

El limnoembalse de Cola de Pareja (Guadalajara): aspectos medioambientales e hidrológicos

E. Molina Navarro, S. Martínez Pérez y A. Sastre Merlín

Departamento de Geología. Campus Universitario. Universidad de Alcalá.
Ctra. Madrid-Barcelona Km. 33,6. 28871. Alcalá de Henares (Madrid)
eugenio.molina@uah.es, silvia.martinez@uah.es, antonio.sastre@uah.es

RESUMEN

Los embalses de cola constituyen una reseñable novedad en el elenco de actuaciones encaminadas a mitigar algunos aspectos negativos derivados de la construcción y operación de embalses. Se propone la denominación de "limnoembalses de cola" para los mismos, toda vez que estas masas de agua se crean con vocación de comportamiento de lago más que de embalse. El limnoembalse de cola de Pareja es una de las primeras materializaciones de este tenor construidas en España, existiendo algunas indeterminaciones acerca de su viabilidad hidrológica y de su posible aterramiento. El objetivo de este trabajo es plantear la metodología para la resolución de las mismas y evaluar los primeros resultados. Tras la realización de un balance de agua detallado en el limnoembalse, puede afirmarse que, en una primera aproximación, es hidrológicamente viable, dado que la cuenca del río Ompóveda -tributario del Tajo en el embalse de Entrepeñas- dispone de recursos hídricos suficientes como para garantizar la permanencia y estabilidad de la lámina de agua, incluso en los años "tipo" caracterizados como secos. Con el fin de caracterizar la erosión neta en la cuenca y, con ello, el aporte de sedimentos al limnoembalse, ha sido instalada una red de observación de la pérdida de suelo en la cuenca del Ompóveda, la cual estará operativa, al menos, durante los próximos tres años.

Palabras clave: aterramiento, balance hidrológico, limnoembalse de cola, pérdida de suelo, río Ompóveda

Pareja's limno-reservoir (Guadalajara, Spain): environmental and hydrologic aspects

ABSTRACT

The construction of small reservoir on the edge of large ones is an innovative idea designed to counteract some of the negative impacts caused by the construction and use of reservoirs. The denomination "Limno-reservoirs" is proposed here, as these water bodies are created to maintain a natural lake dynamics. Pareja's limno-reservoir is among the first limno-reservoirs in Spain, and its construction raises some questions about hydrological viability and siltation risk. The proposition of the methodologies to solve them and the evaluation of the first results is the aim of this study. A detailed water balance makes possible to affirm that, in a first approach, the limno-reservoir is viable from the hydrological point of view, because the Ompóveda basin -Tajo's tributary at Entrepeñas reservoir- has enough water resources to guarantee the permanence of the water body, even during dry years. To assess the siltation risk, a soil loss observation network will be monitoring the Ompóveda basin for the next three years to evaluate the net erosion in the watershed and the sediment delivery to the reservoir.

Key words: Limno-reservoir, Ompóveda River, siltation, soil loss, water balance

Introducción

Existen algunas posibilidades de mitigación de los efectos negativos de la construcción y explotación de embalses. Quizá por su impacto visual destaca entre dichos efectos la generación de lo que se conoce como "banda árida", la cual es consecuencia de la oscilación de la lámina de agua del embalse derivada de la explotación de éste, lo que genera una "franja perimetral de oscilación" o "carrera de embalse".

Los organismos de cuenca de algunas demarcaciones hidrográficas vienen impulsando desde algu-

nos años unas singulares actuaciones consistentes en la construcción de pequeños diques en sectores de cola de embalses –especialmente en los que convergen determinados intereses estratégicos-, que se conocen como "diques de cola" o "diques inundables". Las primeras actuaciones tuvieron lugar en las Demarcaciones Hidrográficas del Tajo y del Guadiana, entre finales de los ochenta y principios de los noventa, extendiéndose después a otras Demarcaciones Hidrográficas; así, el listado de inversiones previstas en la Ley 10/2001 del Plan Hidrológico Nacional (Ley 10/2001, BOE nº 161) inclu-

yó varias iniciativas de este cariz nuevamente en la cuenca del Tajo, pero también en las del Ebro y el Júcar.

Con la construcción del dique en la cola del embalse -preferentemente en un afluente del colector principal que tenga una aportación suficiente- se pretende la creación de una masa de agua individualizada respecto de aquél, en la que el propio dique ejerce la función individualizadora. El área que ocupa esta masa de agua ahora individualizada estaría abocada a formar parte de la "banda árida" y por tanto corresponde a la eventual superficie de la lámina de agua del embalse principal en condiciones de máximo nivel de embalse. Ello implica que el diseño, construcción y operación de estos "diques de cola" deben prever la eventualidad de recibir agua tanto desde "aguas arriba" como desde aguas abajo"; de ahí la denominación de "diques inundables".

Perspectiva ambiental y casuística inherente

Desde la perspectiva ambiental, lo remarcable es precisamente la creación de una masa de agua que podría catalogarse como "artificial" que queda individualizada por el dique, haciéndola independiente de la dinámica del embalse matriz. Para evitar el desarrollo de la banda árida, esta masa de agua debe

mantener un nivel constante de máximo embalse a lo largo de todo el año hidrológico. No existiendo en la literatura técnica un término *ad hoc* hasta el momento y puesto que estas masas de agua se crean con vocación de comportamiento de lago más que de embalse, proponemos el de "limnoembalse de cola".

Existen por el momento pocos limnoembalses de cola en España. Entre ellos pueden mencionarse los tres construidos en el embalse de Orellana y uno en el de Portaje -ambos en Extremadura, en las cuencas del Guadiana y el Tajo respectivamente-, que poseen como principal función el mantenimiento de un hábitat favorable para el asentamiento de la avifauna, salvando los inconvenientes derivados de la oscilación de la lámina de agua (Rodríguez, 1995; Ministerio de Medio Ambiente y Comité Nacional Español de Grandes Presas, 1996). No se han encontrado en la literatura científico-técnica referencias sobre este tipo de actuaciones, por lo que con las reservas necesarias podrían considerarse iniciativas novedosas de recuperación hidrológico-ambiental, resultando pertinente evaluar sus pretendidos efectos positivos.

Una de las primeras iniciativas de este tipo concluidas en España es el limnoembalse de cola de Pareja. Recibe el nombre del municipio que lo acoge, situado al sur de la provincia de Guadalajara, en el sector de cabecera de la cuenca del río Tajo (figura 1). Es alimentado por el río Ompólveda, afluente del Tajo

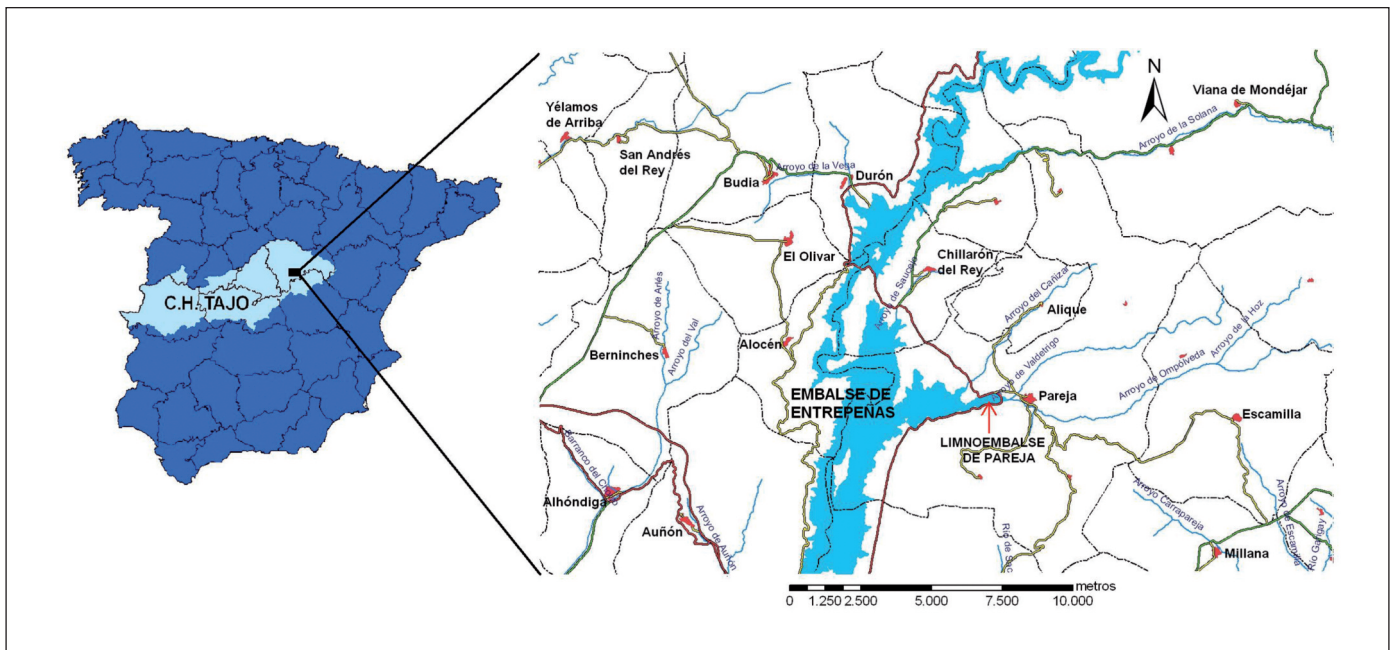


Figura 1. Situación del limnoembalse de cola de Pareja
Figure 1. Pareja's limno-reservoir location

por su margen izquierda drenando una cuenca de aproximadamente 85,5 Km² hasta la desembocadura en el actual limnoembalse de cola; los excedentes de agua del mismo se acaban incorporando al embalse de Entrepeñas (Molina Navarro *et al.*, 2008). El limnoembalse de Pareja posee una capacidad de 0,94 Hm³, inundando una superficie de 26 ha. Tiene una profundidad máxima en torno a 9 metros en la zona próxima al dique, descendiendo progresivamente hacia la cola del propio limnoembalse, donde ronda los 1,5 metros. La construcción del dique y las actuaciones conexas a la construcción del limnoembalse, entre las que destaca una inusual escalera de peces, ha comportado un gasto de 6 millones de euros.

El municipio de Pareja se encuentra además inmerso en el área de influencia del sistema de hiperembalses Entrepeñas-Buendía. La creación de estas infraestructuras generó en la década de los 70 unas expectativas turísticas en la población del entorno que en cierto modo eclipsaron los impactos ambientales negativos derivados de su construcción. Sin embargo, el régimen de precipitaciones inferior a lo que se consideraba como normal a partir del final de esa década, unido a las detracciones de agua para su transvase a la cuenca del Segura, han provocado que el sistema Entrepeñas-Buendía haya permanecido en condiciones de mínimos buena parte del tiempo (figura 2), lo que conllevó la frustración de aquellas expectativas turístico-recreativas. Todo ello suscitó entre la población de la zona una demanda de actuaciones correctoras y/o compensatorias *a posteriori* de aquellos impactos (Molina Navarro *et al.*, 2008).



Figura 3. Vista del limnoembalse de cola de Pareja. Al fondo, embalse de Entrepeñas

Figure 3. Pareja's limno-reservoir view. Entrepeñas reservoir behind

La decisión de construir el limnoembalse de cola de Pareja busca dotar a ese entorno de una infraestructura que sirva tanto para la recuperación hidrológico-ambiental, como para la promoción económica de la zona, de la mano del turismo de naturaleza, mediante la adecuación de zonas de baño, embarcadero y paseo perimetral. El emplazamiento de dos islas artificiales para refugio de fauna y de la ya mencionada escalera de peces debe encuadrarse en la perspectiva de recuperación hidrológico-ambiental antes comentada (figura 3).

Si la investigación acerca del comportamiento de los limnoembalses de cola es en si misma novedosa, la incorporación de los objetivos turístico-recreativo en el caso del limoembalse de Pareja hacen particularmente oportuno efectuar un seguimiento detallado de su comportamiento ambiental y de su incidencia socio-económica. Se concibió, en consecuencia, un proyecto cuyo objetivo general es el diseño y puesta a punto de un observatorio ambiental con el fin de efectuar el seguimiento del comportamiento de esta actuación con perspectiva holística, tanto en lo concerniente a la lámina de agua generada, como a toda la cuenca hidrográfica aferente. El estudio se está abordando desde cinco perspectivas: análisis y cuantificación de la disponibilidad de agua, riesgo de ate-

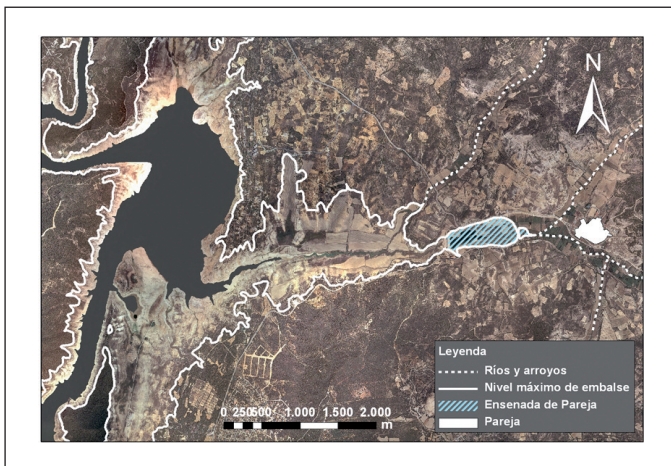


Figura 2. Área inundable del embalse de Entrepeñas y situación en 2006 (Instituto de Desarrollo Regional, 2008)

Figure 2. Maximum Entrepeñas reservoir area and situation in 2006 (Regional Development Institute, 2008)

rramiento, comportamiento limnológico, evolución química y microbiológica del agua y análisis socio-económico. Además, se está diseñando un sistema de información geográfica para facilitar la integración e interpretación de los resultados (Molina Navarro *et al.*, 2008). En este artículo se exponen los avances realizados en relación a los dos primeros objetivos citados.

Objetivos

Los objetivos de este trabajo son:

- Establecer el balance hidrológico en la cuenca del río Ompólveda y en el propio limnoembalse. Ello se perfila como clave para el análisis y cuantificación de la disponibilidad de agua, teniendo en cuenta la singularidad de la infraestructura hidráulica construida.
- Describir la metodología puesta a punto para llevar a cabo un análisis del régimen de erosión/sedimentación en la cuenca, con el fin de evaluar el riesgo de aterramiento del limnoembalse por aportes terrígenos.
- Finalmente, plantear las pautas seguidas para diseñar un Sistema de Información Geográfica que aglutine y gestione eficazmente la información que se recabe y procese durante los tres años de duración prevista del proyecto.

Metodología

Para alcanzar los diferentes objetivos, se han aplicado las siguientes metodologías:

Análisis y cuantificación de la disponibilidad de agua

Se han calculado los parámetros hidrológicos básicos en la cuenca a partir de los datos de precipitación y temperaturas proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y de los datos foronómicos correspondientes a la estación E-3270-Pareja (Centro de Estudios Hidrográficos, 2008). Se han manejado datos de precipitación comprendidos entre los años 1950/51 y 2004/05 para las estaciones de Cifuentes, Viana de Mondéjar, Budía, Pantano de Entrepeñas y Escamilla. Se han caracterizado los años hidrológicos medios, secos (precipitación inferior a la media menos el 15%) y húmedos (precipitación superior a la media más el 15%) con el fin de evaluar la disponibilidad de agua bajo las diferentes circunstancias meteorológicas, especialmente bajo las más adversas.

Dicha caracterización se ha realizado con el programa Hidrobas (Alonso Martínez *et al.*, 2000), que calcula un año "tipo" para cada categoría a partir de los datos de precipitación.

A partir de los datos de temperaturas mensuales para las estaciones de Entrepeñas y Viana de Mondéjar (años 1956/57-1973/74), se ha calculado la evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite. Con el fin de estimar la capacidad de campo y de cara a calcular la evapotranspiración real, se han evaluado las características de los suelos de la zona según lo descrito en el Mapa de Suelos de Guadalajara (Guerrero *et al.*, 1970), así como observaciones de campo, aplicando posteriormente el método descrito por Urbano Terrón (1992).

Por otra parte, se ha evaluado el balance de agua en el limnoembalse para los años "tipo" obtenidos, recabándose de la Confederación Hidrográfica del Tajo los datos de evaporación en el embalse de Entrepeñas (años 2002/03 y 2003/04). Ésta, junto con el desagüe que se produzca por la escalera de peces -y eventualmente por el aliviadero- una vez alcanzada la capacidad máxima de embalse, será la única vía de salida de agua del limnoembalse. Las entradas se deben a la precipitación directa sobre el vaso y los caudales aferentes al mismo. La aportación a la estación de aforos E-3270 (1979/80-2005/06) representa la escorrentía de la práctica totalidad de la cuenca vertiente, excepción hecha del área comprendida entre la propia estación de aforos y el dique, con una superficie aproximada de 3,5 Km² (figura 4). Se ha calculado la escorrentía en este sector aplicando a la precipitación los coeficientes de escorrentía (caudal/precipitación) obtenidos para los distintos años "tipo" en el resto de la cuenca: 0,08; 0,10 y 0,16 en años secos, medios y húmedos, respectivamente.

Finalmente, a partir de los datos registrados en la estación de aforos E-3270-Pareja se han representado los correspondientes hidrogramas. La separación de la escorrentía de base se ha realizado siguiendo aproximadamente la curvatura general de la curva de agotamiento de los hidrogramas (Remeneiras, 1974; Custodio y Llamas, 1983) dibujada en coordenadas aritméticas.

Evaluación del riesgo de aterramiento del embalse

El posible aterramiento del dique de cola de Pareja viene dado por el aporte de materiales terrígenos a su ensenada. Vinculado a este proyecto, se ha realizado un análisis teórico de la pérdida de suelo en la cuenca del Ompólveda (Arévalo, 2008). Sin embargo, para realizar un seguimiento de la pérdida de suelo real y

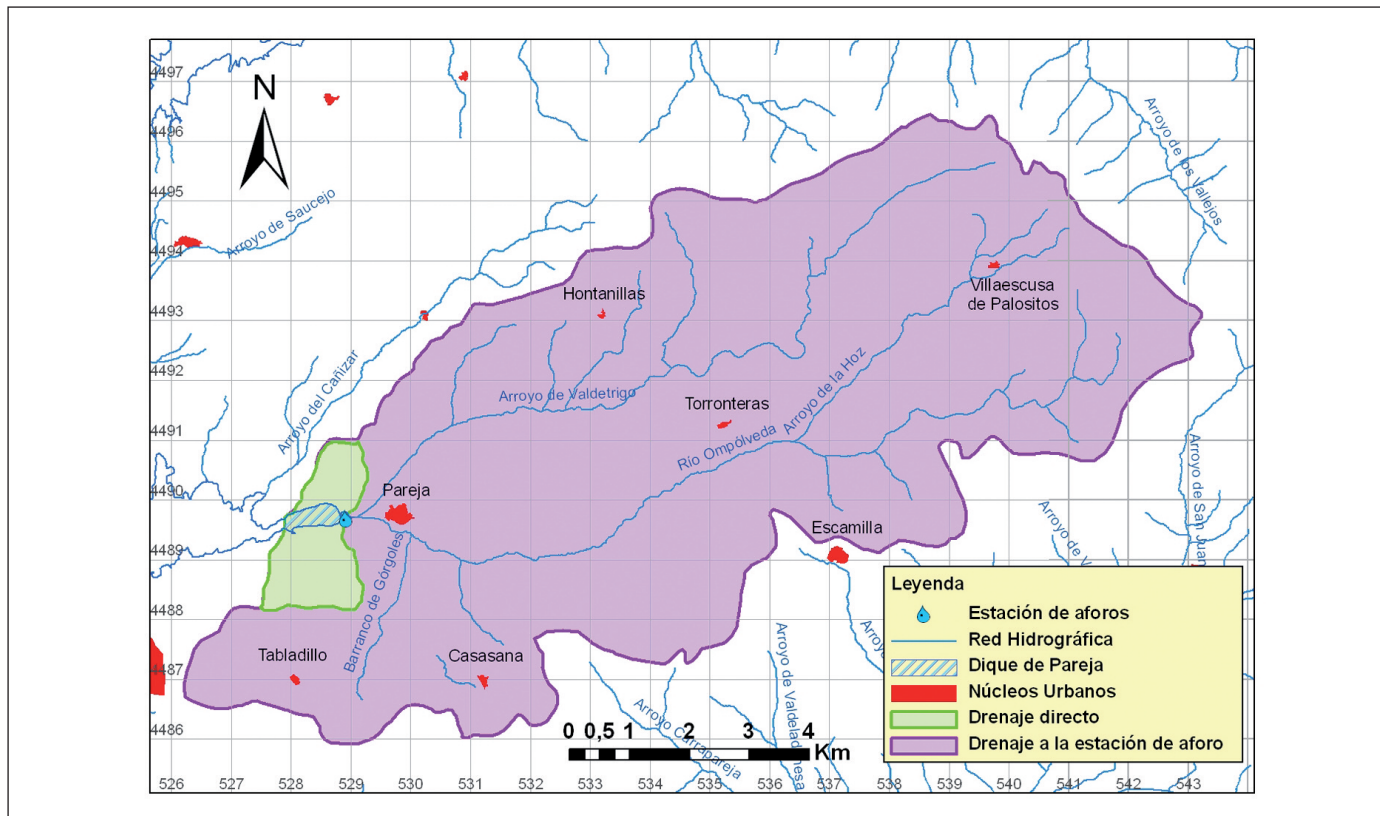


Figura 4. Zonificación de la cuenca aferente al dique según el tipo de drenaje al mismo
 Figure 4. Reservoir basin areas depending on the drainage type

basándose en las características de la cuenca (relieve, litología, orientación, cobertura vegetal y accesibilidad, entre otras), se han puesto a punto dos metodologías para determinar la erosión y sedimentación *in-situ* en la cuenca del Ompólveda.

La primera de ellas permitirá estimar la pérdida de suelo por erosión entre regueros y la sedimentación ordinaria. El procedimiento se fundamenta en ubicar una serie de parcelas experimentales de erosión compuestas por 16 varillas de hierro de 30 cm., insertadas en el suelo sobresaliendo en torno a 10 cm. por encima de la superficie. Las varillas están separadas entre sí 25 cm., formando un cuadrado de muestreo de 75x75 cm. (figura 5). Las parcelas han sido ubicadas en una serie de puntos representativos de todos los ambientes imperantes en el área de estudio, tanto erosivos o "de pérdida" como de deposición. La pérdida global de suelo se calculará a partir del balance entre la cantidad de materiales erosionados/depositados en cada parcela, teniendo en cuenta su densidad aparente.

Igualmente, se ha implementado una metodología para el cálculo de la erosión en surcos y la sedimen-

tación en sus zonas de descarga. Se han seleccionado nueve surcos en todo el territorio de la cuenca aferente al embalse sobre los cuales se dibuja el área del surco con un perfilador de agujas (figura 6), midiéndola posteriormente en gabinete. El dibujo sucesivo de la sección del surco permite determinar los cambios en la misma. Por otro lado, se procederá a la cuantificación de la deposición de sedimentos en el cono de deposición formado por cada surco mediante la instalación de varillas iguales a las ya descritas, pero ubicadas emulando la forma del cono. A partir del valor de densidad aparente de los materiales se calculará la pérdida global de sedimentos.

En ambas metodologías se realizarán las mediciones oportunas -5 mediciones anuales- durante tres años, extrapolando los resultados obtenidos a todas aquellas zonas semejantes de la cuenca y utilizando como principal soporte las imágenes procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea -PNOA-2006- (Instituto de Desarrollo Regional, 2008). Además, está previsto realizar una batimetría de detalle que por comparación con la efectuada antes del llenado del limnoembalse por la Confederación Hidrográfica del



Figura 5. Parcela de muestreo de la sedimentación tras una importante rotura de pendiente en materiales Cretácicos
Figure 5. Sedimentation sampling plot after a slope break in Cretaceous materials



Figura 6. Medida de la erosión en surcos con un perfilador de agujas
Figure 6. Measuring the erodibility in water tracks with a needle profiler

Tajo permitirá estimar de forma precisa la tasa de aterramiento.

Diseño del sistema de información geográfica

Se ha recabado la información cartográfica digital necesaria en los diversos organismos públicos, tales como el Instituto Geográfico Nacional, el Instituto Geológico y Minero de España, la Dirección General del Catastro del Ministerio de Economía y Hacienda, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y la Agencia Europea del Medio Ambiente.

Está siendo procesada utilizando el paquete informático ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006). Todos los archivos vectoriales se han convertido a formato *Shapefile*, creando las coberturas oportunas. La ventana espacial para la base de datos ha quedado inicialmente

comprendida como aquella ocupada por la hoja 537 en su totalidad y las hojas 538-I y 538-III del Mapa Topográfico Nacional 1:25.000. Las coberturas del Modelo Digital del Terreno y la ortografía del PNOA-2006 (Instituto de Desarrollo Regional, 2008) deben estar por su naturaleza en formato *Raster*. Igualmente, se ha generado un único archivo vectorial de síntesis geológica a partir de los mapas digitales de la serie MAGNA.

Resultados y discusión

Análisis y cuantificación de la disponibilidad de agua

La estación pluviométrica nº 3066-Escamilla presenta la serie de datos más extensa (1963/64 - 2004/05), además de localizarse en el límite sur de la cuenca del río Ompólveda y situarse a una altitud (1017

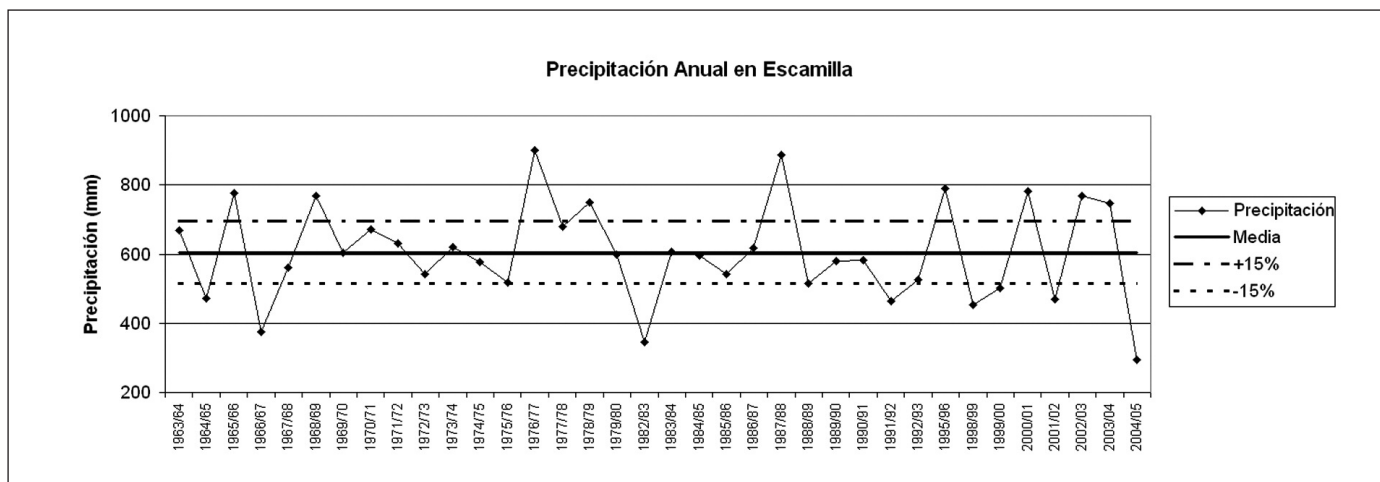


Figura 7. Precipitación anual en la estación de Escamilla
 Figure 7. Annual precipitation at Escamilla gauging station

m.s.n.m.) próxima a la media de la misma. Por ello, se ha elegido esta estación para representar la variabilidad anual de la precipitación (figura 7) y así disponer de una idea general de la misma en la zona de estudio.

La gran variabilidad interanual de la pluviosidad mostrada en la figura justifica la caracterización de los años "tipo", pudiendo así constatar la evolución de los parámetros hidrológicos especialmente bajo condiciones adversas.

Por su parte, el estudio de los suelos de la cuenca ha permitido determinar que se trata fundamentalmente de litosoles, rendzinas y xerorendzinas, en general poco evolucionados, con profundidades entre los 20 y los 120 cm. y carentes de estructura desarrollada que retenga el agua, presentando un

buen drenaje (Guerra Delgado *et al.*, 1970). Estas características, junto a las observaciones realizadas en campo, permiten considerar un espesor medio de suelo de 70 cm., una capacidad de campo del 22%, un 10% de punto de marchitamiento y una densidad aparente media de 1.3 g/cm³. Con todo ello se ha estimado un valor de reserva de agua en el suelo comprendido entre 50 y 75 mm. mediante el método descrito por Urbano Terrón (1992).

Así pues, se pudieron calcular los parámetros hidrológicos básicos para la cuenca del río Ompólveda en los distintos años "tipo" (tabla 1).

Resulta relevante que descensos en la precipitación del 19% (de años húmedos a medios) y el 25% (de años medios a secos) dan lugar a disminuciones en el caudal circulante del 46% y del 44% respectiva-

(a)	Años Secos	Años Medios	Años Húmedos	(b)	Años Secos	Años Medios	Años Húmedos
P	34,2	45,3	55,7	P	34,2	45,3	55,7
ETP	60,0	60,0	60,0	ETP	60,0	60,0	60,0
ETR	29,2	35,0	36,7	ETR	31,3	37,1	38,8
Q	2,64	4,71	8,65	Q	2,64	4,71	8,65

Tabla 1. Parámetros hidrológicos básicos en la cuenca del Ompólveda, en Hm³, a capacidades de campo de (a) = 50 mm y (b) = 75 mm. ETP = evapotranspiración potencial, ETR = evapotranspiración real obtenida por el método de Thornthwaite, P = precipitación y Q = caudal registrado en la estación de aforos E-3270

Table 1. Main hydrological parameters at Ompólveda basin, in Hm³, with field capacities equals to (a) = 50 mm and (b) = 75 mm. ETP = Potential evapotranspiration, ETR = Actual evapotranspiration determined by the Thornthwaite method, P = precipitation and Q = runoff measured at E-3270 gauging station

mente. Estos resultados son congruentes con las observaciones realizadas por otros autores en diversas cuencas hidrográficas españolas (Ministerio de Medio Ambiente, 2000) y reflejan que el caudal circulante es muy sensible a disminuciones en la precipitación, sin existir una relación lineal entre ambos parámetros. Por otro lado, los valores de escorrentía medida (en torno a un 10% de la precipitación en un año medio) revelan la inadecuación de utilizar la relación precipitación-escorrentía de áreas extensas para estudios hidrológicos de detalle. En la tabla I también puede observarse que la evapotranspiración real es considerablemente menor en los años secos, teniendo valores similares en años medios y húmedos. A pesar de esta similitud en términos absolutos, el porcentaje que supone la ETR frente a P es sensiblemente distinto, situándose en los intervalos 85-92%, 77-82% y 66-70% según se trate de años secos, medios o húmedos, respectivamente. No obstante, es preciso tener en cuenta que el método de Thornthwaite, si bien muy útil por precisar sólo de la temperatura, subestima los valores de ETP en zonas áridas y los sobreestima en zonas húmedas (Alkaeed *et al.*, 2006). Se ha calculado el balance de agua en el limnoembalse para cada uno de los años "tipo", partiendo de

una situación como la actual, de llenado completo (0,94 Hm³). La figura 8 muestra el resultado de los mismos.

Existe excedente en todos los meses incluso en los años secos, que saldrá del limnoembalse de cola por la escalera de peces, y, eventualmente, por el aliviadero, garantizando *a priori* una lámina de agua constante durante todo el año. El excedente es máximo en la primavera de los años húmedos y mínimo en el verano de los años secos. La figura 8 muestra un paralelismo notable entre Q y Ex. Ello supone que, una vez alcanzada la capacidad máxima de embalse, se asiste a una situación de régimen permanente en la que prácticamente todo el caudal aportado por el Ompólveda alcanza el embalse de Entrepeñas, viéndose algo mermado únicamente por la evaporación. No obstante, se hace preciso analizar con más detalle el efecto que la derivación de agua para el abastecimiento de Pareja pudiese tener en la estabilidad de la lámina de agua, toda vez que los retornos se reintroducen en el sistema aguas abajo del dique.

Los valores de escorrentía total anual obtenidos en la estación de aforos E-3270-Pareja muestran elevada variabilidad interanual (tal y como cabía esperar tras analizar la precipitación), situándose entre 1,13

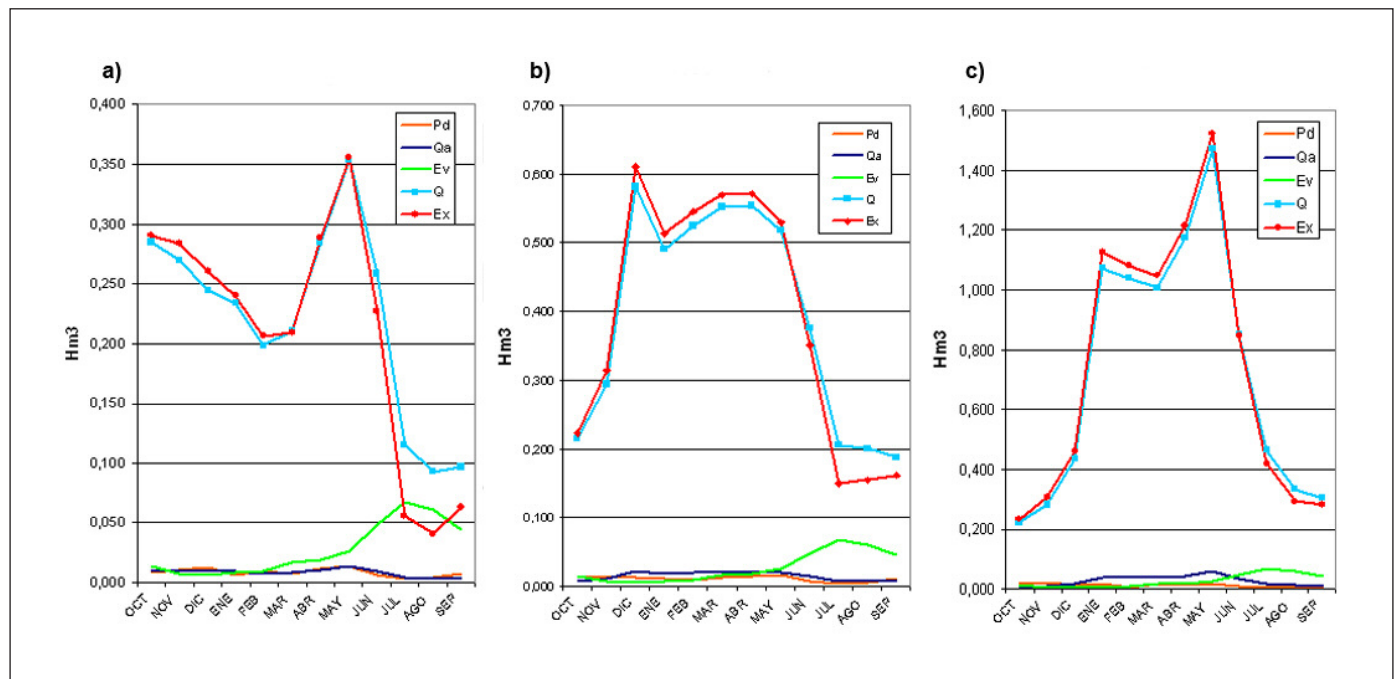


Figura 8. Balance de agua en el limnoembalse para años secos (a), medios (b) y húmedos (c) (Pd = precipitación directa en la ensenada, Qa = caudal no recogido por la estación de aforos 3270-Pareja, Ev = evaporación en la ensenada, Q = caudal en la citada estación y Ex = excedente de agua)

Figure 8. Water balance in the limno-reservoir for dry (a), medium (b) and wet years (c) (Pd = direct precipitation in the reservoir, Qa = runoff not measured at 3270-Pareja gauging station, Ev = reservoir's evaporation, Q = runoff at the cited station and Ex = water surplus)

Año	Q	Q _b	% Q _b	Año tipo
1987/88	13,66	8,0	58,6	húmedo
1989/90	3,25	2,6	80,0	medio
1995/96	6,86	2,8	40,8	húmedo
1996/97	13,22	7,6	57,5	húmedo
1997/98	10,03	7,0	69,8	medio
2000/01	7,55	4,1	54,3	húmedo
2002/03	6,17	3,9	63,2	húmedo
2003/04	9,10	6,4	70,3	húmedo
2005/06	1,85	1,3	70,3	seco

Tabla 2. Escorrentía total (Q) y de base (Q_b) en la estación de aforos E-3270-Pareja
 Table 2. Total runoff (Q) and base flow (Q_b) at E-3270-Pareja gauging station

Hm³ en el año hidrológico 1992/93 y 13,66 Hm³ en 1987/88. Además, los picos de máxima escorrentía no adoptan un patrón determinado, apareciendo en primavera, en invierno o en ambas estaciones según el año analizado. La tabla 2 muestra los valores de escorrentía total registrados y de escorrentía de base estimados mediante la aplicación de las metodologías

descritas en Remeneiras (1974) y Custodio y Llamas (1983) para los años húmedos y medios, resultando más difícil la separación de los componentes en los años secos debido a la ausencia de momentos de crecida en el río. La figura 9 muestra la separación de los componentes del hidrograma por el citado método para el año 2002/03.

La escorrentía de base varía de modo inverso a la precipitación, representando menor porcentaje en los años húmedos (55-60 %), y mayor (70-80%) en los años medios y secos, superando incluso el 80% en los años más secos, en los que a pesar de la ausencia de lluvia el río Ompólveda mantiene un caudal circulante todo el año. En todos los casos, se trata de elevados porcentajes de escorrentía de base (en consonancia con el paquete de calizas tabulares del páramo sobre el que se desarrolla la cuenca del aludido río) que vienen a suponer, no obstante, entre el 9% y el 7% de la precipitación en los años húmedos y medios-secos, respectivamente.

Evaluación del riesgo de aterramiento del embalse

Una vez decididos los criterios y diseñado el plan de muestreo se han instalado recientemente un total de 14 parcelas para el control de la erosión y 7 parcelas para el control de la sedimentación. Asimismo, han

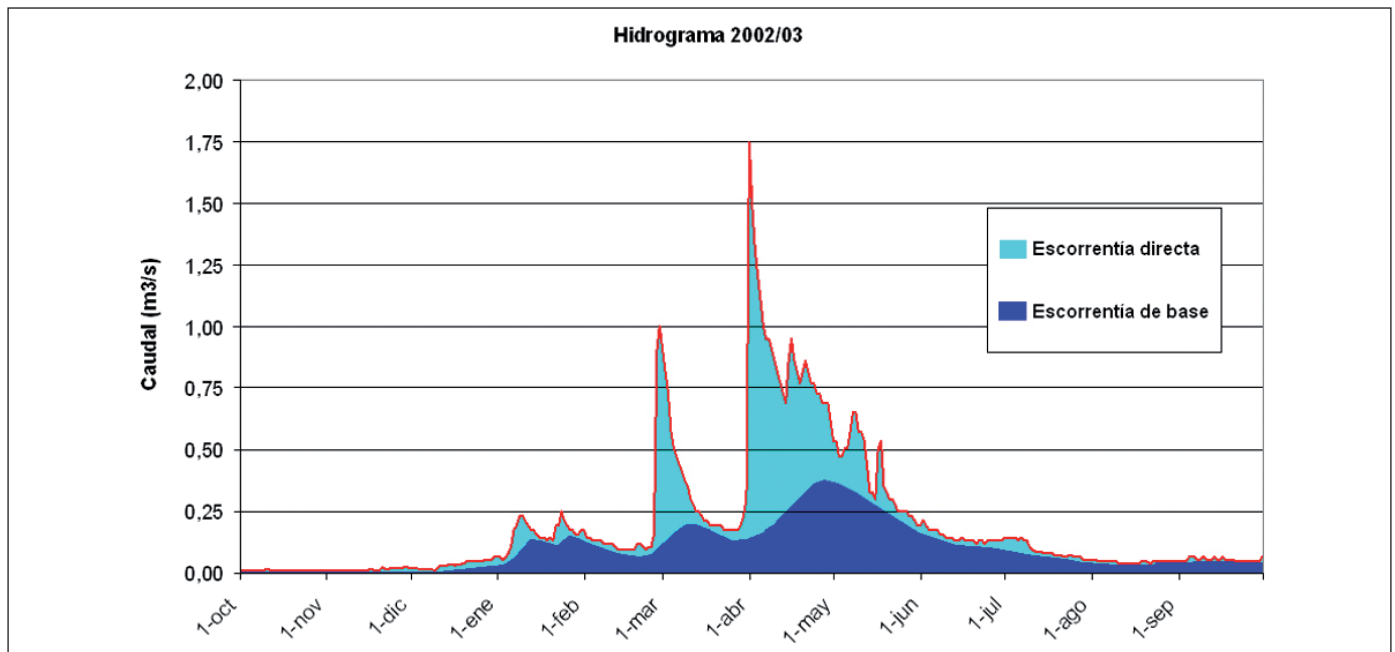


Figura 9. Separación de los componentes del hidrograma del año 2002/03
 Figure 9. 2002/03 hydrograph separation

quedado monitorizados 9 surcos con sus respectivas zonas de descarga. El número de perfiles medidos en cada surco varía entre 2 y 4, dependiendo de la longitud y heterogeneidad del mismo. También es variable el número de varillas de sedimentación según el tamaño del cono de deposición de los mismos.

Las posteriores mediciones y extrapolación de los valores a toda la cuenca aferente al embalse permitirán el cálculo de la pérdida de suelo real. Todos los puntos para el control de la pérdida de suelo han quedado ubicados tal y como se indica en el mapa de la figura 10, realizada con la información vectorial ya incluida en el SIG antes comentado.

La erosión del suelo ha sido ampliamente estudia-

da, pero apenas ha sido evaluada en una situación real y a nivel de cuenca. Muchos estudios utilizan la ecuación experimental (R)USLE (Universal Soil Loss Equation), o modificaciones de las mismas (ej. Agnese *et al.* 2006). También se han desarrollado otros modelos, pues parece que la USLE, al ser originalmente creada para predecir erosión a largo plazo en pequeñas parcelas agrícolas, no ofrece buenos resultados a escala de cuenca (de Vente *et al.* 2005); ejemplos de estos otros modelos son el FSM (Factorial Scoring Model, Verstraeten *et al.* 2003) o el modelo del PSIAC (Pacific Southwest Inter-Agency Committee, 1968). Otras veces, en lugar de modelos, se han utilizado indicadores más sencillos con los

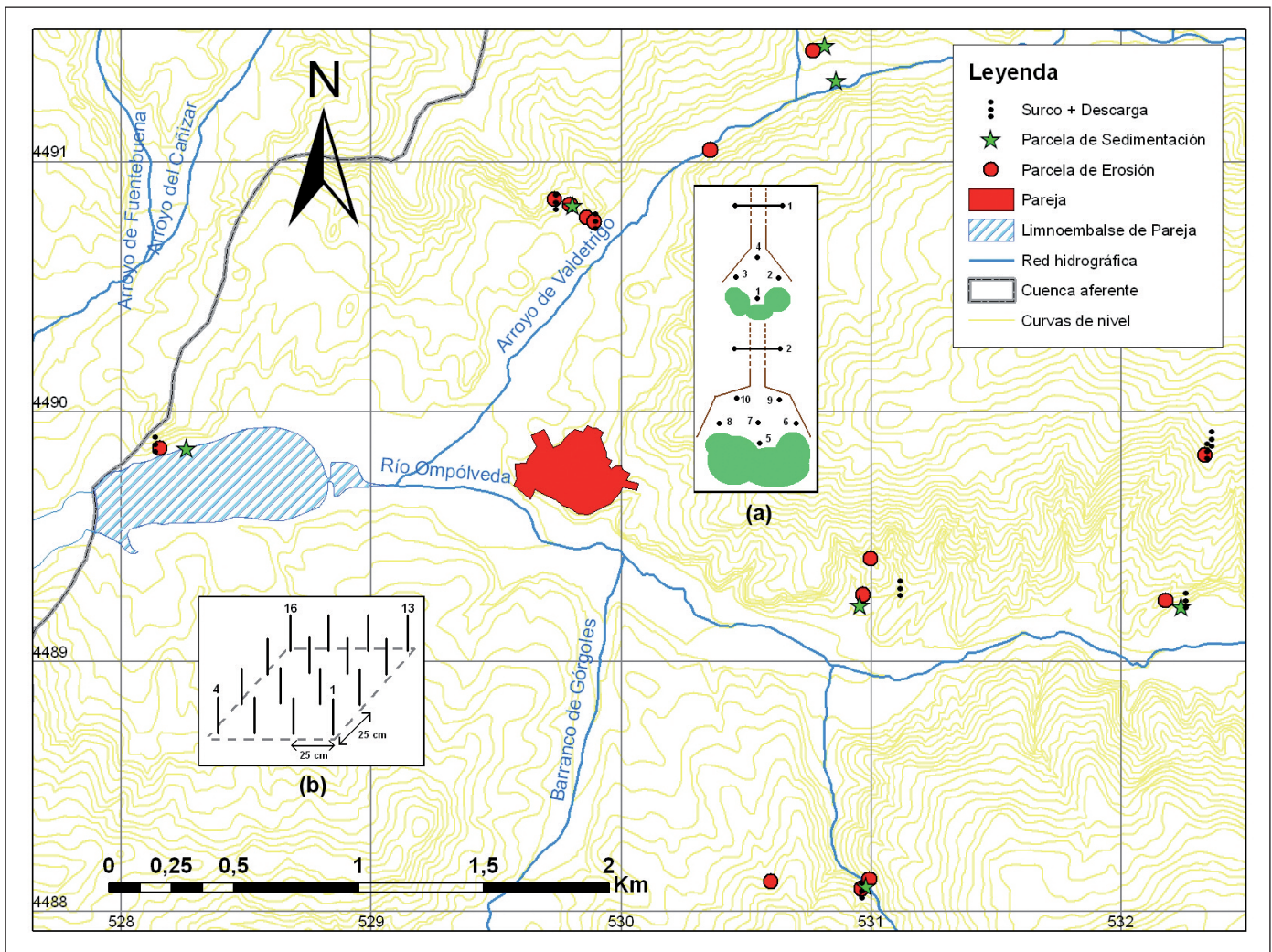


Figura 10. Localización de los puntos de control de la pérdida de suelo -parcelas de erosión y sedimentación, surcos y zonas de descarga- y sus esquemas: (a): medida de perfiles (líneas) y varillas (puntos) en surcos y sus conos de deyección y (b): ubicación de varillas en parcelas de erosión o sedimentación

Figure 10. Soil loss control points location -erosion and sedimentation plots, water tracks and discharge areas- and their diagrams: (a): Profiles (lines) and sticks (points) measurement in water tracks and (b): sticks location in erosion and sedimentation plots

cuales poder relacionar la pérdida de suelo, como la deposición de sedimentos en embalses (de Vente *et al.*, 2005) o el crecimiento de raíces desnudas de pino (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2007). También se han realizado estudios experimentales *in-situ*, pero habitualmente ligados a las actividades agrícolas (ej. de Alba, 2000) o utilizando parcelas experimentales de muy diferente diseño a las aquí planteadas, en las que incluso se simula la lluvia (Marques *et al.* 2007).

Actualmente, otros grupos están investigando erosión real en episodios extremos de lluvia (Barbero *et al.*, 2008). Sin embargo, en este proyecto la obtención de resultados significativos será de especial relevancia en el ámbito del estudio de la erosión, pues gozarán de un importante carácter novedoso al calcular tasas de erosión reales a escala de cuenca y con amplia dimensión temporal.

Conclusiones y perspectivas futuras

Sobre la disponibilidad de agua

El análisis foronómico realizado y el de la variación de la precipitación permiten afirmar que el mantenimiento de la lámina de agua está garantizado incluso en los años secos, siempre y cuando no se produzcan detracciones significativas en la cuenca del Ompóveda aguas arriba del limnoembalse de cola.

La separación de los componentes de los hidrogramas ha puesto de manifiesto la notable importancia que cobra la escorrentía de base, con valores que se sitúan entre el 55 y el 80% de la escorrentía total, superando incluso este porcentaje en los años más secos.

Sobre el riesgo de aterramiento

Habiendo quedado definitivamente instalada la red de medida de la pérdida de suelo, se ha procedido a la medición inicial, que constituirá la referencia para las cinco medidas anuales previstas para los tres años siguientes.

No obstante, la cuantificación que se pueda realizar a partir de los datos que se obtengan de dicha red será contrastada con los datos batimétricos correspondientes al limnoembalse de cola de Pareja.

Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación económica de la convocatoria de ayudas 2007 del convenio de colaboración entre la

Universidad de Alcalá e IberCaja, Obra Social y Cultural, y de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (proyecto N° PA108-0226-1758).

El equipo de investigación quiere agradecer la colaboración prestada por la Confederación Hidrográfica del Tajo y el Excmo. Ayuntamiento de Pareja en el desarrollo del proyecto, así como la del Dr. D. Ramón Bienes, por su implicación y asesoría en el establecimiento de la red de medida de la pérdida de suelo.

Referencias

- Agnese, C., Bagarello, V., Corrao, C., D'Agostino, L. y D'Asaro F. 2006. Influence of the rainfall measurement interval on the erosivity determinations in the Mediterranean area. *Journal of Hydrology*, 329, 39–48.
- Alkaeed, O., Flores, C., Jinnó, K. y Tsutsumi, A. 2006. Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula area, Fukuoka, Japan. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, Vol. 66, No.1, 1-14.
- ArcGIS 9.2. 2006. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Arévalo Illana, D. 2008. *Estimación de la erosión del suelo en la cuenca del Ompóveda* (inédito). Proyecto Fin de Carrera de la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la Universidad de Alcalá. 85 pp.
- Barbero, F., Cermeño, F.I., Alcázar, M y de Alba, S. 2008. Erosión hídrica en episodios extremos de lluvia. *Jornadas de Investigadores en Formación en Ciencias de la Tierra*. Madrid.
- BOE nº 161, 6 de julio de 2001. Ley 10/2001, del Plan Hidrológico Nacional.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1983. *Hidrología subterránea*. Tomo I. Ediciones Omega. Barcelona. 1157 pp.
- Datos de la estación foronómica E-3270, Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid, 10/07/2008, <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/estaf-afo.asp?indroea=3270>. e-mail: direccionCEH@cedex.es
- de Alba Alonso, S. 2000. Redistribución del suelo por las prácticas de laboreo. *Edafología*, 7-2, 75-90.
- de Vente, J., Poesen, J. y Verstraeten, G. 2005. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain. *Journal of Hydrology*, 305, 63–86
- Guerra Delgado, A., Monturiol Rodríguez, F., Bodorrey Penacho, T, de la Horra Ruiz, J.L., Labranderó Sanz, J.L., Carlevaris Muñoz, J.J. y García-Vaquero Piqueras, J. 1970. *Memoria explicativa del mapa de suelos de Guadalajara escala 1:250.000*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. 89 pp.
- Hidrobas v 3.0 win*. Alonso Martínez, J., Arjona García Borreguero, J., Ballester Rodríguez, A., Elorza Tenreiro, F.J., Gómez Sánchez, M., Hernández Manchado, R., Hervás Maldonado, M., Iglesias López, A., Iglesias Delgado, T.E., López Bravo, J., López Geta, J.A., Mera

- Merino, A. de, Ortiz López, J.I. 2000. Instituto Geológico y Minero de España y Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <http://aguas.igme.es/igme/aplicaciones/Hidrobas.htm>
- Infraestructura de datos espaciales de Castilla-La Mancha - Zona de Descarga. Instituto de Desarrollo Regional, Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, Albacete, 12/11/2008, <http://ide.jccm.es/descargapnoa/>. e-mail: idr@uclm.es
- Marques, M.J., Bienes, R., Jiménez, L. y Pérez-Rodríguez, R. 2007. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events. Rainfall simulation over USLE plots. *Science of the Total Environment*, 378, 161-165
- Ministerio de Medio Ambiente y Comité Nacional Español de Grandes Presas. 1996. *Embalses y Medio Ambiente*. Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 273 pp.
- Ministerio de Medio Ambiente. 2000. *El Libro blanco del agua en España*. Madrid, 638 pp.
- Molina Navarro, E., Martínez Pérez, S. y Sastre Merlín, A. 2008. Diseño y puesta a punto de un observatorio ambiental en torno al dique de Cola de Pareja (comarca de Sacedón, Guadalajara). *I Jornadas de Investigadores en Formación en Ciencias de la Tierra*. Madrid.
- Pacific Southwest Inter-Agency Committee PSIAC, 1968. Pacific Southwest Inter-Agency Committee (PSIAC), Factors affecting sediment yield and measures for the reduction of erosion and sediment yield.
- Pérez-Rodríguez, R., Marques, M.J. y Bienes, R. 2007. Use of dendrochronological method in *Pinus halepensis* to estimate the soil erosion in the South East of Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 378, 156-160
- Remeneiras, G. 1974. *Tratado de hidrología aplicada*. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona. 515 pp.
- Rodríguez Cabellos, J.A. 1995. *Obras de corrección del impacto generado por el régimen de explotación del embalse de Orellana sobre la avifauna acuática (Extremadura, España)*. Confederación Hidrográfica del Guadiana.
- Urbano Terrón, P. 1992. *Tratado de fitotecnia general*. Mundi-Prensa. Madrid. 865 pp.
- Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J. y Koninckx, X. 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology*, 50, 327-348

Recibido: abril 2009

Revisado: junio 2009

Aceptado: septiembre 2009

Publicado: enero 2010