas son globalmente suaves, si bien los veranos son largos y calurosos pudiéndose alcanzar casi 60°C sobre el suelo. Los diagramas ombrotérmicos según el modelo de Walter-Lieth de las estaciones de Tabernas (30 años) y Rambla Honda (15 años) se incluyen en la Figura 4.

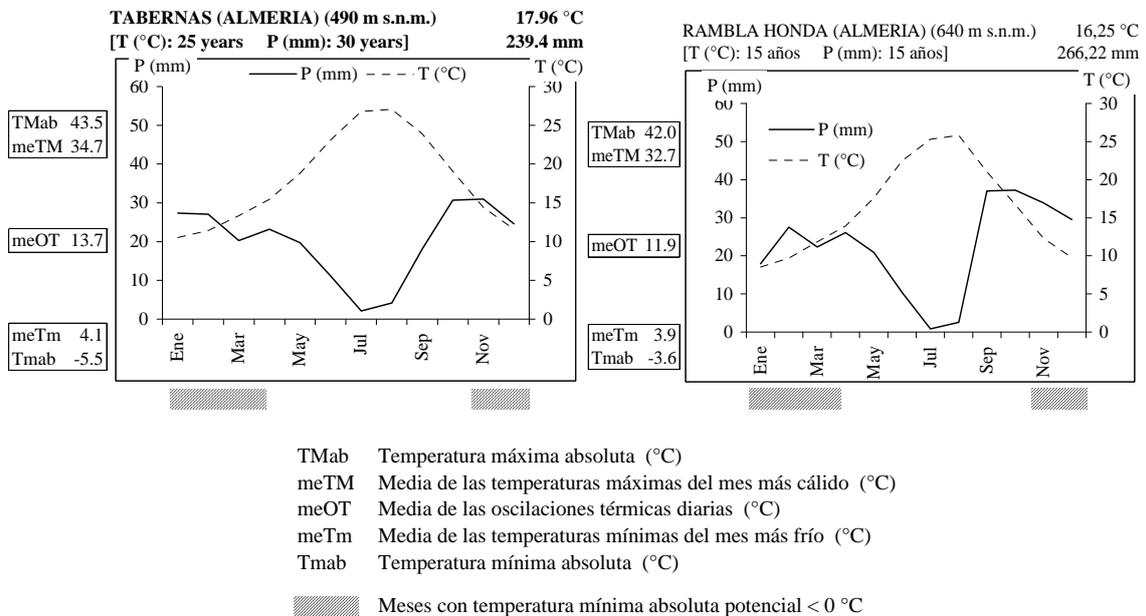


Fig 4.- Diagramas ombrotérmicos según el modelo de Walter-Lieth de las estaciones de Tabernas (30 años) y Rambla Honda (15 años).

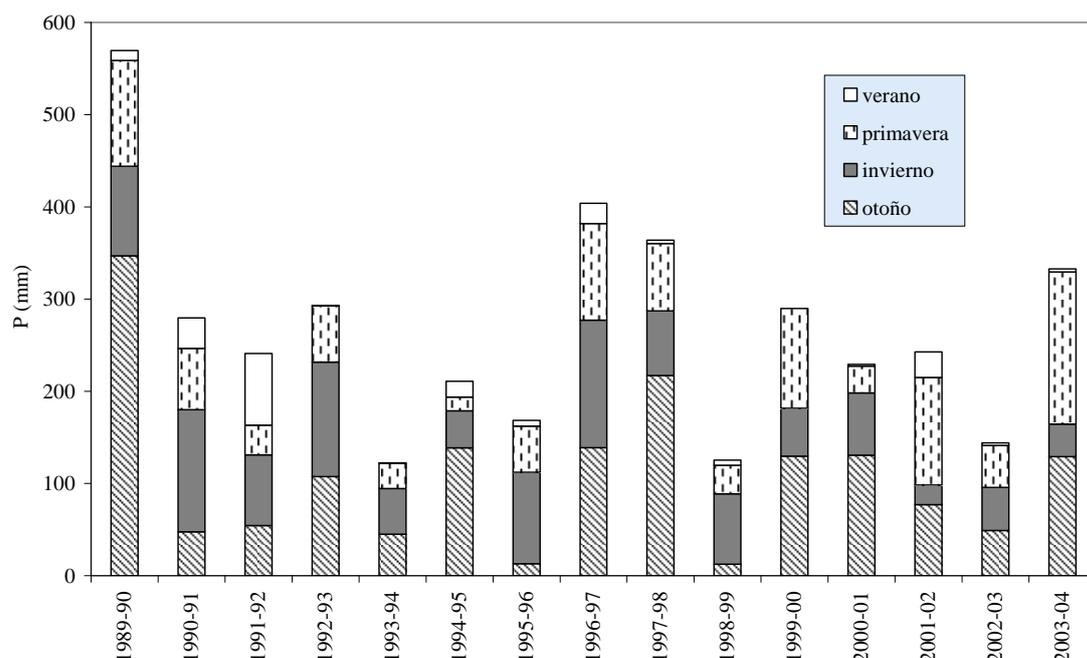


Fig 5.- Precipitación anual (año hidrológico) y estacional en Rambla Honda desde 1989/90 hasta 2003/04.

En el observatorio propio de Rambla Honda se totalizan 266,2 mm de media anual, también con un largo período de precipitaciones que va de Septiembre a Mayo o Junio, pero estando las lluvias bastante concentradas en otoño e invierno (Fig 5). Es más lluvioso el otoño (37 mm en Septiembre, 37,3 mm en Octubre y 33,9 mm en Noviembre); luego el invierno (Diciembre, 29,5 mm, Enero 17,9 mm y Febrero 27,5 mm), después la primavera y por último el verano, con 10,4 mm, 0,8 mm y 2,5 mm de media respectivamente de Junio a Agosto. Los totales anuales han oscilado entre los 569,5 mm de 1989-90 ó los 403,9 mm de 1996-97, hasta los 122,4 mm en el 1993-94 ó 125,4 mm en el 1998-99. Intensidades máximas han sido 91,2 mm/h durante 5 minutos y 211,4 mm/h durante 44 segundos.

Una estima por el método de Blaney y Criddle modificado por Doornbos y Pruitt (1984), da un total anual medio de 1666 mm de evapotranspiración potencial (ETP) 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 ETP alcanza unas 100 veces el valor de la precipitación. Valores frecuentes del cociente P/ETP en la parte norte del área mediterránea occidental oscilan entre 0,4 y 1,3 para el conjunto del año, frente a 0,15 en Tabernas. A escala mediterránea el cociente P/ETP de Tabernas es intermedio entre los valores subsaharianos y los de la mitad norte del Mediterráneo (Palutikof et al., 1996).

La humedad relativa del aire media oscila entre el 48 – 50% en Julio y Agosto y el 67 – 69% en Noviembre y Diciembre. 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%. Las medias mensuales de las máximas oscilan entre 69 y 70% de Julio y Agosto, respectivamente, y 82% de Noviembre o Diciembre. Las mínimas absolutas son muy bajas, incluso en otoño (5% registrados en noviembre) e invierno (6% en Febrero). Las medias de las mínimas, mucho más

regulares, oscilan entre el 30 - 33% (Julio y Agosto, respectivamente) y 48 - 51% en Noviembre y Diciembre.

La radiación solar 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} entre las 12:30 y las 16:00. Estos máximos se dan durante 4 ó 5 meses al año, entre abril y julio-agosto. En los días más cortos los máximos oscilan entre 500 y 600 w m^{-2} . La radiación sube 3 ó 4 w m^{-2} cada día durante el invierno, aunque es también cuando resulta más variable. En cuanto a la radiación neta, las medias mensuales de las mínimas diarias oscilan entre -96 w m^{-2} en junio y julio y -77 w m^{-2} en enero y diciembre y, las medias de las máximas, entre 590 w m^{-2} en mayo-junio y 285 w m^{-2} en diciembre.

La media anual de temperaturas es de $16,2^{\circ}\text{C}$, casi 2°C menos que en la estación de Tabernas, donde el régimen térmico es algo más continental. También las máximas en Rambla Honda son unos 2°C más bajas (oscilando las medias de las máximas entre 15°C en enero y 33°C en agosto) pero las mínimas son similares (oscilando las medias de mínimas entre 19°C en agosto y 4°C en enero). La media de las oscilaciones diarias es también 2°C menor. La temperatura baja más rápidamente durante el otoño en Rambla Honda, a la par que sus precipitaciones otoñales son algo mayores que las de Tabernas.

2.4.- Hidrología superficial

Debido a la escasez y naturaleza de las precipitaciones la escorrentía superficial es forzosamente discontinua a lo largo de las laderas, siendo los cauces principales de tipo efímero. Precipitaciones de hasta 20 mm en un día puede esperarse que ocurran todos los años; con un periodos de retorno de 5 y 11 años se producen episodios lluviosos que superan los 50 y 70 mm en 24 h respectivamente (Lázaro et al., 2001). Dependiendo también de la intensidad, en el caso de los eventos más importantes pueden producirse avenidas más o menos efímeras que afectan a los cauces principales, lo que viene ocurriendo en promedio una vez cada 4 años (Domingo et al., 2001).

La red es de tipo dendrítico con una densidad de drenaje entre 12 y 16 km km^{-2} . La dirección de los cauces está condicionada básicamente por la estructura local, tanto por la esquistosidad principal como por los ejes de los pliegues, siguiendo zonas lineales de mayor debilidad existiendo muy buenos ejemplos de erosión diferencial, dando sucesiones de resaltes o espolones morfológicos junto a vaguadas de reducidas dimensiones (cauces de orden 1).

2.5.- Hidrogeología

La geología de la zona indica que sólo se encuentran niveles acuíferos en donde se producen acumulaciones de sedimentos cuaternarios, generalmente en los cauces principales de las ramblas, considerándose el substrato de micasquitos como impermeable. En nuestra zona de estudio, el espesor de sedimentos cuaternarios alcanza 30 m y solo durante los episodios lluviosos extremos llega a llenarse el acuífero aluvial (tres veces en 15 años). La elevada conductividad hidráulica del sedimento explica su rápido vaciado (inferior a 72 h) probablemente por drenaje lateral aguas abajo. Pero en los eventos de precipitación intensos la concentración de escorrentía es rápida y el agua

puede correr en superficie por los lechos de los cauces principales sin haberse llenado previamente todo el acuífero.

2.6.- Suelos – propiedades estructurales.

Los suelos son de origen coluvial y aluvial. Los del sector alto de la ladera se han desarrollado directamente a partir de micasquitos y sobre depósitos de pendiente. El espesor del suelo depende de la dureza de la roca y de la pendiente: donde abundan las venas de cuarzo dominan los afloramientos rocosos y el suelo apenas alcanzan 15 cm de profundidad, (*Leptosoles Eutricos* según FAO-ISRIC-ISSS, 1998) pero en los depósitos de pendiente sobre micasquitos menos cuarcíferos el suelo puede tener hasta 60 cm (*Regosoles Eutricos* según FAO-ISRIC-ISSS, 1998). Son suelos franco-arenosos, muy pedregosos, con contenidos de materia orgánica del horizonte superficial entre el 2% y el 8% según se trate de áreas desnudas o bajo vegetación de esparto.

En el sector al pie de la ladera se han formado potentes conos aluviales (se han medido 18 m de espesor de sedimentos unas pocas decenas de metros antes de su convergencia con la rambla) formados por coluviones estratificados en lentejones que aguas abajo enlazan con las terrazas de rambla formadas por depósitos aluviales mejor estratificados. Por ello los suelos son mucho más profundos, de tipo arenoso-franco (Fig 6), también pedregosos pero disminuyendo el tamaño de los elementos líticos pendiente abajo. Tienen menor contenido de materia orgánica (entre 1,4 y 4 según se trate de áreas desnudas o bajo vegetación perenne). Los de la parte alta son *Regosoles Calcáricos* y los de la baja *Fluvisoles Eutricos*, según FAO-ISRIC-ISSS (1998).



Fig 6.- Típico perfil de suelo, de tipo AC, en la parte baja de un cono aluvial en Rambla Honda. Se observa la típica estratificación en lentejones de arena y grava y un desarrollo edáfico incipiente (horizonte Ap).

Los suelos de ambos sectores tienen algunos atributos comunes como el pH, entre 6,5 y 7,5, una baja conductividad eléctrica, entre 0,03 y 0,22 dSm⁻¹, y una reducida capacidad de intercambio catiónico, inferior a 10 cmol kg⁻¹, la presencia de un pavimento de piedras (Fig 7) y una costra filtrante subyacente (Fig 8). La estabilidad de los agregados, si bien aumenta proporcionalmente con el porcentaje de vegetación anual (especialmente *Stipa capensis*), con la proximidad a la vegetación perenne y la proporción de fracción fina (limo + arcilla), es en general baja comparada con suelos de otras zonas semiáridas (Solé Benet et al., 2004).



Fig 7.- Pavimento de piedras que recubre tanto los suelos del abanico aluvial como los gradines aguas arriba de las matas de esparto. El aro gris corresponde a un experimento de medida de la humedad del suelo y tiene 25 cm de diámetro.

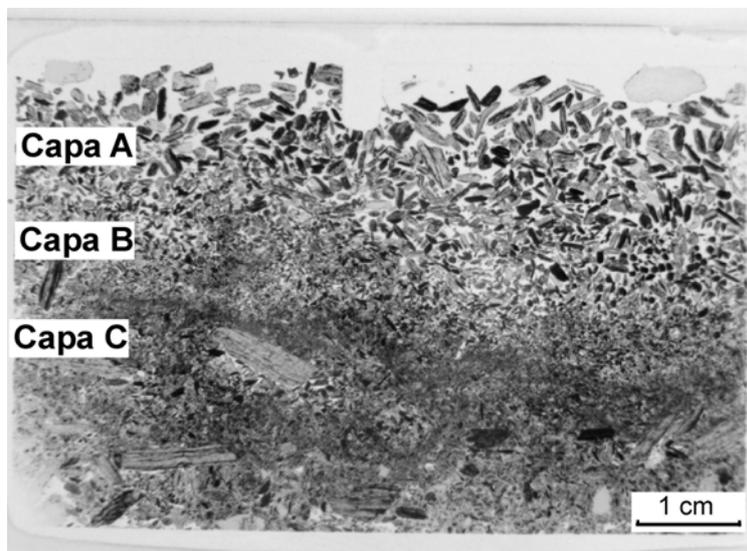


Fig 8.- Fotografía de una lámina delgada de un corte de suelo en la que se observa la diferenciación textural que ha originado la costra filtrante: capas A (gravilla) y B (arena gruesa), en las que se han lavado los elementos finos, capa C (arena muy fina y limo), de acumulación.

A pesar de su elevado contenido en arena, el contenido volumétrico de agua de la tierra fina retenida entre 0,01 y 1,5 MPa es relativamente alta, entre 0,33 L L⁻¹ y 60 L L⁻¹. Sin embargo, dichos valores disminuyen hasta la mitad si tenemos en cuenta los elevados

valores de densidad aparente medidos en grandes volúmenes de suelo (p.e., 50 L), del orden 1,8 L kg⁻¹ a 2,2 L kg⁻¹, debidos a la elevada pedregosidad, que oscila entre el 13% en la parte baja de la catena y el 60% en la parte alta.

Asimismo se ha puesto de manifiesto la existencia de hidrofobia asociada a acumulaciones de materia orgánica en superficie, ya sea de origen vegetal (mantillo) o animal (letrinas de conejos), especialmente en los suelos arenoso-francos de los conos aluviales (Contreras y Solé, 2003). Este hecho confirma las observaciones previas llevadas a cabo con simulación de lluvia (Nicolau et al, 1996) en las que la escorrentía disminuía progresivamente a medida que la repelencia al agua desaparecía.

2.7.- Vegetación

(Se indican con * las especies endémicas de distribución Ibero-Norteafricana, con ** los endemismos del SE ibérico y con *** los endemismos más o menos locales, según Peinado et al 1992)

Rambla Honda está probablemente fuera pero muy cerca del borde del área cuya vegetación potencial sería un encinar (Rivas - Martínez et al., 1987). El clima del lugar no parece que permita sostener un estrato arbóreo más o menos generalizado (Montero y G. Rebollar, 1983; Lázaro y G. Rebollar, 1988). Aunque la presencia de algunos pies de *Quercus ballota* por los alrededores junto con la estima para la zona de una precipitación anual media de 300 mm, mediante interpolación en el espacio basada en un centenar de estaciones meteorológicas de la provincia de Almería y alrededores (Lázaro y Rey, 1990), hacen pensar que tal vez las precipitaciones de los últimos 15 años han sido más escasas de lo normal a largo plazo y que el área podría soportar cierta cobertura de árboles. Pero todo parece indicar que la vegetación natural no pasaría de un matorral mediterráneo con árboles dispersos de lento desarrollo. En la actualidad los espartales, cuya extensión ha sido favorecida por el hombre, son la formación que más superficie ocupa, siendo también importantes los albadales y retamares. Terófitos y caméfitos, así como algunos hemiscriptófitos y nanofanerófitos son los biótijos mejor adaptados a este entorno semiárido y templado y, en conjunto, suponen la gran mayoría de la flora vascular. Las especies anuales son tres veces más numerosas que las perennes, aunque la mayor parte de la biomasa se debe a los arbustos y a las gramíneas vivaces que forman macollas.

En los lugares sin uso agrícola desde hace más tiempo se pueden encontrar fragmentos de matorral con algunas de estas especies: *Pistacia lentiscus*, *Quercus coccifera*, *Bupleurum gibraltarium*, *Rhamnus velutinus*, *R. oleoides*, *Ephedra fragilis*, *Quercus ballota*, *Olea europea sylvestris*, *Rubia peregrina*, *Clematis flammula* o *Pinus halepensis*. Pero la fisonomía más frecuente en la mayor parte de las laderas es el espartal, formación de herbáceas perennes dominada por gramíneas como *Stipa tenacissima* y *Dactylis hispanica*, incluyendo también algunos caméfitos como *Helianthemum almeriense**** y hemiscriptófitos como *Herniaria fontanesii* ssp. *almeriana**** y, en los puntos nitrificados, *Artemisia barrelieri*** , *A. campestris* o *Helychrisum stoechas*, así como ciertos geófitos como *Lapiedra martinezii* en puntos con afloramientos rocosos.

Las áreas de ladera no ocupadas por espartal, generalmente por ser campos abandonados hace menos tiempo, y por lo común con menor pendiente y más espesor de suelo, sostienen un matorral de bajo porte y media cobertura con fitodiversidad más alta que los espartales y una composición florística más variable localmente. Algunos de

estos matorrales son albaidales, fuertemente dominados por *Anthyllis cytisoides*. Pero en general también son frecuentes otras especies, como *Cistus albidus*, *Coronilla juncea*, *Daphne gnidium*, *Genista retamoides****, *G. umbellata*, *Rhamnus lycioides*, *Rosmarinus officinalis*, *Brachypodium retusum* y *Whithania frutescens* para los lugares con matorral más desarrollado, y *Ballota hirsuta*, *Hammada articulata****, *Launaea lanífera****, *Lavandula multifida*, *Phagnalon saxatile*, *Salsola genistoides****, *Paronychia suffruticosa*, *Teucrium* sps. y *Thymus* sps. para los lugares más degradados.

En los fondos de valle y lechos de rambas cambia la flora y a menudo pasa a ser dominante *Retama sphaerocarpa*, *Nerium oleander* o *Tamarix africana*, siendo también comunes *Andryala ragusina*, *Ficus carica*, *Ononis natrix*, y *Thymelaea hirsuta*. Las anuales presentan pocas especies en el espartal, pero son abundantes en las partes bajas de ciertas laderas y muy abundantes en los campos abandonados, los fondos de valle, y en los lugares con suelo profundo, abandono reciente, y uso esporádico para agricultura o habitual para ganadería. Entre las múltiples especies de terófitos cabe citar *Alyssum granatense*, *Asphodelus tenuifolius**, *Atractylis cancellata*, *Brachypodium distachyon*, *Bromus rubens*, *Calendula tripterocarpa*, *Clypeola jonthlaspi*, *Cynodon dactylon*, *Diploaxis harra****, *Eryngium ilicifolium**, *Helianthemum ledifolium*, *H. salicifolium*, *Hippocrepis multisiliquosa*, *Leontodon longirrostris*, *Linum strictum*, *Plantago afra*, *P. ovata*, *Rostraria pumila*, *Schismus barbatus*, *Stipa capensis*, etc. En los fondos de valle, con suelos más arenosos, además de muchas de las anteriores, destacan *Coronopus didymus*, *Crassula tillaea*, *Crucianella angustifolia*, *C. patula*, *Ifloga spicata**, *Lasiopogon muscoides**, *Leysera leyseroides**, *Limonium echioides*, *L. thouinii*, *Linaria nigricans****, *Lobularia libica**, *Logfia clementei**, *Nothoceras bicorne**, *Ononis viscosa*, *Rumex bucephalophorus*, *Silene ascendens****, *S. littorea*, *S. decipiens*.



Fig 9.- Retamar (*Retama sphaerocarpa*) en la parte baja de Rambla Honda.

En el área instrumentada la vegetación es un matorral formando tres bandas altitudinales transversales a la línea de pendiente de las laderas, estando cada una de las bandas dominada por una especie distinta. En el fondo del valle y en la parte baja de los abanicos sedimentarios que se extienden por la mitad inferior de la ladera, encontramos un retamar fuertemente dominado por *Retama sphaerocarpa* (Fig 9), en el cual las anuales son estacionalmente muy abundantes, estando presentes diversas especies silicícolas. En la parte alta de los abanicos aluviales se encuentra un albaidal casi puro de *Anthyllis cytisoides* (Fig 10), sobre suelos profundos y con coberturas eventualmente

importantes de anuales. En la mitad superior de la ladera, con más pendiente y suelos más someros y con afloramientos rocosos, la vegetación es un espartal con fuerte dominio de *Stipa tenacissima* (Fig 11) y escasas anuales, con pequeñas manchas de albaidal ocupando rellanos de menor pendiente y probablemente asociadas a los últimos enclaves que fueron cultivados. Lo esquemático de la vegetación del área instrumentada, junto con el hecho de que las especies dominantes son a la vez muy comunes y típicas en la región y claramente distintas en cuanto a morfología y ecología, fue una de las razones para la selección de dicha área.



Fig 10.- Albaidal (*Anthyllis cytisoides*) en la parte alta de los conos aluviales.



Fig 11.- Espartal (*Stipa tenacissima*) cubriendo la ladera de micasquistos.

2.8.- Población y uso del suelo

En el pasado el uso de esta zona fue muchísimo más intenso que el actual puesto que vivían en ella varias familias, lo que hacía inevitables varias actividades: agricultura de secano (cereales sobre todo), cultivando para ello todas las terrazas de fondo de rambla y los numerosos balates (terrazas de banco estrecho en laderas) de la zona, si bien

mediante técnicas de cosecha de agua procedente de laderas desnudas y/o rocosas proporcionaban también riegos complementarios a pequeñas parcelas con olivos y/o huertos; ganadería (ovina, caprina y porcina); caza menor; recolección del esparto que los propios habitantes favorecieron, como fuente de celulosa, y de plantas aromáticas, hoy en día muy escasas; apicultura; quizás también artesanía.

Actualmente la zona está despoblada por el abandono ocurrido en las décadas de los 50 y 60 del siglo XX. Aunque la zona sigue teniendo un uso ganadero de baja intensidad, en el área experimental dicho uso se ha excluido totalmente con la finalidad de que sus posibles efectos no interfirieran con los procesos naturales. Una de las principales diferencias entre la zona pastoreada y la no pastoreada ha sido la presencia en la zona no pastoreada, entre 2001 y 2004, de una plaga de una cochinilla que ha provocado la mortandad casi total de albaida, con posibles consecuencias, todavía no evaluadas, en el comportamiento hidrológico y geomorfológico en las áreas afectadas.

Otro uso actual del suelo es la caza menor, sobre todo de perdiz roja, codorniz y conejo. Hay pruebas de presencia ocasional de jabalíes y zorros en el área instrumentada, y alguna vez han dejado evidencias de haber acechado al jabalí.

2.9.- Procesos ambientales y riesgos naturales

A la vista de los bien desarrollados conos aluviales del área se podría pensar que las peligrosas avenidas de tipo “debris flow” que los ocasionaron podrían producirse en algún momento. Sin embargo esto es muy poco probable dado que los conos, aparte de presentar en superficie un típico pavimento de piedras, presentan también en su parte baja una elevada concentración de cantos y bloques en superficie que indica el carácter no activo del cono aluvial (Colombo, 1989), lo que se confirma también por la incisión profunda a que están sometidos. Harvey (1984) considera que estos abanicos aluviales debieron formarse a finales del Pleistoceno entre el término de la última glaciación y el principio del Holoceno, cuando la red de drenaje se ha ido encajando progresivamente.

La estabilidad estructural de los suelos del área es muy baja, por lo que cualquier perturbación externa (lluvia torrencial, labranza) puede ocasionar su erosión acelerada.

2.10.- Erosión de suelos

Los suelos de la parte baja de la ladera, en su estado natural (como campo agrícola abandonado), están protegidos por un pavimento de piedras, por lo que las tasas de erosión por lluvia, en ausencia de esorrentía, son poco significantes, del orden de $0,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. En la parte alta, la dispersa cobertura de esparto ha formado un sistema de gradines o terracitas en donde también se ha desarrollado un pavimento de piedras, si bien la mayor pendiente da lugar a mayores tasas de erosión, aunque también de muy baja magnitud, del mismo orden que las anteriores. Cuando de manera experimental, simulando una operación de labranza, se mezclan homogéneamente los 15 cm superficiales de suelo, las tasas de erosión ante una lluvia intensa (60 mm h^{-1} , período de retorno de 10 años según Elias Castillo y Ruiz Beltrán, 1979) se multiplican por 1000, alcanzándose 100 t ha^{-1} en un solo episodio lluvioso (Solé Benet et al, 2002), si bien, el pavimento de piedras se reconstruye en unos pocos meses con lluvias naturales protegiendo de nuevo al suelo como en su estado inicial de campo abandonado.

Aparte de este proceso que suele caracterizar a los suelos que recubren los abanicos aluviales, se producen en la zona otros procesos de erosión de suelos:

Uno de ellos es la sufusión que afecta a las terrazas de banco amplio, de formación progresiva (2000 años de antigüedad según Puigdefábregas, 1998), alimentadas periódicamente por las boqueras de la rambla. Por su rango granulométrico en general estrecho, debido a la decantación de los elementos gruesos que se produce aguas arriba, y a los macro- y giga-poros debidos a la meso- y macro-fauna, los gradientes hidráulicos en dichos poros en condiciones de avenida son suficientes para crear túneles (mecanismo de sufusión) que, al irse acelerando por el abandono agrícola, llega a provocar elevadas tasas de erosión local e incluso la destrucción de la terraza por colapso.

También las terrazas de banco estrecho que cubren algunas laderas sufren del efecto del abandono agrícola: la falta de mantenimiento de los muros de mampostería en seco da lugar a cárcavas que aceleran la pérdida de suelo e incluso la pérdida del bancal.

2.11.- Salinización

Debido a la baja salinidad de roca madre y a las buenas condiciones de drenaje, no se produce salinización del suelo.

3.- Investigación desarrollada, infraestructura científica, metodologías usadas, etc.

Desde 1989, año de establecimiento del área experimental, diversos proyectos consecutivos de la Dirección General de Conservación de la Naturaleza (LUCDEME), de los Planes Nacionales de I+D (DESERMA, PROHIDRADE, EPOHIDRO, PROHISEM, ECONEXUS) y de la Comisión Europea (MEDALUS, PESERA y GEORANGE) 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.

Los objetivos generales que se han mantenido desde su puesta en funcionamiento han sido: 1) conocer la respuesta hidrológica y erosiva ante las precipitaciones en un contexto de abandono agrícola; y 2) conocer las relaciones interactivas entre procesos geomorfológicos, evolución del suelo y vegetación en medio árido y semiárido.

En el curso de los proyectos llevados a cabo total o parcialmente en sus instalaciones diversos objetivos específicos han tratado de responder a las siguientes preguntas: a) cuál es el mínimo número de variables hidrológicas que deben intervenir en un modelo de simulación hidrológica para zonas semiáridas, b) cómo intervienen los distintos tipos de superficie del suelo en la respuesta hidrológica de una pequeña cuenca, c) cómo se forman las costras filtrantes y cuál es su papel en la infiltración, escurrimiento y erosión a diferentes escalas, d) cuáles son las propiedades micromorfológicas, físicas y mineralógicas del suelo, e) cómo evoluciona la humedad del suelo en condiciones naturales y agrícolas tradicionales, f) cuáles son las interacciones entre escurrimiento, tránsito de sedimentos y estructura espacial de la vegetación a escala de ladera, g) cómo varía en el espacio y temporalmente la estructura y productividad de comunidades vegetales, h) cómo se estima o mide la evapotranspiración real en ambientes con vegetación dispersa, i) cómo se estima o mide la partición de lluvia por la vegetación (intercepción, translocación y escurrimiento cortical).

El sistema de ladera se considera un tratamiento metodológico en gran parte de los estudios realizados. Los métodos utilizados se pueden dividir en los tipos siguientes:

1) mediciones directas en el campo:

En la mayoría de los casos fueron muestreos estratificados con objeto de recoger las variaciones particulares de cada una de las dos posiciones originadas por la vegetación dispersa, bajo matas y en claros. Se pueden dividir en dos grandes grupos:

a) tomadas una sola vez, como la densidad aparente y la conductividad hidráulica del suelo, o la cobertura vegetal y las frecuencias de especies en los balates;

b) periódicas, que a su vez se dividen entre tomas de datos manuales o instrumentales más o menos automáticas. Entre las primeras está la recogida de sedimentos procedentes de parcelas de erosión o de pequeñas cuencas, o la recogida de hojarasca, y de datos de la vegetación: en distintos momentos (estacional o anualmente) se cosecharon a mano, según diseños experimentales preestablecidos (Cammeraat, 1992), distintos elementos vegetales (herbáceas, tallos, ramas, flores, necromasa, etc.) para determinar el crecimiento de las plantas, o la tasa de descomposición celulolítica en el suelo, entre otros. También ha sido necesario establecer un sistema de marcaje de detalle para llevar a cabo el seguimiento demográfico de individuos, ramas, tallos y hojas. Entre las segundas están el registro automático de valores de sensores de tipo meteorológico o hidrológico, como los sensores de humedad del suelo, o bien el uso de dispositivos como estaciones Bowen y de “Eddy correlation” (método de correlación por remolinos para la medición de la ETR).

2) métodos de laboratorio que incluyen todas las caracterizaciones del agua de escorrentía, sedimentos y suelos, como pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, sales totales y iones solubles, materia orgánica, composición granulométrica, estabilidad de los agregados, límites de Atterberg, contenido en carbonatos totales y yeso, capacidad e intercambio catiónico, agua retenida a 0,01 y 1,5 MPa, mineralogía total y de la fracción arcillosa, micromorfología óptica de suelos y rocas, etc. En el caso de la vegetación, unas muestras recogidas en campo eran empleadas para determinar las especies y otras diseccionadas para obtener el número y/o peso seco de cada componente: mantillo, raíces, hojas, tallos, ramas, flores, etc., así como en ciertos casos el índice de áreas foliar.

3) métodos experimentales que han permitido: a) obtener parámetros de infiltración y producción de sedimentos en parcelas mediante lluvia simulada; b) determinar como la vegetación dispersa intercepta los flujos de agua y sedimentos en un ladera.

4) sistemas de información geográfica que incluyen MDE hasta de 1 m de resolución, y atributos topográficos.

La instalación permanente, cuyos datos hidrológicos se aportan a la RESEL, consta de:

A) una estación meteorológica en la parte baja 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 y neta, cuyo instrumental y frecuencia de toma de datos se detallan en la tabla 1.

Tabla 1.- Datos obtenidos en la estación de Rambla Honda			
DATOS	DISPONIBILIDAD	TIEMPO y/o resolución	METODOS
Meteorología			
Temperatura del aire (Est. Meteor.)	Desde Sep 1989	5 a 10 minutos	semiconductor, telemetría + datalogger
Humedad relativa del aire (Est. Meteor.)	Desde Sep 1989	5 a 10 minutos	sensores capacitivos, telemetría + datalogger
Velocidad del viento (Est. Meteor.)	Desde Sep 1989	5 a 10 minutos	anemómetro rotatorio
Dirección del viento (Est. Meteor.)	Desde Sep 1989	5 a 10 minutos	veleta
Radiación solar total (Est. Meteor.)	Desde Sep 1989	5 a 10 minutos	piranómetro
Radiación solar neta (Est. Meteor.)	Desde Oct 1994	5 a 10 minutos	sensor amplio espectro
Intensidad de lluvia a 1,50 m de altura (Est. Meteor. + parte alta cuenca)	Desde Sep 1989	20 segundos	balancines de 0,28 mm y 0,2 mm, telemetría + datalogger
Intensidad de lluvia a ras de suelo (E. M.)	Desde May 2001	1 segundo	balancín de 0,2 mm, datalogger
Suelos			
Pedregosidad superficial	Dic 91 y Dic 97	2 veces	conteo manual
Rugosidad superficial en parcelas erosión	Nov 92 y Jun 94	única	secciones transversales con teodolito
Descripción de perfiles	1993	única	descripciones de campo
Micromorfología	Nov 92-Abr 95	única	impregnación con resina + microscopía
Granulometría	1993	única	pipeta de Robinson
Densidad aparente	1991 y 1998	única	cilindros y método de la excavación
Conductividad hidráulica saturada	Oct 92-Dic 92	única	método Porchet
Infiltración	Dic 92-Ene 93	única	simulación de lluvia
Propiedades químicas de los horizontes	1991	única	análisis químicos
Repelencia o hidrofobia	2001-02	única	test de penetración de la gota de agua
Clasificación y mapa de suelos (1:5.000), digitalizado	1991 y 1998	única	sistema Soil Taxonomy y FAO
Estabilidad de los agregados	2002-2003	única	tamizado en seco y test de la gota
Influencia del tipo de superficie en θ	1999 – 2000	única	sensores SBIB y datalogger
Génesis costra filtrante y consecuencias	1997 - 1998	única	simulación de lluvia
Hidrología			
Humedad del suelo	Nov 91- Dic 1994	entre 1 y 15 días	método gravimétrico (manual)
Humedad del suelo	Desde Sept 1994	entre 5 y 20 min	sensores SBIB (automático, telemetría)
Humedad del suelo	Desde Mayo 2001	cada 30 min	sensores SBIB (automático, datalogger)
Escorrentía y sedimentos en parcelas	Desde Sep 1991	total por evento	manual en parcelas 2 x 10 m cerradas, + laboratorio
Escorrentía en parcelas	Desde Mayo 1994	tiempo cada 0.5 L	automático telemetría en parcelas cerradas
Escorrentía en parcelas	Desde Mayo 2001	tiempo cada 0.5 L	automático datalogger en parcelas cerradas
Escorrentía y sedimentos en cuencas	Desde May 1994	cada evento	manual a niveles establecidos + laboratorio
Escorrentía en cuencas	Desde 1992	< 1 min.	automático con sondas de nivel capacitivas, telemetría + datalogger
Erosión en cuencas	1992 -Dic 2003	cada evento	automático a alturas establecidas, telemetría
Análisis de partículas y químico de la lluvia	Sep 91- Dic 2003	eventualmente	pluviómetros y captadores globales
Nivel freático	Feb 92- Dic 2003	eventualmente	medición manual en pozo de sondeo
Evapotranspiración real en 3 comunidades veg	1997 – 2002	campañas	“Bowen” y “Eddy correlation”
Deposición de rocío	2002	campañas	Eddy correlation
Partición de lluvia	1996	campañas	embudos y anillos recolectores de agua
Topografía			
Topografía de ladera	Oct-Dic 91	única	sección transversal con teodolito
Mapa topográfico (1:500), digital	Verano 1992	única	restitución fotografías aéreas(1:3500)
Modelo digital del terreno a 1 m	Verano 2001	única	programa ANUDEM
Geología			
Mapa geológico 1:10.000, digitalizado	2000	única	cartografía de campo convencional
Vegetación			
Fenología	1992-97		observación de campo
Biomasa de plantas anuales	1992-97		trampas colectoras

Biomasa de plantas perennes	1992-97		estimas alométricas
Biomasa de raíces gruesas	1992		estimas alométricas
Biomasa de raíces finas	Agosto 91 y Mayo 92		muestras volumetricas de suelo
Producción primaria neta y LAI de tallos	1992-97		muestreo de tallos
Hojarasca	1991-97		trampas colectoras
Cobertura de anuales	1991-93		trampas colectoras
Cobertura de perennes	1992-02		fotos aéreas y satélite (IKONOS)
LAI de perennes	1996-02		intercepción de radiación
Actividad celulítica	1992-94		tiras de algodón
Ecofisiología			
Contenido relativo de agua en hojas y tallos	1990-92	Campañías	muestras de hojas y tallos
Potencial hídrico	1990-92	Campañías	cámara de presión
Conductancia estomática	1992-02	Campañías	IRGA
Conductancia de suelo	1998-02	Campañías	lisímetros
Conductancia aerodinamica suelo/vegetación	1998-02	Campañías	balance de energía de réplicas foliares y sensores en suelo calentados
Fotosíntesis neta	1992-02	Campañías	IRGA
Fluorescencia	1992-04	Campañías	fluorímetro

B) tres cuencas encajadas, cada una de las cuales con equipamiento propio consistente en: un aforador de tipo H equipado con medidor de nivel capacitivo y un balancín a la salida para medir caudales bajos; un doble sistema de muestreo del caudal en diferentes momentos de la crecida (para sólidos en suspensión y disueltos) consistente en vasos comunicantes a diferentes alturas que solo muestrean la rama ascendente del hidrograma y en bombas eléctricas que muestrean según un protocolo preestablecido; un tanque de sedimentación a la salida del aforador (para medir el arrastre de fondo) (tabla 1) (Fig 12). La cuenca 3 es la superior, 900 m², que forma la cabecera; la 2 es la intermedia, tiene algo más de 3 ha; la 1 es la general y tiene 4,5 ha.



Fig 12.- Aforador tipo H de 60 cm de altura (capacidad 340 L s⁻¹) en la cuenca principal de Rambla Honda (4,6 ha).

C) 10 parcelas de escorrentía-erosión de 8 x 2 m, instaladas sobre campos de cultivo abandonados (características en tabla 2).

Tabla 2.- Datos básicos de las parcelas

parcelas	altitud (m)	pendiente (%)	cobertura plantas (%)	piedras sup (%)	costra (%)
P1	650	12.5	40	74	0
P2	648	21	65	55	0
P3	655	27,5	20	83	0
P4	690	29	40	62	5
P5	725	33	70	63	0
P6	770	28	70	54	0
P7	773	41	90	51	0
P8	769	23	75	61	0
P9	740	35	80	29	0
P10	695	45	80	56	0
P11a	628	2	26	16	8
P11b	628	2	0	14	16
P12a	632	4	55	32	0
P12b	632	5	6	53	0
P13a	637	5	43	47	0
P13b	637	5	4	64	0
P14a	648	7	48	76	5
P14b	648	9	24	77	5
P15a	662	12	36	68	3
P15b	662	12	22	56	1
P16a	681	20	48	68	5
P16b	681	22	15	76	5
P17a	720	24	40	74	6
P17b	720	23	23	76	17
P18a	730	21	44	57	5
P18b	730	18	30	56	16
P19a	752	21	32	82	6
P19b	752	23	29	69	4

D) 9 áreas de medida de 30 x 30 m, 3 por unidad fisiográfica, dentro de cada una de las cuales hay 2 parcelas cerradas de escorrentía-erosión de 10 x 2 m (Fig 13a), una con vegetación rala y otra con vegetación densa. Cada parcela dispone en su parte inferior de un canal que recoge el agua y los sedimentos (Fig 13b) que se llevan a un doble sistemas de depósitos de 200 L el primero de los cuales está equipado con un divisor de flujo. Tres pares de parcelas, una en cada unidad fisiográfica, disponen además de un balancín para registrar en continuo el flujo del agua. Junto a cada par de parcelas hay grupos de sensores que registran la humedad y la temperatura del suelo a tres profundidades.

En cada una de las áreas de medida se ha abierto, descrito y muestreado un perfil de suelo y analizado sus horizontes, determinado la conductividad hidráulica saturada con el método de Porchet modificado por Kessler y Oosterbaan (1974) así como la infiltración mediante simulación de lluvia sobre superficies desnudas y vegetadas.

En cada una de dichas áreas, entre 1991 y 1997 se han llevado a cabo los numerosos muestreos sistemáticos de vegetación. Las principales variables recogidas para describir la estructura de la vegetación fueron la cobertura, biomasa, densidad y distribución espacial de perennes y anuales, así como la necromasa de perennes y la riqueza específica de anuales. El seguimiento de la dinámica vegetal consistió en la estimación

(interanual e intra-anual) de la productividad, área foliar, desfronde, senescencia y mortalidad, así como la fenología y demografía de diferentes niveles arquitecturales (hojas, tallos, ramas e individuos). A partir de todas estas variables se calcularon diversos índices muy útiles que delatan la eficiencia y estrategia de crecimiento de cada comunidad vegetal para la supervivencia en un medio deficitario en agua. Además en cada una de las áreas se ha determinado parámetros de escorrentía e infiltración en un campaña específica de simulación de lluvia.



Fig 13.- Parcelas de escorrentía-erosión de 2 x 10 m en la zona de medida nº12.

a) La 12A tiene mayor cobertura vegetal que la 12B. Se observa al fondo un pluviómetro totalizador y en primer término un trípode que sostiene i) la caja impermeable conteniendo los dispositivos electrónicos que registran tanto la humedad del suelo como la escorrentía en continuo de las parcelas y ii) dos paneles solares que alimentan una batería de 12 V (dentro de la caja sobre el suelo).

b) detalle del canalón de recogida de agua y sedimentos.

E) Cuatro piezómetros en un transecto perpendicular al cauce principal de la rambla, desde el borde de la misma hacia la ladera, con profundidad hasta el fondo del cuerpo sedimentario; uno de ellos fue inutilizado en 1997 por una avalancha de sedimentos.

Aparte de la instalación permanente y/o de los datos que se aportan a la RESEL, se llevan a cabo diversas acciones para complementar a las anteriores en el conocimiento geo-ecológico de la zona. Estas campañas específicas de medida se refieren a:

A) Evapotranspiración. El flujo de la evapotranspiración (ETR) es un importante componente del balance hidrológico y se forma por la evaporación de agua del suelo, la transpiración de la vegetación, la evaporación del agua de lluvia retenida fundamentalmente por la vegetación (intercepción de lluvia) y, en algunos casos, el agua libre evaporada desde lugares que la retienen (por ejemplo, zonas pantanosas). Debido a la complejidad del proceso, se ha llegado incluso a sugerir el uso del termino 'evaporación' en vez del de 'evapotranspiración' (Savenije, 2004). Su estudio es esencial en el análisis de los balances hidrológicos de sistemas tanto agrícolas como naturales y permite un mejor conocimiento para el manejo de la vegetación y de la interfase suelo-atmósfera. Su medida directa suele ser difícil y costosa en tiempo y dinero por lo que se hace indispensable recurrir a la modelización. Entre los diversos modelos que se han desarrollado en las ultimas décadas para estimar ETR, el más

conocido de ellos es el modelo de evaporación de una sola fuente de Penman-Monteith (Monteith, 1965), que usa tanto información micrometeorológica como fisiológica y asume que las copas vegetales pueden asimilarse a una superficie uniforme ('big-leaf'). La distribución dispersa, y agrupada en mosaicos de vegetación, característica de las zonas semiáridas no satisface las premisas de la aproximación de Penman-Monteith, por lo que el modelo fue extendido a dos o más fuentes por distintos autores (Shuttleworth y Wallace, 1985; Choudhury y Monteith, 1988; Shuttleworth y Gurney, 1990; Brenner e Incoll, 1997).

En el marco de dos proyectos CICYT ('Modelización de la evapotranspiración real sobre vegetación dispersa en clima semiárido', ref. CLI95-1874 y 'Modelización del balance de energía en áreas espacialmente heterogéneas de clima semiárido', ref. CLI99-0835-C02-02) coordinados con el grupo de Física de la Atmósfera de la Universidad de Granada, se ha desarrollado un modelo de evapotranspiración adaptado a las condiciones de cubiertas vegetales abiertas, propias de las regiones semiáridas.

Para el desarrollo del modelo se partió de los trabajos realizados por Brenner e Incoll (1997) parametrizándolo y validándolo a través de una serie de experimentos de campo que permitieran su aplicación a rodales de las especies vegetales características del sudeste semi-árido español (Domingo et al., 1999; Villagarcía, 2000). En concreto se trabajó en tres aspectos del modelo: (a) balance radiativo (b) resistencias aerodinámicas del suelo y (c) resistencias superficiales del suelo. Los experimentos de campo se realizaron en parcelas representativas de *Retama sphaerocarpa*, *Anthyllis cytisoides* y *Stipa tenacissima* en el área instrumental de Rambla Honda (Tabernas, Almería). El modelo considera tres fuentes que integran el flujo evaporativo, las cubiertas vegetales, el suelo entre la vegetación y el suelo bajo el dosel de la vegetación. Opera a resolución temporal elevada (minuto-hora) y requiere información detallada, tanto meteorológica (velocidad del viento, radiación global incidente, temperatura, tensión de vapor, humedad del suelo) como fisiológica y estructural de la vegetación (Domingo et al., 1999; Villagarcía, 2000; Villagarcía et al., 2001). El modelo permite conocer, además de la ETR total, la partición de la evaporación, es decir la evaporación de cada superficie (planta, suelo bajo copa y suelo desnudo).

La validación del modelo se llevó a cabo con medidas de ETR mediante dos métodos, el de Bowen (BREB: *Bowen ratio energy balance*) y el de la correlación de remolinos (*Eddy correlation o covariance*).

También se estudió la posibilidad de ampliar el ámbito de aplicación del modelo analizando los problemas de agregación espacial de flujos en condiciones semiáridas y por tanto extremas en comparación con otros trabajos precedentes realizados por otros autores. Para ello se realizaron medidas de los componentes del balance de energía, flujos de calor sensible y latente, calor al suelo y radiación neta y para la caracterización fisiológica de la vegetación durante un periodo de tiempo que cubrió ampliamente un año hidrológico, sobre rodales de vegetación de gran contraste y adyacentes. La posibilidad de determinar el flujo de evapotranspiración a partir sensores remotos se evaluó con medidas de temperatura infrarroja y medidas directas del resto de los flujos que intervienen en el proceso de la ETR.

Desde el punto de vista experimental, el diseño instrumental se basó en la disposición espacial de tres equipos de Correlación de remolinos (*Eddy Correlation*), equipados con anemómetros sónicos tridimensionales e higrómetros de Krypton. Dos de los equipos se instalaron en dos parcelas adyacentes, una de vegetación herbácea y otra de *Retama sphaerocarpa* y el tercer equipo en una torre a mayor altura que integraba instrumentalmente los flujos correspondientes al conjunto y que se usó de validación.

Para las medidas de intercepción y partición de agua de lluvia por la vegetación se realizaron experimentos tanto con lluvias naturales como con lluvia artificial simulada, en los que se midieron las variables microclimáticas y los volúmenes de cada flujo con pluviómetros de polietileno colocados bajo la vegetación.

B) Microtopografía en las 28 parcelas de escorrentía-erosión (medidas altitudinales con precisión milimétrica cada 20 cm).

C) Cobertura de fragmentos líticos (gravas, piedras, etc.), distribución por tamaños y posición respecto a la superficie (encima o incrustadas), en las 28 parcelas de escorrentía-erosión.

D) Hidrofobia o repelencia al agua del suelo en diferentes campañas al final del verano, mediante el método del tiempo de penetración de la gota de agua (Contreras y Solé-Benet, 2003).

E) Perturbación de la superficie de suelo (quema de la vegetación, eliminación del pavimento de piedras, labrado) y determinación de su comportamiento (escorrentía, erosión y evolución de la humedad del suelo) (Solé-Benet et al., 2002).

F) Medida de la deposición global (pH, conductividad eléctrica y alcalinidad de la precipitación y peso y mineralogía de su residuo seco) (Queralt et al., 1993).

4.- Resultados obtenidos

4.1.- Series temporales, frecuencia de datos, eventos representativos y/o importantes

En las Figuras 14 y 15 se representan dos eventos representativos, con mecanismos de escorrentía diferentes. En la Fig 14 se representa el evento de lluvia el 11 de Septiembre de 1996 en el cual los horizontes superficiales del suelo (medidos hasta 15 cm) están muy húmedos, cercanos a la saturación, debido a los 22,5 mm caídos el día anterior con una intensidad promedio de 3 mm h^{-1} (muy por debajo de la capacidad máxima de infiltración). La lluvia del 11 de Septiembre, mucho más intensa (13 mm en unos 20 minutos), causó escorrentía por saturación del suelo a partir de sus capas subsuperficiales. La escorrentía se produce en primer lugar a nivel local: primero en la parcela 18B, en la parte alta de la cuenca (suelo somero y humedad volumétrica del 38% en dicho momento), seguida un minuto después por la parcela 15B (suelo profundo de la parte alta del cono aluvial) y cuatro minutos después por la 12B (suelo muy arenoso y más profundo de la parte baja de la catena). Destacan considerablemente las diferencias entre las tasas de escorrentía i sus totales en las tres parcelas a lo largo de la catena. En segundo lugar y casi en el mismo momento que la parcela 18B, se registra caudal en F2 (aforo de la cuenca intermedia), aunque debido a los numerosos afloramientos rocosos en el propio cauce, caudal que no aumenta significativamente hasta pasados 9 minutos del inicio del evento, algo después de que se registre un pico de escorrentía significativo en F3 (subcuenca superior).

Las máximas intensidades de escorrentía a nivel de cuenca (entre 4 y 8 mm h^{-1}) son un orden de magnitud inferiores a las intensidades en las parcelas 15 y 18 (entre 30 y 45

mm h⁻¹). La baja escorrentía en la parcela 12B se explica por su textura mucho más arenosa que los demás suelos de la catena y su mayor profundidad y menor pendiente.

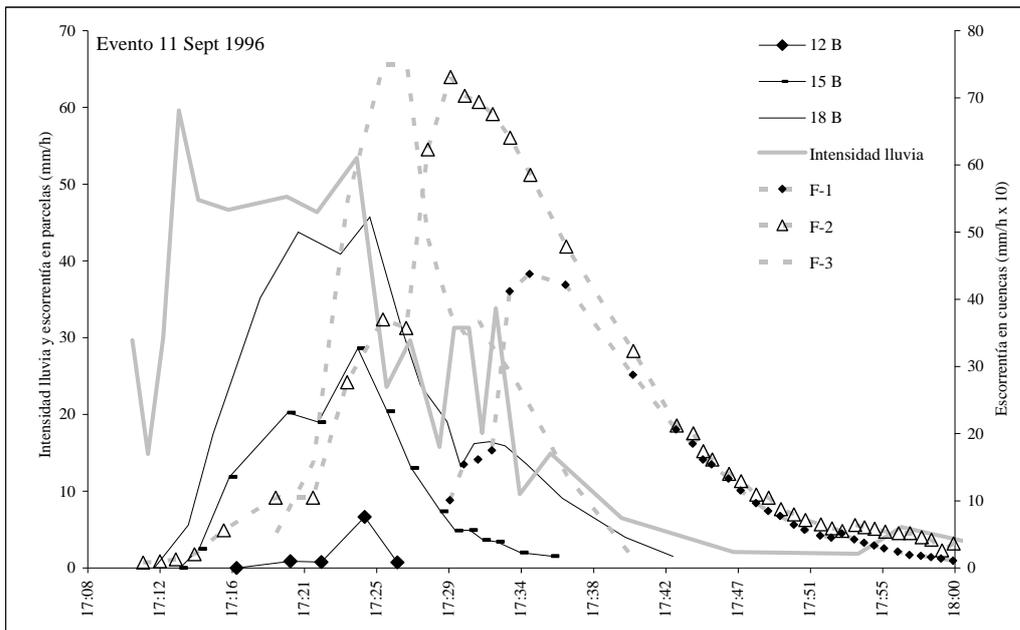


Fig 14.- Evento del 11 de Septiembre de 1996 en el que se produce escorrentía por saturación desde el horizonte sub-superficial. El día anterior llovieron 22,5 mm y durante este evento 13 mm. Se registra escorrentía en todas las parcelas y en todos los aforadores de la cuenca.

Este tipo de evento, de escasa frecuencia (en promedio menos de dos por año), sólo se produce cuando la magnitud y/o intensidad de la lluvia son grandes.

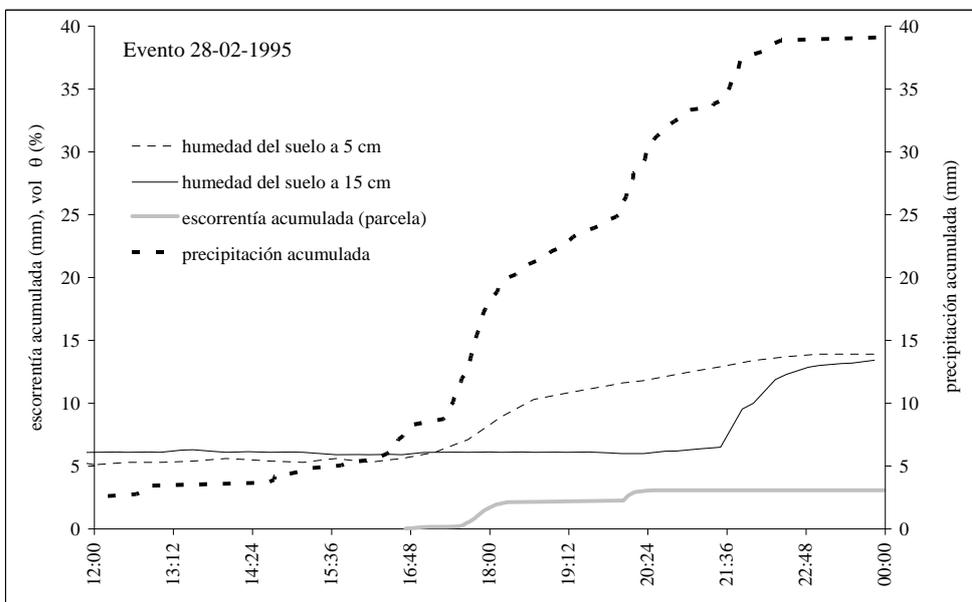


Fig 15.- Evento del 28 de Febrero de 1995 en el que se produce escorrentía por saturación de la capa superficial del suelo (de tipo hortoniano). Sólo se registra en las parcelas y no el cauce.

En la Fig 15 se representa un típico evento de lluvia en el que se produce escorrentía de tipo Hortoniano, a nivel local, por saturación del horizonte más superficial, sin que se alcancen los cauces. Se observa como se registra un aumento de humedad en el suelo a

5 cm de profundidad, casi paralelo con la escorrentía en la parcela. Sin embargo el aumento de humedad a 15 cm de profundidad no se registra hasta una hora después del final de la escorrentía. Este tipo de evento es el más frecuente en Rambla Honda, registrándose escorrentía en la parcelas pero no en los cauces, lo que indica que la mayor parte del agua escurrida se reinfiltra aguas abajo (Puigdefábregas et al, 1999).

Según la época del año en que se produzca el evento y la magnitud e intensidad de la precipitación, la magnitud de la escorrentía varía según las parcelas (Fig 16): en general producen mayor escorrentía las parcelas de la parte alta y media de la catena (nº 18 y nº 15, por este orden) que las de la parte baja (nº 12). Sin embargo, a finales del verano, cuando la repelencia del suelo es máxima en suelo de retama, eventos de pequeña magnitud e intensidad media o alta producen mayor escorrentía en las parcelas de la parte baja (nº 12) seguidas por las de la parte media y alta (nº 15 y nº 18, por este orden) de la ladera. En general las parcelas con vegetación rala producen más escorrentía que las de vegetación densa, con la excepción de la nº 15A que escurre más que la nº 15B debido a la particular estructura espacial de sus cubiertas vegetales: la nº 15A presenta largas bandas sin vegetación en la dirección de la pendiente, que favorecen la escorrentía, mientras la nº 15B tiene la menor cobertura vegetal concentrada en la parte baja de la parcela, favoreciendo la infiltración justo antes que los flujos de agua alcancen la canaleta.

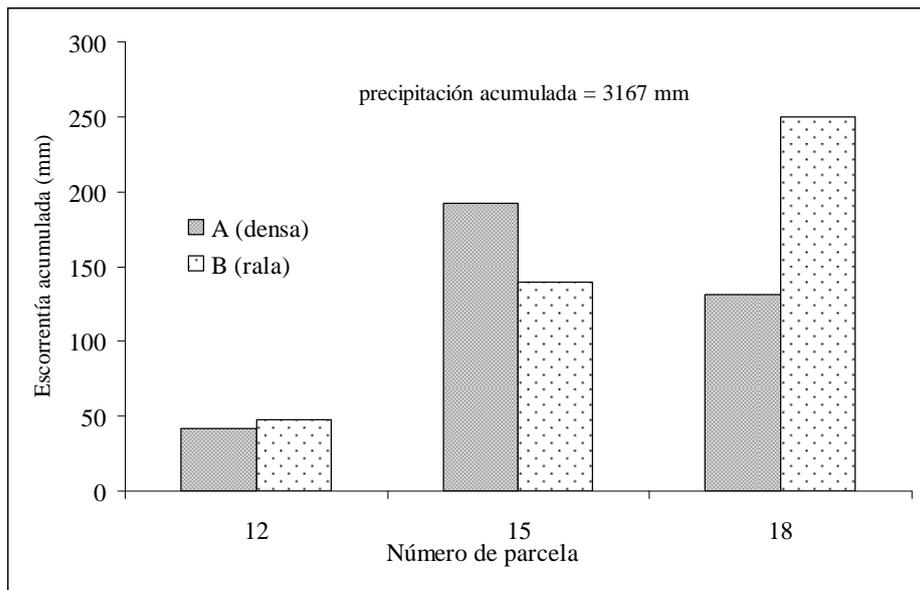


Fig 16.- Escorrentía total en 14 años en las parcelas 12, 15 y 18 de Rambla Honda.

4.2.- Patrones de vegetación, productividad primaria y necromasa

Las tres comunidades vegetales descritas en la catena, dominadas por *Retama sphaerocarpa*, *Anthyllis cytisoides* y *Stipa tenacissima*, así como el estrato herbáceo asociado, son las que dominan el territorio, y han sido estudiadas desde el punto de vista estructural y de su productividad (Gutiérrez, 2000). La vegetación sigue un modelo de distribución dispersa y en el área experimental se trata como un elemento activo más, complejo y a considerar en los procesos hidrológicos y erosivos.

Aparte de la descripción de la dinámica de la vegetación debida a factores intrínsecos, se ha puesto especial interés en conocer la respuesta de la misma ante las propiedades y procesos relacionados con la disponibilidad hídrica en el suelo y las variaciones que resultan de la distribución de las condiciones climáticas, especialmente de la precipitación. En el análisis de esta respuesta se ha tenido en cuenta los cambios espacio-temporales debido a la heterogeneidad de microhábitats que impera dentro del territorio.

En general, la mayor humedad y capacidad de almacenamiento de agua, junto a mayores contenidos en materia orgánica en la ladera favorecen, más que diferencias en la composición de la vegetación, divergencias en la estrategia de crecimiento. Solo algunas de las variables (como la biomasa de anuales en los claros, la biomasa leñosa y total, y la producción de tejido no leñoso de perennes) pueden ser analizadas conjuntamente en el sistema de ladera, con independencia del tipo de vegetación considerado. En este grupo de atributos se observa un gradiente creciente de sus valores desde la base de la catena, sugiriendo condiciones de crecimiento más óptimas en la ladera rocosa. Las variaciones espaciales de la Biomasa responden mejor a la estabilidad de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo mientras que los atributos de productividad se adaptan más a la variabilidad de la humedad edáfica.

La mayor parte de las diferencias detectadas en la estructura de las tres comunidades se deben principalmente a las características propias de cada especie vegetal. Las especies perennes muestran una lenta evolución temporal, en algunos aspectos poco relacionada con la disponibilidad de agua del año en curso, como es el caso de la cobertura o la biomasa de tejido leñoso. En las herbáceas anuales las variaciones son más rápidas, siendo otoño y primavera las estaciones que más inciden en su respuesta y condicionan su crecimiento o evolución (medido como incremento de biomasa o cobertura). Los años más secos afectan más a la biomasa de herbáceas de la ladera que del abanico, en consonancia con las también mayores variaciones de humedad de la ladera. Así mismo, las herbáceas anuales están fuertemente condicionadas por las perennes que le acompañan, especialmente en las posiciones bajo mata. La cobertura y biomasa de herbáceas bajo mata y en claros disminuye progresivamente desde la zona de *Retama* a la de *Stipa*, al igual que la diferencia relativa entre ambas posiciones. La variabilidad espacial de la biomasa bajo mata es en cualquier caso mayor que en los claros y se correlaciona negativamente con la variabilidad de la riqueza específica. *Retama sphaerocarpa* presenta notable relación de facilitación respecto a las plantas en su mayoría anuales bajo su copa (Pugnaire et al., 1996)

Las relaciones de regresión establecidas entre los diferentes atributos de la productividad con la disponibilidad temporal de agua (Gutiérrez, 2000) muestran que la etapa húmeda (otoño e invierno) es mucho más importante en el crecimiento neto de las plantas perennes que el periodo estival (verano). El otoño es la estación climática más determinante en la evolución de la vegetación, siendo la evapotranspiración real (calculada como diferencia entre precipitación, escorrentía y variación hídrica del suelo) la variable que mejor explica su comportamiento. Solo algunos atributos como el incremento de biomasa de *Stipa tenacissima* y la duración del crecimiento pueden estar más influidos por el verano. La importancia del otoño se basa en su situación de inicio dentro del ciclo de crecimiento y del ciclo climático anual. La incidencia del verano se manifiesta más en el ciclo siguiente que el del año en curso ya que participa (al igual que el otoño) en la determinación de la disponibilidad de estructuras de crecimiento en la etapa que se inicia. El efecto de ambos periodos (húmedo y seco) está fundamentado en la previsión de la disponibilidad de agua para las plantas, sobre todo en la previsión

de la sequía estival que está totalmente internalizada y por tanto los ciclos vegetativos adaptados a ella.

Anthyllis cytisoides muestra una mayor sensibilidad a las variaciones de disponibilidad de agua, que se manifiesta por la propia respuesta fenológica a las variaciones climáticas. Independientemente de la especie, la sensibilidad aumenta conforme disminuye el nivel estructural considerado (desde individuo a hoja, pasando por rama y tallo). *Retama sphaerocarpa* se puede considerar más independiente del ritmo de precipitaciones, debido a su capacidad para acceder a niveles muy profundos del sustrato, y obtener así aportes de agua “complementarios”. En esta especie, la precipitación se relaciona inversamente con la producción de flores y frutos. *Stipa* muestra gran sensibilidad a las lluvias de pequeño volumen, lo que a su vez la hace más dependiente de las condiciones hídricas durante el verano, al menos en cuanto al incremento final de biomasa. Pero se muestra más eficiente en el uso del agua. Sin embargo, el coste energético es superior y consiste en mantener activo una gran cantidad de tejido fotosintético durante el mayor tiempo posible. Este tejido está sumamente adaptado a evitar la pérdida de agua gracias a su estructura y morfología. Muchas de estas adaptaciones son la causa de que *Stipa* presente la tasa más baja de desaparición del mantillo, una tasa lenta de descomposición y por consiguiente los tiempos de residencia más altos, lo que no impide que se atiendan unos requerimientos nutricionales elevados.

El estudio demográfico de los individuos de *Retama* y *Anthyllis* delata la existencia de un reclutamiento episódico de plántulas, aunque con una dinámica diferente para cada una de las comunidades en función de las condiciones hídricas. Este fenómeno pone de manifiesto la importancia de la existencia de fluctuaciones climáticas con periodos húmedos y secos alternantes: los periodos húmedos favorecen el reclutamiento en ambas especies, pero los periodos secos solo favorecen el reclutamiento en *Anthyllis* debido a su capacidad para rebrotar a partir de las raíces de los individuos senescentes. Por otro lado, las estaciones iniciales como el otoño influyen más en los individuos jóvenes, mientras que los adultos están más condicionados por la disponibilidad de agua en invierno y primavera.

Stipa está directamente mejor adaptada, a costa de mantener un alto potencial fotosintético relativo. La estrategia de *Retama* consistente en seleccionar el sitio con mayor disponibilidad de agua (de hecho en nuestra área se comporta casi como un freatofito), le permite prolongar el crecimiento hasta el verano, a costa de contrarrestar las elevadas temperaturas. La adaptación de *Anthyllis* consiste en acompasar el momento de crecimiento a los periodos más favorables de precipitaciones, lo que le permite cierta falta de control en la evapotranspiración real.

El análisis de la serie de 30 años de precipitaciones en Tabernas (Lázaro et al., 2001) indica que los resultados obtenidos en los seis años estudiados podrían no ser representativos ni extrapolables a la serie completa ya que las fluctuaciones periódicas hacen más favorable para la vegetación el final de dicha serie (coincidiendo con este estudio). Además, la distribución estacional de las precipitaciones extremas también indica una etapa final más óptima por la menor presencia de otoños deficitarios. A partir de la predicción del incremento de biomasa para la serie de 30 años se puede deducir que *Retama* y *Anthyllis* están en fase de expansión de su biomasa, mientras que *Stipa* se encuentra más cercana al estado de equilibrio. El fenómeno de acumulación de necromasa y los análisis de la edad con la biomasa leñosa en *Retama* y *Anthyllis* apoyan

este resultado, ya que indican que la etapa madura epigea se sitúa por encima de los 20 años, edad superior al valor promedio de la parte aérea de nuestros ejemplares durante la etapa en la que se realizaron estos estudios. Esta distribución y la dinámica actual de uno u otro tipo de vegetación viene determinada (al menos parcialmente) por el uso antrópico en el pasado. Como consecuencia, *Stipa* se encuentra en un estado de equilibrio dinámico propio de estos ambientes, en comparación con las otras dos comunidades cuya instalación fue más reciente, tras el abandono agrícola.

4.3.- Áreas fuente y sumidero de sedimentos.

A escala de metro cuadrado o parcela se ha estudiado la formación acelerada y el comportamiento hidrológico-erosivo de una costra filtrante (o pavimento filtrante) en suelos arenosos de origen aluvio-coluvial, sobre micasquitos. Treinta milímetros de lluvia artificial entre 60 y 100 mm/h de intensidad sobre una parcela recién labrada son suficientes para iniciar la reconstrucción de una costra-filtrante, cuyo grado de desarrollo después de un año de lluvia natural es ya muy similar al que se observa después de 20 años de abandono agrícola. Las tasas máximas de erosión (100 t ha^{-1}) se producen entre los 10 y 20 minutos de lluvia y las mínimas ($< 1 \text{ t ha}^{-1}$), en los diez primeros minutos después de labrar y también una vez restablecido el pavimento filtrante (Solé Benet et al, 2002).

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 (Sánchez y Puigdefábregas, 1994). El efecto de la estructura espacial es dinámico y específico de cada especie. Es particularmente significativo en hierbas perennes que forman macollas porque tienen una amplia y densa base en contacto con el suelo y son capaces de interceptar un significativo porcentaje de escorrentía y de sedimentos. Puigdefábregas & Sánchez (1996) señalan valores de interceptación de sedimentos del 50% para *Stipa tenacissima*. Esta retención de sedimentos interactúa con el crecimiento de las plantas y ayuda a la formación de estructuras en bandas de vegetación a lo largo de la ladera, lo cual retroalimenta positivamente la acumulación de sedimentos. Más allá de un cierto umbral de flujo de sedimentos las estructuras de vegetación se desorganizan, se inicia la formación de surcos y la salida de sedimentos aumenta considerablemente (Puigdefábregas & Sánchez 1996).

Los caminos que se han formado por el paso recurrente de los vehículos de mantenimiento del área experimental (frecuencia estimada de 40 pasos al año) han sido la causa de cárcavas profundas en zonas de pendiente superiores a 10° , lo que ha motivado el abandono de caminos y la abertura de nuevos que probablemente tendrán la misma suerte.

4.4.- Medida y modelización de la evapotranspiración.

El modelo se ha aplicado con éxito para determinar el balance y la recarga potencial, en un sector de rambla en el área experimental de Rambla Honda (Domingo et al., 2001). Se trataba de evaluar los componentes del balance hídrico en un sector de cauce de 0.71 km^2 , poblado por *Retama sphaerocarpa* con una fracción de cobertura de 0.30 – 0.35 y cuyas raíces alcanzan la base del depósito (Haase et al. 1996). El área de las dos laderas que vierten directamente al cauce analizado es de 1.67 km^2 y el área total de la cuenca,

cuya cabecera se sitúa en la parte alta de la Sierra de Filabres, es de 32 km². El relleno sedimentario del cauce presenta un espesor máximo de 30 m y los piezómetros instalados desde hace 15 años, no detectan la presencia de zonas saturadas en su interior. El balance hídrico local ($D = P - E_a$) se determinó retrospectivamente, durante tres años (1994-1997) utilizando el modelo de ETR. El drenaje anual muestra un déficit 100 mm, debido a que la evaporación real excede a la precipitación, mientras que las aportaciones de las laderas colindantes y de la cuenca global, durante el periodo considerado se estimaron en 7 mm y 160-400 mm anuales respectivamente.

Estos resultados permiten concluir que, aún en ausencia de circulación subálvea, el sector de cauce considerado, además de la precipitación directa, recibe más de 100 mm de agua, procedentes, casi en su totalidad, de avenidas efímeras que se generan en la cabecera de la cuenca. La aportación de las laderas adyacentes al cauce tiene muy poca importancia cuantitativa.

En relación a la ampliación de la aplicabilidad del modelo de ETR, los resultados obtenidos en cuanto a la agregación temporal han permitido, en primer lugar, analizar el grado de estabilidad temporal del modelo de evapotranspiración. Para ello se ha realizado la agregación de sus variables exógenas a distintas resoluciones temporales y se ha estudiado la tendencia de las correlaciones entre las estimas de evapotranspiración, obtenidas a partir de las variables agregadas y sin agregar, frente a la resolución temporal. Se ha comprobado que las correlaciones disminuyen y el error relativo de las estimas aumenta a partir de la resolución temporal de 12 horas, siendo aún muy razonable (< 10%) a 24 h (Were et al., 2001). Todo ello muestra que el modelo puede ser utilizado con bastante confianza a resoluciones temporales entre 20' (en la que fue validado) y 24 h, lo que hace que se pueda usar con variables climáticas obtenidas con estaciones meteorológicas estándar

Actualmente se está estudiando la agregación espacial, para la obtención de flujos de áreas cada vez más extensas y heterogéneas. La heterogeneidad se puede presentar a distintas escalas de forma tal que, en un rodal determinado de vegetación dispersa pero donde predomina un tipo de vegetación, la heterogeneidad la encontramos entre el suelo y la planta. Sin embargo a escalas mayores, la heterogeneidad se presenta al incluir rodales o parcelas con distintos tipos de vegetación. A esta mayor escala los flujos agregados se pueden obtener fundamentalmente de dos formas. Por un lado, se puede llevar a cabo la agregación de los flujos medidos en cada una de las parcelas y obtener los flujos agregados del total del área. Por otro lado, se pueden obtener los parámetros efectivos característicos de toda el área y con ellos calcular el flujo total. Nosotros hemos trabajado la primera aproximación mediante el análisis de los flujos de calor latente y sensible medidos con los tres sistemas *Eddy Correlation*. El análisis de toda esta información se ha desarrollado en el marco de una Tesis Doctoral de reciente lectura (Were, 2005).

En el marco de los mismos proyectos mencionados en el apartado 3, se evaluó también la posibilidad de determinar el flujo de evapotranspiración a partir de medidas del flujo sensible a través de sensores remotos de temperatura infrarroja y medidas directas del resto de los flujos que intervienen en el proceso. El flujo de calor sensible se obtuvo a partir del cociente entre la diferencia de temperatura radiativa de superficie y la temperatura del aire con la resistencia aerodinámica. Este método había sido desarrollado y validado sobre cultivos densos, pero necesitaba ser parametrizado y reformulado para condiciones de vegetación dispersa semiárida, para lo que se precisa

incluir un exceso de resistencia que incremente la clásica resistencia aerodinámica. Este exceso de resistencia se ha parametrizado en función del término kB^{-1} (Burke y Stewart, 1997). Sin embargo, los diferentes estudios realizados han mostrado una gran variabilidad de este término en función de características estructurales de las copas y de condiciones meteorológicas. En nuestros proyectos se planteó estudiar el citado exceso de resistencia a través del término kB^{-1} para las tres especies dominantes en Rambla Honda.

Otro componente de la evapotranspiración que ha estudiado el grupo de Desertificación y Geo-ecología es la intercepción de agua de lluvia. Siempre que hay agua sobre la superficie de las hojas, tallos o ramas y sobre el suelo o hojarasca, se produce evaporación directa de la misma. Normalmente la fuente de ese agua es la lluvia, pero en otras ocasiones proviene del rocío o de la intercepción de gotas de nieblas o nubes. La evaporación de esta agua está controlada por factores meteorológicos, aunque la importancia del agua interceptada viene gobernada esencialmente por el área foliar y la capacidad de ésta para retener agua. El proceso por tanto es complejo y diversos grupos de investigación en los últimos 30 años lo han estudiado y modelizado dada su significación hidrológica. El avance más significativo para entender el proceso desde un punto físico viene recogido en Rutter et al (1971). En estos modelos, se calcula un balance de agua para la copa y tallos usando como entrada de datos horaria de lluvia y meteorológicos horarios que controlan la intercepción. La mayoría de los estudios que prosiguieron a esta serie se han realizado en masas forestales, aunque en los últimos años han aparecido trabajos sobre otros tipos de cubiertas y especies individuales. En Rambla Honda se ha parametrizado y validado el modelo de Rutter en las especies *Retama sphaerocarpa*, *Anthyllis citysoides* y *Stipa tenacissima* (Domingo et al. 1998). Actualmente se trabaja sobre estas mismas especies para conocer los parámetros que definen la partición de lluvia: **a**) durante el mojado de la copa: transcolación libre y agua mínima necesaria para mojar toda la copa y **b**) durante el drenaje de la copa: parámetros que describen el comportamiento de la conductancia aerodinámica en relación al viento y la evolución del drenaje y de la escorrentía cortical en función del agua almacenada en la copa. Todo ello se está desarrollando, en el marco de una Tesis Doctoral de próxima lectura. La idea final es conseguir un modelo dinámico que, operando a escala de evento, es capaz de simular los tres flujos principales de partición de lluvia (transcolación, escorrentía cortical y pérdidas por intercepción) en función de las características estructurales de la copa de una mata, las variables micrometeorológicas y la intensidad y duración del evento.

4.5.- Avenidas e impacto de los cambios de uso en la rambla de Tabernas

Aproximadamente cada cuatro años (promedio de los últimos 15 años), se produce una avenida de mayor o menor magnitud que afecta esencialmente el cauce principal de la rambla, que llega hasta la rambla de los Nudos, tributaria a su vez de la de Tabernas. Hasta la fecha se desconoce qué sectores de la totalidad de la cuenca, de unos 30 km², contribuyen significativamente a las avenidas. Tampoco se conoce con exactitud cómo se produce la precipitación en la cuenca. Según un testigo presencial fiable (Harvey, 1984b) en el evento extremo de Septiembre 1980, consecuencia de una precipitación de tipo convectivo, 150 mm en 5 h, con un período de retorno superior a 30 años, una cuenca tributaria de rambla Honda, la del Cabritillo, fue la responsable de caudales de 8 m³ s⁻¹ en la confluencia con rambla Honda, 2 km aguas arriba del área experimental, que alcanzaron los 17,5 m³ s⁻¹ un kilómetro aguas abajo del área experimental (datos

estimados a partir de huellas máximas). Los efectos de la avenida fueron muy grandes en los campos abandonados del fondo y laterales de la rambla, estos últimos alimentados por boqueras, provocando erosión de taludes, túneles de sufusión que terminarían en grandes cárcavas y en la destrucción de bancales. Al no repararse los bancales debido al abandono agrícola, las avenidas ulteriores han ido acentuando la erosión de los bancales en cascada cuyo espesor de suelo-sedimento se había formado paulatinamente durante cientos de años.

En los últimos años y mediante el estímulo de subvenciones, se han llevado a cabo plantaciones masivas de diversas especies arbóreas en fincas vecinas del área experimental. Aparte de la construcción de caminos en fuertes pendientes para el paso de vehículos y maquinaria, el impacto de la propia maquinaria al hacer los hoyos de plantación y bordos para favorecer la retención hídrica tienen, aparte de un gran impacto visual, un elevado riesgo de erosión. Como todavía no se ha producido ningún episodio lluvioso de 90 a 100 mm en 24 h (período de retorno 30 años según Elias Castillo y Ruiz Beltran, 1979), será interesante evaluar las consecuencias de tal repoblación, si bien los datos medioambientales proporcionados en este capítulo permiten prever un impacto por desgracia negativo.

5.- Síntesis, recomendaciones de uso y gestión.

5.1.- Síntesis

En Rambla Honda se han generado series temporales de datos meteorológicos desde 1989, prácticamente continuas; igualmente desde 1989, se tienen series de datos hidrológicos, incluyendo alguna discontinuidad, de caudales de escorrentía y carga de sedimentos, así como de alcalinidad, pH y conductividad eléctrica de la escorrentía; y, desde 1992, se tienen series temporales, también con alguna discontinuidad, de humedad y temperatura del suelo en diversas posiciones y profundidades.

La probabilidad de fallo de alguno de los dispositivos para adquisición de datos, sobre todo de los automáticos, ha sido claramente mayor durante los eventos pluviométricos de mayor magnitud. Esto aconseja ser menos ambicioso en el número de variables a registrar para asegurar el buen funcionamiento de un número menor de dispositivos, ya que el mayor interés de las series temporales es tener datos de todas las variables al mismo tiempo y precisamente durante los eventos.

La mayor parte de las diferencias estructurales entre las tres comunidades vegetales se debe a las características propias de cada especie dominante. Las especies perennes muestran una lenta evolución temporal, en algunos aspectos (cobertura, biomasa leñosa) poco relacionada con la disponibilidad de agua del año en curso; mientras que en las anuales las variaciones son rápidas. Las anuales están fuertemente condicionadas por las perennes que les acompañan, especialmente en las posiciones bajo mata. La cobertura y biomasa de herbáceas bajo mata y en claros disminuye progresivamente desde la zona de *Retama* a la de *Stipa*, y también la diferencia relativa entre ambas posiciones. *Retama* produce un excepcional efecto de facilitación sobre las plantas bajo su copa.

Los años más secos afectan más a la biomasa de herbáceas de la ladera que del abanico, en consonancia con las también mayores variaciones de humedad de la ladera, siendo otoño y primavera las estaciones más determinantes para las anuales. En general, el

otoño es la estación más determinante para la vegetación, y la evapotranspiración real la variable que mejor explica su comportamiento.

Antyllis muestra mayor sensibilidad a las variaciones de disponibilidad de agua; *Retama* es más independiente de las precipitaciones, debido a su capacidad para acceder a niveles muy profundos del sustrato, y su producción de flores y frutos se relaciona inversamente con la precipitación. *Stipa* muestra gran sensibilidad a las lluvias de pequeño volumen, y es más eficiente en el uso del agua, con fuertes adaptaciones para evitar su pérdida; adaptaciones que influyen en que presente la tasa de descomposición más baja.

El reclutamiento en los arbustos es en general episódico, debido a las fluctuaciones de la precipitación, aunque la dinámica es diferente en cada comunidad por las distintas condiciones hídricas. El otoño influye más en los individuos jóvenes, mientras que los adultos están más condicionados por la disponibilidad de agua en invierno y primavera.

Retama y *Anthyllis* parecen estar en fase de expansión, mientras que *Stipa* se encuentra más cercana al equilibrio. La distribución de edades y dinámica de los diferentes tipos de vegetación viene determinada, al menos parcialmente, por el uso antrópico en el pasado; las comunidades de *Retama* y *Anthyllis* son en general más recientes.

La densidad de la vegetación, su composición específica y su estructura espacial son fundamentales para explicar las diferencias en escorrentía, erosión y transporte de sedimentos. A escala de ladera las interacciones entre la vegetación, la escorrentía y el flujo de sedimentos son complejas.

Las escalas espaciales y temporales de generación de escorrentía dependen del efecto combinado de la variabilidad temporal de la lluvia y de la organización del suelo y la estructura de la vegetación.

El comportamiento hidrológico en estas cuencas semiáridas de unas pocas hectáreas es diferente según el mecanismo por el que se genere la escorrentía:

- a) al exceder la capacidad de infiltración (Horton): pequeños flujos en las fases iniciales de escorrentía, de corta duración y espacialmente heterogéneos por lo que no hay conectividad hidrológica.
- b) por saturación de las capas sub-superficiales: flujos mayores después de las fases iniciales de escorrentía, de mayor duración y espacialmente homogéneo por lo que puede haber conectividad hidrológica.

Las laderas con afloramientos de micascuistas son las principales fuentes de escorrentía y sedimentos. La parte baja de los conos aluviales, de arena y grava, es su principal sumidero.

En Rambla Honda, como en muchas regiones áridas y semi-áridas, la distribución espacial de la humedad del suelo está más controlada por factores locales (vegetación, pedregosidad superficial, porosidad del suelo, contenido en limo + arcilla y materia orgánica) que por la topografía.

Los resultados del modelo de evapotranspiración real han permitido establecer que, aún en ausencia de circulación subálvea, el cauce principal de Rambla Honda, además de la precipitación directa, recibe más de 100 mm de agua procedentes, casi en su totalidad,

de avenidas efímeras que se generan en la cabecera de la cuenca. La aportación de las laderas adyacentes al cauce tiene poca importancia cuantitativa.

El modelo de evapotranspiración puede ser utilizado con bastante confianza a resoluciones temporales entre 20' y 24 h, lo que hace que se pueda usar con variables climáticas obtenidas con estaciones meteorológicas estándar. La agregación espacial, para la obtención de flujos de áreas cada vez más extensas y heterogéneas se ha desarrollado en el marco de una Tesis Doctoral defendida en 2005 y en la actualidad el modelo permite calcular la evapotranspiración de vegetación discontinua dominada por arbustos formando manchas a escala de varios decámetros.

Se ha evaluado también la posibilidad de determinar el flujo de evapotranspiración a partir de medidas del flujo sensible mediante sensores remotos de temperatura infrarroja y medidas directas del resto de los flujos que intervienen en el proceso. Aunque este estudio está todavía incompleto, los resultados son prometedores.

Otro componente del ciclo del agua estudiado es la interceptación de la lluvia. En Rambla Honda se ha parametrizado y validado el modelo de Rutter en las 3 especies dominantes de arbustos. Posteriormente, una Tesis Doctoral de muy reciente lectura (2006) presenta un modelo dinámico que, a escala de evento, es capaz de simular los tres flujos principales de partición de lluvia (transcolación, escorrentía cortical y pérdidas por interceptación) en función de las características estructurales de la copa de cada una de dichas especies y las variables micrometeorológicas y duración del evento.

5.2.- Recomendaciones de uso y gestión.

A la vista de los procesos geocológicos dominantes en el área, por el tipo de propiedad de la tierra (todo propiedad privada) y teniendo en cuenta las actuales circunstancias socio-económicas, las recomendaciones de uso y gestión son:

- Descartar el uso agrícola intensivo, por la escasez de agua, lo accidentado de la topografía y el valor paisajístico del entorno. Por lo mismo, descartar también el uso industrial. Cabe mantener el uso agrícola tradicional en los fondos de valle en bancales regados por boqueras, el cual podría contribuir a evitar la expansión de redes de sufusión y su consiguiente acarcavamiento. Sin embargo, se desconoce si ello puede resultar rentable hoy actualmente (tal vez lo sea seleccionando determinados cultivos ecológicos).

- Permitir (quizás impulsar) la ganadería extensiva de caprino y ovino, con un número bajo de cabezas por hectárea, dadas las características de la vegetación y la escasez de agua, y concentrándola particularmente en las áreas de *Retama* y *Anthyllis* (mucho más rica en herbáceas la primera, que además son favorecidas por dicho arbusto).

- La reforestación clásica no es recomendable porque el clima no permite una cobertura arbórea generalizada, sólo árboles aislados en situaciones microclimáticas. Sin embargo podría ser muy buena una reforestación con especies seleccionadas de arbustos autóctonos y el mínimo movimiento de tierras. La implantación de pequeños rodales de árboles y arbustos en los bancales abandonados por la agricultura podría contribuir a la estabilización de los mismos, evitando su desmoronamiento.

- La urbanización y las instalaciones para uso recreativo podrían aceptarse siempre que se localizaran en pequeños núcleos situados en los antiguos cortijos, terrazas fluviales y abanicos aluviales. En todo caso, su densidad total debería ser muy baja, evitando siempre la impermeabilización de grandes extensiones de terreno y la acumulación de desmontes que favorecerían las avenidas y el cambio de régimen de la rambla. En ningún caso se considera apropiada la urbanización en las laderas.

- Una vez constatado que las comunidades de retama y albaida se encuentran en fase de regeneración y que las de esparto se encuentran estabilizadas, un abandono monitorizado de la mayoría del territorio es una opción adicional. Ello implicaría un incremento general de biomasa y una contribución a los bienes y servicios asociados a las tierras marginales, en términos de regulación hidrológica, protección frente a la erosión y biodiversidad. Para que se cumplieran dichos procesos sería deseable alguna clase de protección o control.

- Una vez constatado que las comunidades de retama y albaida se encuentran en fase de regeneración y que las de esparto se encuentran estabilizadas, un abandono monitorizado de la mayoría del territorio es una opción adicional. Ello implicaría un incremento general de biomasa y una contribución a los bienes y servicios asociados a las tierras marginales, en términos de regulación hidrológica, protección frente a la erosión y biodiversidad. Claro que asegurar la obtención de dichos beneficios requeriría una mínima inversión en seguimiento y control.

Agradecimientos

El trabajo presentado en este capítulo ha sido financiado, aparte de la RESEL, por los siguientes proyectos de investigación: 1) LUCDEME, sub-proyecto “Erosión y colonización vegetal en campos abandonados”. 2) MEDALUS I, II y III (Mediterranean Desertification and Land Use) (EPOC-CT90-0014-SMA, EV5V-0128 y ENV4-CT95-0118), 3) PROHIDRADE (AMB95-0986-C02-01), 4) Modelización de la evapotranspiración real sobre vegetación dispersa en clima semiarido (CLI95-1874), 5) EPOHIDRO (HID98-1056-C02-01), 6) Modelización del balance de energía en áreas espacialmente heterogéneas de clima semiárido (CLI99-0835-C02-02), 7) PROHISEM (REN2001-2268-C02-01/HID), 8) GEORANGE (CE EVK2-2000-22089, CSIC ENVIR/992/0630), 9) ECONEXUS (REN2000-1513GLO), 10) CANOA (GLC2004-04919-C02-01). Un agradecimiento muy especial para Luis Delgado, Alfredo Durán, Montse Guerrero y Juan París por su inestimable ayuda en los trabajos de campo y laboratorio y a los estudiantes, becarios y contratados eventuales que colaboraron en la adquisición y/o procesamiento de datos en la Rambla Honda (Miguel Cueto, Gerardo Sánchez, José Manuel Nicolau, Miguel Angel Domene, Pascual Nogueras, M^a Emilia Sanjuán, Andrew Adams, Samantha Stathan, Greta Walter, Francisco Fernández Abad, M^a Carmen Ortigosa, José Miguel Alonso, José María de las Heras, y Guillermo Zevenhuizen).

Referencias citadas en el texto

Brenner, A.J. y Incoll, L.D., 1997. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 84: 187-205.

- Burke,E.J. y Stewart,J.B. 1997. Test of a sensible heat flux–radiometric surface temperature relationship for HAPEX-Sahel. *Bound.-Layer Meteor.*, **84**, 329–337.
- Cammeraat,L.H., 1992. MEDALUS field manual. 3rd version. MEDALUS Office. 115 p.
- Choudhury,B.J. y Monteih,J.L. 1988. A four-layer model for the heat budget of homogenous land surfaces. *Q. J. of the Royal Meteorological Society* **114**: 373-398.
- Colombo,F. 1989. Abanicos aluviales. En A.Arche (coordinador): Sedimentología, vol 1, pp 143-218, colección “Nuevas Tendencias”, CSIC, Madrid.
- Contreras,S., Solé-Benet,A. 2003. Hidrofobicidad en suelos mediterráneos semiáridos: implicaciones hidrológicas para una pequeña cuenca experimental en el SE ibérico. *Cuaternario y Geomorfología*, 17: 29-45.
- Domingo, F., G. Sánchez, M.J. Moro, A.J. Brenner, J. Puigdefábregas. 1998. Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, **91**: 275–292.
- Domingo, F., L. Villagarcía, A. J. Brenner & J. Puigdefábregas. 1999. Evapotranspiration model for semi-arid shrub-lands tested against data from SE Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, **95**: 67–84.
- Domingo, F., L. Villagarcía, M. M. Boer, L. Alados-Arboledas & J. Puigdefábregas. 2001. Evaluating the long-term water balance of arid zone stream bed vegetation using evapotranspiration modelling and hillslope runoff measurements. *Journal of Hydrology*, 243: 17–30.
- Doorembos,J. y Pruitt,W.O.1984. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje N°24. 194 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.
- FAO-ISRIC-ISSS. 1998. *World reference base for soil resources*. FAO, Roma.
- Gutiérrez, L. 2000. Estructura y productividad de la vegetación de estepa mediterránea en relación con la variabilidad climática: el sistema de ladera en Rambla Honda (Almería). Tesis Doctoral. Dpto. de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Almería – Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC. Almería.
- Haase, P., F. I. Pugnaire, E. M. Fernández, J. Puigdefábregas, S. C. Clark & L. D. Incoll. 1996. An Investigation of rooting depth of the semiarid shrub *Retama sphaerocarpa* (L.) Boiss. by labelling of ground water with a chemical tracer. *Journal of Hydrology*, **177**: 23–31.
- Harvey,A. 1984a. Aggradation and dissection sequences on Spanish alluvial fans: influence on morphological development. *Catena*, 11: 289-304.
- Harvey,A. 1984b. Geomorphological response to an extreme flood: a case from SE Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 9: 267-279.
- Hutchinson, M.F. 1989. A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits. *Journal of Hydrology*, 106: 211-232.
- Kessler.J. y Oosterbaan,R. 1974. Determining hydraulic conductivity of soils. In *Drainage principles and applications*, publication 16 III, 253-256, ILRI. Holanda.

- Lázaro, R. y González Rebollar, J.L. 1988. Aproximación al estudio del paisaje vegetal almeriense por medio de la cuantificación fitoclimática. I. En: L. Villar, Ed.: *Homenaje a Pedro Montserrat*. Insto. Estudios Altoaragoneses e Insto. Pirenaico de Ecología; monografías del Insto. Pir. de Ecología, 4: 617 - 626. Jaca.
- Lázaro, R. y Rey, J.M. 1991. Sobre el clima de la provincia de Almería (SE Ibérico): Primer ensayo de cartografía automática de medidas anuales de temperatura y precipitación. *Suelo y Planta*, 1(1): 61-68. 1991. Madrid, España.
- Lázaro, R., F.S. Rodrigo, L. Gutiérrez, F. Domingo y J. Puigdefábregas. 2001. Analysis of a Thirty Year Rainfall Record (1967-1997) from Semi-Arid SE Spain for implications on vegetation. *Journal of Arid Environments*, 48: 373 - 395
- Montero de Burgos, J.L. y González Rebollar, J.L. 1983. (2ª Edición). *Diagramas Bioclimáticos*. ICONA, 379 pp. Madrid.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. *Proc. Soc. Exp. Biol.* **19**, 205-234.
- Nicolau, J. M., A. Solé-Benet, J. Puigdefábregas & L. Gutiérrez. 1996. Effects of soil and vegetation on runoff along a catena in semi-arid Spain. *Geomorphology*, **14**: 297-309.
- 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.
- Pugnaire, F. I., P. Haase & J. Puigdefábregas. 1996. Facilitation between higher plant species in a semiarid environment. *Ecology* **77**: 1420-1426.
- 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.
- Puigdefábregas J., J. M. Alonso, L. Delgado, F. Domingo, M. Cueto, L. Gutiérrez, R. Lázaro, J. M. Nicolau, G. Sánchez, A. Solé, S. Vidal, C. Aguilera, A. Brenner, S. Clark & L. Incoll. 1996. The Rambla Honda field site: interactions of soil and vegetation along a catena in semi-arid southeast Spain. En J. Brandt y J. B. Thornes (eds) *Mediterranean Desertification and Land Use*, pp 137-168. John Wiley & Sons, Ltd.
- Puigdefábregas, J., del Barrio, G., Boer, M.M., Gutiérrez, L. Y Solé, A. 1998. Differential responses of hillslope elements to rainfall events in a semi-arid area. *Geomorphology*, **23**: 337-351.
- Puigdefábregas, J. 1998. Informe final Proyecto MEDALUS III.
- Puigdefábregas, J., Solé, A., Gutiérrez, L., Del Barrio, G., Boer, M. 1999. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in SE Spain. *Earth Science Reviews*, **48**: 39-70.
- Queralt-Mitjans, I., Domingo, F. y Solé-Benet, A. 1993. The influence of local sources on the mineral content of bulk deposition over an altitudinal gradient in the Filabres range (SE Spain). *J. Geoph. Res.*, **98**(D9): 16761-16768.

- 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.
- Rutter,A.J., Kershaw,K.A., Robins,P.C. y Morton,A.J. 1971. A predictive model of rainfall interception in forest. I. Derivation of the model from observations in a plantation of corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 9: 367-384.
- Sánchez, G. & J. Puigdefábregas. 1994. Interactions of plant growth and sediment movement on slopes in a semi-arid environment. *Geomorphology*, 9: 243–260
- Savenije,H.G., 2004. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrological Processes*, 18(8):1507-1511.
- Serrano, L., J. A. Pardos, F. I. Pugnaire & F. Domingo. 1994. Absorption of radiation, photosynthesis and biomass production in plants. En M. Pessarakli (ed) *Handbook of Plant and Crop Physiology*, pp 243–256. Marcel Dekker, New York.
- Shuttleworth, W.J. y Wallace, J.S. 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Q. J. of the Royal Meteorological Society* 111: 839-855.
- Shuttleworth, W.J. y Gurney, R.J. 1990. The theoretical relationships between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 116: 497-519.
- Sole-Benet,A., Pini,R., Raffaelli,M. 2002. Hydrological consequences of soil surface type and condition in colluvial mica-schist soils after agricultural abandonment. In J.L.Rubio, R.P.C.Morgan, S.Asins, V.Andreu (eds.) *Man and soil at the third millenium (3rd Int. Congress of the European Society for Soil Conservation)*, vol I, pp. 523-533, Geofoma Ediciones, Logroño, Spain.
- Solé-Benet,A., Cantón,Y., Ortigosa,M.C. 2004. Estabilidad de los agregados de suelos franco-arenosos sobre micasquistos como indicadoras de su erosionabilidad. En G. Benito y A.Diez Herrero (eds) *Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología, VIII Reunión Nacional de Geomorfología*, Vol 2, pp 299-309. Sociedad Española de Geomorfología – CSIC, Madrid.
- USA-CERL. 1991. GRASS version 4.0 (Geographic Resources Analysis Support System) user's reference manual. US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Res. Lab., Champaign, Illinois. EEUU.
- Villagarcía,L. 2000. Reformulación, parametrización y validación de un modelo de evapotranspiración para vegetación dispersa. Tesis doctoral. Dpto. de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Almería y Estación Experimental de Zonas Aridas, CSIC. Almería.
- Villagarcía, L., Domingo, F., Alados-Arboledas, L. & Puigdefabregas, J. 2001. Modelización de la evapotranspiración real en rodales de tres especies vegetales del SE español. V Simposio sobre el agua en Andalucía, A.Pulido, P.A.Pulido, A.Vallejos (eds.), Servicio Publicaciones Universidad de Almería (ISBN: 84-8249-458-X), vol. I, pp. 107- 118.
- Were, A., Villagarcía, L., Domingo, F., del Barrio, G. & Puigdefabregas, J. 2001. Rendimiento de un modelo de evapotranspiración multifuente a diversas resoluciones temporales. V Simposio sobre el agua en Andalucía, A.Pulido, P.A.Pulido, A.Vallejos

(eds.), Servicio Publicaciones Universidad de Almería (ISBN: 84-8249-458-X), vol. I, pp. 119-125.

Were, A. 2005. Agregación espacial de la evapotranspiración en clima semiárido. Tesis doctoral (26 de Julio de 2005), Dpto. de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Almería y Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC. Almería.

Otra Bibliografía producida en el marco de Rambla Honda

- Aguilera, F., Kowalski, A.S., Domingo, F., Were, A. y Alados-Arboledas, L. 2005. Aproximación al cierre del balance de energía en zonas semiáridas con el método Eddy Covariance. 4ª Asamblea Hispano-Lusa de Geodesia y Geofísica, Instituto de Geofísica Infante D. Luis (Ed.), Portugal, S06-P11, pp 201- 202.
- Alados, C. L., F. G. Barroso, A. Aguirre y J. Escós. 1996. Effects of early season defoliation of *Anthyllis cytisoides* (a Mediterranean browse species) on further herbivore attack. *Journal of Arid Environments*, **34**: 455–463.
- Alados-Arboledas L., Olmo, F.J., Domingo, F. y Villagarcía, L. 2003. Study of kB^{-1} parameter for sparse vegetation in a semi-arid region. III Asamblea Hispano - Lusa de Geodesia y Geofísica, F. García García, J. L. Berné Valero (eds.), Editorial de la UPV, Valencia, (ISBN: 84-9705-299-4), vol. II, 1174-1178.
- Alcántara, A., Olmo, F.J., Domingo, F., Villagarcía, L. y Alados-Arboledas L. 2003. Métodos de medida del flujo de calor sensible. Comportamiento en zonas semiáridas. III Asamblea Hispano - Lusa de Geodesia y Geofísica, F. García García, J. L. Berné Valero (eds.), Editorial de la UPV, Valencia, (ISBN: 84-9705-299-4), vol. II, 1310-1314.
- Boer, M., del Barrio, G. y Puigdefábregas, J. 1996. Mapping soil depth classes in dry Mediterranean areas using terrain attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*, **72**: 99–118.
- Boer, M. y Puigdefábregas, J. 1995. Assessing spatial patterns of precipitation and moisture in dry Mediterranean landscapes using digital terrain analysis. In *Análisis de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en Ciencias medioambientales*. J. J. Ibáñez & C. Machado, eds. Geofoma Ediciones: 159–276. Logroño, Spain.
- Boer, M.M. 1996. Geographical information system-based application of the desertification response unit concept at the hillslope scale. J. Brandt & J. B. Thornes eds. In *Mediterranean Desertification and Land Use*: 473–492. John Wiley & Sons, Ltd.
- Brenner, A. J., M. Cueto, J. García, M. A. Gilabert, L. D. Incoll, J. Martínez, E. Porter, F. I. Pugnaire & M. T. Younis. 1995. A comparison of direct and indirect methods for measuring leaf and surface area of individual *Retama* bushes. *Plant, Cell and Environment*, **18**: 1332–1340.
- Del Barrio, G. Y Boer, M.M. 1996. Una aproximación jerárquica a la cartografía del espesor del suelo en ambientes semiáridos. A. Grandal d'Anglade & J. Pagés Valcarlos, Eds. *Cuadernos Laboratorio Xeológico de Laxe*, **21**: 177–190.
- Del Barrio, G., Boer, M.M. y Puigdefábregas, J. 1996. Selecting representative drainage basins in a large research area using numerical taxonomy on topographic and climatic raster overlays. Rumor, M., Mc Millan, R. & Ottens, H. F. L. Eds. In

Geographical Information, from Research to Application through Cooperation, **1**: 398–407.

- Delgado, L., Pascual, A., Ruiz, A. 1993. Geology and micromammals of the Serra-1 site (Tabernas basin, Betic Cordillera). *Estudios Geológicos*, **49**: 361–366.
- Delgado, L. 1993. Estudio sedimentológico de los cuerpos sedimentarios Pleistocenos en la Rambla Honda, al Norte de Tabernas, provincia de Almería (SE de España). *Cuaternario y Geomorfología*, **7**: 91–100.
- Delgado, L., Puigdefábregas, J. 1994. Caracterización geomorfológica y sedimentológica de los glaciares de la zona de El Cautivo, Tabernas (Prov. de Almería). J. Arnaez, García Ruiz, J.M., Gómez Villar, A. (eds) *Geomorfología en España*: 305–311.
- Delgado, 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.
- Delgado, L., Torrentó, J.R., Pardini, G. 1991. Estudio de una secuencia de paleosuelos en la vertiente sur de la Sierra de Los Filabres, Prov. Almería (SE España). XVIII Reunión Nacional de Suelos: 261–273. Tenerife.
- Delgado, L. 1995. Caracterización sedimentológica y paleoambiental del Pleistoceno Superior en el borde N de la cuenca Neógeno-Cuaternaria de Tabernas, Almería (SE de España). IX Reunión Nacional sobre Cuaternario. Madrid.
- Domingo, F., Puigdefábregas, J., Clark, S.C., Incoll, L.D., Lockwood, J.G. 1991. Plant physiological behaviour in relation to water in a semiarid environment in Southeast Spain. I.A.H.S Public., **204**: 335–343.
- Domingo, F., Puigdefábregas, J., Moro, M. J. y Bellot, J. 1994. Role of vegetation cover in the biogeochemical balances of a small afforested catchment in southeastern Spain. *Journal of Hydrology* **159**: 275–289.
- Domingo, F., P. R. van Gardingen & A. J. Brenner. 1996. Leaf boundary layer conductance of two native species in southeast Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, **81**: 179–199.
- Domingo, F., M. J. Moro, G. Sánchez, A. J. Brenner & P. R. van Gardingen. 1997. Leaf and canopy boundary layer conductances of two semiarid species (*Retama sphaerocarpa* L. Boiss, and *Stipa tenacissima* L.). *Mediterránea, Serie de Estudios Biológicos*, **16**: 37–43.
- Domingo, F., L. Villagarcía, A. J. Brenner & J. Puigdefábregas. 2000. Measuring and modelling the radiation balance of a heterogeneous shrubland. *Plant, Cell and Environment*, **23**: 27–38.
- Domingo, F., L. Gutiérrez, A. J. Brenner & C. Aguilera. 2002. Limitation to carbon assimilation of two perennial species in semi-arid south-east Spain. *Biologia Plantarum*, **45**: 213–220.
- Domingo, F., Villagarcía, L., Brenner, A.J. & Puigdefábregas, J. 2002. Measuring and modelling the radiation balance of a heterogeneous shrubland. *Plant Cell and Environment*, **23**: 27–38.

- Domingo, F., Villagarcía, Were, A. 2003. ¿Como se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. *Ecosistemas* 2003/1 (URL:<http://www.aeet.org/ecosistemas/031/informe1.htm>)
- Domingo, F., A. J. Brenner, L. Gutiérrez, S. C. Clark, L. D. Incoll & C. Aguilera. Water relations only partly explain the distributions of three perennial plant species in a semi-arid environment. *Biología Plantarum* , 46(2):257-262.
- Escós, J. & J. Puigdefábregas. 1995. Detección de estrés según el tipo de suelo en el desarrollo de *Anthyllis cytisoides* por medio de simetría de escala. *Studia Œcologica*, **12**: 165–172.
- Escós, J., F. G. Barroso, C. L. Alados & L. García. 1996. Effects of simulated herbivory on reproduction of a Mediterranean semi-arid shrub (*Anthyllis cytisoides* L.). *Acta Œcologica*, **17**: 139–149.
- Escós, J., C. L. Alados & J. M. Emlen. 1997. The impact of grazing on plant fractal architecture and fitness of a Mediterranean shrub *Anthyllis cytisoides* L. *Functional Ecology*, **11**: 000–000.
- Haase, P., F. I. Pugnaire & L. D. Incoll. 1995. Seed production and dispersal in the semi-arid tussock grass *Stipa tenacissima* L. during masting. *Journal of Arid Environments*, **31**: 55–65.
- Haase, P., F. I. Pugnaire, S. C. Clark & L. D. Incoll. 1996. Spatial patterns in a two-tiered semi-arid shrubland in southeastern Spain. *Journal of Vegetation Science*, **7**: 527–534.
- Lázaro, R. & J. Puigdefábregas. 1994. Distribución de la vegetación terofítica en relación con la geomorfología en áreas acarcavadas cerca de Tabernas, Almería. *Monografía de Flora y Vegetación Béticas* **7-8**: 127–154.
- Moro, M. J., F. I. Pugnaire, P. Haase & J. Puigdefábregas. 1997. Effect of the canopy of *Retama sphaerocarpa* on its understorey in a semiarid environment. *Functional Ecology*, **11**: 425–431.
- Moro, M. J., F. I. Pugnaire, P. Haase & J. Puigdefábregas. 1997. Mechanisms of interaction between a leguminous shrub and its understorey in a semi-arid environment. *Ecography*, **20**: 175–184.
- Pugnaire, F. I. 1995. Cambio climático: efecto sobre la composición de las comunidades naturales. *Ecosistemas*, **12/13**: 32.
- Pugnaire, F. I. & P. Haase. 1995. Comparative physiology and growth of two perennial tussock grass species in a semi-arid environment. *Annals of Botany* , **77**: 81–86.
- Pugnaire, F. I., P. Haase, J. Puigdefábregas, M. Cueto, S. C. Clark & L. D. Incoll. 1996. Facilitation and succession under the canopy of a leguminous shrub, *Retama sphaerocarpa*, in a semi-arid environment in south-east Spain. *Oikos* **76** : 455–464.
- Pugnaire, F. I., P. Haase, L. D. Incoll & S. C. Clark. 1996. Response of the tussock grass *Stipa tenacissima* to watering in a semi-arid environment. *Functional Ecology*, **10**: 265–274.
- Puigdefábregas, J. 1992. Mitos y perspectivas sobre la desertificación. *Ecosistemas*, **3**: 18–22.
- Puigdefábregas, J., A. Solé, R. Lázaro & J. M. Nicolau. 1992. Factores que controlan la escorrentía en una zona semiárida sobre micaesquistos. En F. López Bermudez, C.

- Conesa García & M. A. Romero Diaz (eds) *Estudios de Geomorfología en España*, **1**: 117–127. Sociedad Española de Geomorfología, Murcia.
- Puigdefábregas, J. 1995. Desertificación: una perspectiva sobre la cuenca mediterránea. *Fronteras de la Ciencia y la Tecnología*, **3**: 15–19.
- Puigdefábregas, J. 1995. Desertification: Stress beyond resilience, exploring a unifying process structure. *Ambio*, **24**: 311–313.
- Puigdefábregas, J. 1995. Erosión y desertificación en España. *El Campo*, **132**: 63–83.
- Puigdefábregas, J. & G. Sánchez. 1996. Vegetación dispersa y flujos de vertiente en clima semiárido. Grandal d'Anglade, A. & Pagés Valcarlos, J. Eds. *Cuadernos Laboratorio Xeológico de Laxe*, **21**: 375–392.
- Sánchez, G. & J. Puigdefábregas. 1994. Simulación del desarrollo de macollas de esparto (*Stipa tenacissima* L.) en relación a la arquitectura y el transporte de sedimentos. *Studia Œcologica*, 10-11: 211–219.
- Sánchez, G., F. Domingo, M. J. Moro, A. J. Brenner & J. Puigdefábregas. 1996. Modelización de la intercepción de lluvia en vegetación natural semiárida. Instituto Tecnológico Geominero de España. En *IV Simposio sobre el Agua en Andalucía*, **1**: 81–89.
- Solé-Benet, A., S. Vidal, L. Gutierrez, R. Lázaro & J. Puigdefábregas. 1996. Respuesta hidrológica de una ladera sobre micaesquistos en Almería. Instituto Tecnológico Geominero de España Eds. *IV Simposio sobre el Agua en Andalucía*. Vol. **1**: 181–191.
- 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. In 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.
- Vidal, S., M. A. Domené, F. Domingo, A. Solé & J. Puigdefábregas. 1996. Desarrollo y calibración de un nuevo sensor de humedad del suelo. Instituto Tecnológico Geominero de España Eds. En *IV Simposio sobre el Agua en Andalucía*. Vol. **1**: 101–109.
- Vidal, S., A. Solé-Benet, R. Lázaro, A. Durán & J. Puigdefábregas. 1996. Estaciones automáticas de aforo y muestreo de caudales, de bajo costo y mantenimiento, para zonas remotas. Instituto Tecnológico Geominero de España Eds. *IV Simposio sobre el Agua en Andalucía*. Vol. **1**: 193–203.
- Villagarcía, L., Were, A., Cantón, Y., Fernández, F., Moro, M.J., Domene, M.A., Solé-Benet, A. & Domingo, F. 2004. Daily soil water content fluctuations in rangelands from semi-arid SE Spain. Progress in Surface and subsurface water studies at the plot and small basin scale. ERB Euromediterranean Conference. M. Tropeano, M. Arattano, F. Maraga, C. Pelissero (eds.), CNR (ISBN: 88-8080-053-1), Turin, Italy, pp. 72-75.
- Were, A; Villagarcía, L., Domingo, F., Moro, M.J., Alados-Arboledas, L. y Puigdefabregas, J. 2005. Agregación espacial de la evapotranspiración en condiciones semiáridas. VI Simposio sobre el agua en Andalucía; J. A.López-Geta, J.C. Rubio y M. Martín Machuca (Eds.), IGME, Madrid (ISBN: 84-7840-577-1), vol. I, pp. 191- 202.