

# Aportes de sedimentos a embalses y tasas de erosión en distintos sectores de la cuenca del Ebro

*Sediment yield at reservoirs and erosion rates in different areas of the Ebro river Basin, Northeastern Spain*

M. E. Sanz Montero

Departamento Petrología y Geoquímica. Facultad Ciencias Geológicas. UCM. 28040 Madrid.

## ABSTRACT

*Sediment yield at some reservoirs in the Ebro river basin have been determined by means of bathymmetrical and sedimentological surveys. The studied reservoirs account for more than 80% of the surface of the Ebro Basin. Sediment yield values obtained range from 3 to 1219 t/km<sup>2</sup>. yr. The values are lower in the right margin side of the Ebro river than in the left one. Several factors such as steeper slopes, higher precipitation rates, different soil uses and different types of erosion are interpreted to be responsible for the differences observed between the two margins. In addition, some data of suspended and dissolved solids carried to the Mequinenza-Ribarroja-Flix reservoir scheme are available and showed in this work. These data support the results obtained from reservoirs surveys.*

**Key words:** sediment yield, erosion rates, reservoirs, Ebro river basin, Northeastern Spain.

Geogaceta, 32 (2002), 223-226  
ISSN:0213683X

## Introducción

El antiguo ICONA (López Cadenas *et al.*, 1987) por aplicación discreta de la fórmula de la USLE (Universal Soil Loss Equation), elaboró el Mapa de los Estados Erosivos de la Cuenca del Ebro, a partir del cuál se obtiene que esta cuenca pierde anualmente un total de 238.971.189 t y una media de 2.800 t/km<sup>2</sup>. Cifra esta última que se considera como una tasa de erosión media. No obstante, la mayor parte del territorio (58,9%) sufriría tasas bajas o muy bajas, mientras que un 12% las soportaría entre altas y extremas.

En este trabajo se complementan estos datos con los valores de degradación específica, entendida, de acuerdo con Vanoni (1975), como la cantidad de sedimentos del total erosionado, que llega hasta la desembocadura de la corriente fluvial principal (en este caso, las desembocaduras están representadas por embalses). Al mismo tiempo, se indica la distribución de estos valores en distintas áreas de la Cuenca del Ebro.

Los aportes de sedimentos se han obtenido aplicando dos metodologías distintas. Por un lado, se usan como registro los sedimentos acumulados en embalses y, por otro, y de modo más restringido, se miden los sólidos en suspensión transportados por los ríos a las entradas de algunos embalses.

Embalses	Superficie			D.E. (t/km <sup>2</sup> .año)	Aportes (t/año)	Precip. anual media (mm)	Pendiente (%)
	Total (km <sup>2</sup> )	% repre- sentado	% acumu- lado				
La Tranquera Santolea	1.312	1,5	-	3	3.940	-	1,86
Gallipuen	1.221	1,4	3	28	33.682	425	3,64
Moneva	150	0,2	3,1	37	17.945	496	3,09
Mequinenza	470	0,6	3,7	105	49.092	460	2,65
CuevaForadada	57.444	67,3	71,0	113	6.437.113	396	-
Sta. María Belsué	644	0,8	71,7	171	110.283	-	3,80
Las Torcas	190	0,2	72	216	40.986	489	-
Oliana	450	0,5	72,5	240	107.428	-	-
Mediano	2.694	3,2	75,6	246	661.924	693	3,25
Barasona	1.245	1,5	77,1	271	339.459	1007	3,82
Yesa	1.224	1,4	78,5	369	451.436	1018	6,46
Talarn-Tremp Sotonera	2.181	2,6	81,1	383	834.908	1220	4,43
Pena	1.697	2,0	83,1	619	1.043.489	-	-
Arguis	323	0,4	83,5	1.086	350.870	595	2,96
	64	0,1	83,5	1.219	77.985	-	-
	-	-	-	-	20.025	-	-
Estanca de Alcañiz	-	-	-	-	293.136	-	-
Ribarroja	-	-	-	-	1.043.350	-	-
<b>Total/media</b>	<b>74.003</b>		<b>83,5</b>	<b>340</b>	<b>10.873.704</b>		

Tabla I.- Datos de superficie, degradación específica (D.E.), aportes de sedimentos, precipitación y pendiente en las cuencas de los embalses del Ebro estudiados.

Table I.- Main catchment features and sediment yield data in the study reservoirs.

Según el procedimiento que se detalla en Avendaño *et al.* (1995), para calcular los sedimentos acumulados en los embalses se emplean conjuntamente técnicas batimétricas, que permiten determinar el volumen que ocupa el sedimento, y sedimentológicas, a partir de las que se obtiene la densidad del sedimento. Esto facilita la transformación de unidades de volumen en unidades de masa. No obstante, cuando se valoran los resultados hay que tener presente que este método

presenta una serie de errores potenciales. Una de las fuentes de error deriva de la presencia de sedimentos autóctonos en los embalses, principalmente carbonatos. Este tipo de sedimentos puede influir aumentando el valor de degradación específica en alguna de las cuencas estudiadas. Por el contrario, en algunos embalses se han podido llevar a cabo prácticas de gestión de sedimentos (vacíados, dragados, derivación de aguas cargadas, etc.), que de no tenerse en consideración pueden

Estación	Código	Período	Muestras	Caudal (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Sól. en disolución (x10 <sup>3</sup> t año <sup>-1</sup> )		
					Mín.	Medio	Máx.
Martín en Hijar	14	1975-90	55	0.64	25	50	84
Guadalupe en Alcañiz	15	1975-90	50	3.58	70	70	173
Cinca en Fraga	17	1975-89	57	58.10	407	1020	1654
Segre en Serós	25	1980-89	36	75.89	536	840	1289
Ebro en Sagasto	112	1975-90	52	226	2500	4300	5753
Total			250		3538	6280	8953
<b>Ebro en Flix</b>	121	1976-92	43	371	3950	6980	10135

Tabla 2.- Cantidades mínimas, medias y máximas de sólidos en disolución en las estaciones de aforo localizadas a las entradas y salida del complejo de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix.

Table 2.- Minimum, media and maximum quantities of dissolved solids measured in the gauge stations situated in the Mequinenza-Ribarroja-Flix reservoir scheme.



Fig. 1.-Localización de los embalses estudiados dentro de la cuenca del Ebro.

Fig. 1.- Location map of the study reservoirs in the Ebro River Basin.

generar valores de degradación inferiores a los reales.

El otro método empleado, en este caso de carácter empírico, para determinar los sedimentos transportados por los cauces fluviales, considera las medidas de caudal sólido y líquido que se realizan en estaciones de aforo. Aunque en la Cuenca del Ebro existen numerosas estaciones de aforo, en éstas sólo se mide sistemáticamente el caudal líquido pero no el de sólidos. No obstante, en este trabajo se cuenta con las medidas de sólidos en suspensión y disolución que el CEDEX, centro adscrito al Ministerio de Fomento, realizó a las entradas y salida del complejo de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix, que se

sitúa en el cauce del propio río Ebro a unos 80 km de su desembocadura.

La campaña de medida de sólidos se llevó a cabo intermitentemente a lo largo de un período de tiempo que varía de unas estaciones de aforo a otras pero que se encuentra comprendido entre 1975 y 1992. Igualmente el número de datos difería entre las distintas secciones y osciló de 39, en la estación número 25 (ubicada en Serós), a 69 en la de Fraga (nº 17). Los datos disponibles de sustancias en disolución son ligeramente inferiores debido a que este tipo de determinaciones se comenzaron a realizar con posterioridad.

Con los datos disponibles en cada estación se han elaborado curvas de tipo Qs

= f(Q), tanto para sólidos en disolución como en suspensión, y posteriormente se ha extrapolado esta relación a los datos de caudal líquido de los que existe un registro diario. Generalmente, las relaciones entre la carga de sólidos en suspensión o disolución (Qs, g.s<sup>-1</sup>) y el caudal líquido (Q, m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) adoptan la forma Qs=aQ<sup>b</sup>, donde a y b son constantes. El valor del exponente b varía entre 1 y 2 en función de las características físicas, climáticas e hidrológicas de la cuenca (Muller y Forstner, 1968).

El empleo de este procedimiento para el cálculo de sólidos en suspensión y disolución presenta una serie de problemas entre los que se encuentra que la cantidad de sólidos que se miden sólo representan una pequeña parte de los que se transportan por el río. Éste y otros errores que presenta esta metodología se resumen en Walling y Webb (1981). Sin embargo, en este caso el número de datos disponible justifica su uso.

### Resultados y discusión

#### Aportes de sedimentos a los embalses según datos batimétricos

En la actualidad existen unos 184 embalses en Cuenca del Ebro y se han realizado reconocimientos batimétricos en 18 (Fig.1). Quince de éstos se han estudiado, además sedimentológicamente, lo que ha permitido obtener los datos de degradación específica en sus cuencas que se presentan en la Tabla 1.

Los embalses analizados se distribuyen del siguiente modo. Siete de ellos se disponen en la margen derecha del río y sus áreas fuentes se encuentran tanto en el borde constituido por la Rama Aragonesa del Sistema Ibérico como en los dominios propios de la Cuenca del Ebro. Dos embalses (Ribarroja y Mequinenza) se han levantado en el cauce del río Ebro y, por tanto, sus cuencas ocupan la mayor parte de los entornos geológicos de la cuenca. Los nueve embalses restantes se localizan en la margen izquierda del río y sus áreas fuente se asientan en los dominios pirenaico y prepirenaico.

Las cuencas de los embalses estudiados cubren aproximadamente 74.000 km<sup>2</sup>, que representa algo más del 80% de la superficie gestionada por la Confederación Hidrográfica del Ebro (85.362 km<sup>2</sup>). La cuenca del embalse de Mequinenza abarca por sí sola el 67% del territorio total, mientras que las 14 restantes constituyen el 16% de la superficie de la confederación. De cualquier modo, se dispone de un volumen representativo de datos sobre la degradación específica que experimenta la Cuenca del Ebro, que permite destacar distintos aspectos.

En primer lugar, se puede indicar que la degradación específica en esta cuenca varía anualmente entre 3 y 1.219 t/km<sup>2</sup>. Si exceptuamos los datos más altos, referentes a las cuencas de los embalses de Sotonera y Pena, estos valores se concentran en un intervalo la mitad de estrecho que oscila de 3 a 619 t/km<sup>2</sup>. Concretamente, el 71% del territorio, en el que se encuentra incluida la gran cuenca del embalse de Mequinenza, se caracteriza por valores de degradación específica anuales inferiores a 113 t/km<sup>2</sup>. Por su parte, el 10% de la superficie de la cuenca presenta valores entre 171 y 619 t/km<sup>2</sup>.año y sólo el 0,5% supera el valor de 1.000 t/km<sup>2</sup>.año.

#### Comparación de valores con los de otras cuencas españolas

En España, hasta la fecha, se han realizado estudios de erosión en unas 60 cuencas de embalses (Avendaño et al. 1997). Si comparamos los valores obtenidos en ese estudio con los presentados en éste (Tabla 1) se pueden destacar varios aspectos. Así, el valor mínimo de 3 t/km<sup>2</sup>.año reconocido en la Cuenca del Ebro es el más bajo de todas las cuencas estudiadas. En el extremo opuesto, las cuencas de los embalses de Sotonera y Pena se encuentran entre los de mayor degradación, aunque sin ser los más elevados. Por otro lado, el valor medio, no ponderado, de la cuenca del Ebro es de 340 t/km<sup>2</sup>.año, inferior al valor medio de 429 t/km<sup>2</sup>.año obtenido para el conjunto citado de 60 embalses. El valor medio ponderado, es decir, el correspondiente al 50% del territorio estudiado se situaría entre 105 t/km<sup>2</sup>.año del embalse de Moneva y 113 t/km<sup>2</sup>.año de Mequinenza. El valor medio, así calculado, es más representativo y denota que la degradación específica es en esta cuenca moderada.

#### Distribución de valores a lo largo de la cuenca

Al igual que ocurre en otras cuencas, por ejemplo, en las del Júcar y Segura (Sanz Montero et al., 1998), las cuencas que se encuentran próximas entre sí, suelen presentar valores de degradación específica similares, por ejemplo, embalses de Barasona y Mediano. Los valores más bajos de degradación se dan en la margen derecha de la cuenca del Ebro, donde se asientan las cuencas de los embalses de la Tranquera, Santolea, Gallipuéñ, Moneva, Cueva Foradada y Las Torcas, con degradaciones comprendidas entre 3 y 240 t/km<sup>2</sup>.año. Escapa a esta tendencia únicamente el embalse de Pena. Por el contrario, los datos más elevados corresponden a cuencas situadas en la margen izquierda de la depresión, con valores de degradación específica que su-

peran en todos los casos las 200 t/km<sup>2</sup>.año. Las degradaciones intermedias se dan, por tanto, en el centro de la cuenca, concretamente en los embalses situados en el propio río Ebro (Mequinenza).

#### Factores que condicionan la distribución de valores

Los factores naturales a los que normalmente se alude para justificar estas diferencias son precipitaciones, usos del suelo, geología, tamaño y pendiente de la cuenca. Los valores de algunos de estos parámetros, en aquellas cuencas de las que se disponen datos aparecen recogidos en la Tabla 1.

Se considera que el factor climático más importante en la distribución espacial de la degradación específica es la precipitación. En la Cuenca del Ebro se observa que existe una relación clara entre los valores de precipitación y los de degradación, de modo que los embalses situados en la margen derecha con tasas de degradación más bajas también se caracterizan por unas precipitaciones medias más reducidas, únicamente escapa a esta tendencia el embalse de la Sotonera (Tabla 1).

La pendiente de las cuencas es el elemento morfológico que más influye en la erosión, en las cuencas analizadas se aprecia que, en general, las pendientes medias suelen ser más bajas en los embalses situados en la margen derecha del río Ebro, como se constata en el embalses de la Tranquera que muestra los valores más bajos de pendiente y degradación. Las cuencas situadas en el entorno de los Pirineos, se caracterizan por mayores pendientes medias y valores de degradación específica más elevados. Algún embalse, entre los que se encuentra una vez más el de la Sotonera, se aleja de esta línea (Tabla 1).

Un factor al que normalmente se alude para interpretar diferencias de degradación es el uso del suelo. Considerando el mapa de usos del suelo para la cuenca del Ebro editado por el ICONA (1987), los usos del suelo son considerablemente distintos entre las dos márgenes de la cuenca. De manera que en la margen derecha predominan los cultivos de secano y se caracterizan por escaso arbolado, mientras que en la izquierda los cultivos mayoritarios son de regadío y la presencia de arbolado es más continua.

Respecto a la geología cabe señalar que en la margen derecha de la Cuenca del Ebro se encuentran representados materiales mesozoicos, principalmente de litología carbonática, neógenos, formados por margas, calizas, evaporitas y rocas detríticas, y cuaternarios de litología diversa. Por tanto, los carbonatos representan el componente litológico más abundante.

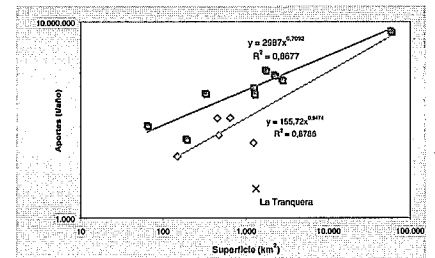


Fig. 2.- Relación entre la superficie de la cuenca y los aportes de sedimentos a los embalses estudiados. Margen derecha (rombos), margen izquierda (cuadrados)

Fig. 2.- Regression lines that relate the catchment surface area to the sediment yield for the studied reservoirs. Squares and rhombs indicate catchments located in the right and left side margins of the Ebro river, respectively.

Avendaño et al. (1995) señalan que la presencia de valores más bajos de degradación específica en esta margen puede ser debida que en las cuencas carbonáticas predomina la erosión química frente a la física y el procedimiento batimétrico-sedimentológico utilizado no cuantifica este tipo de erosión. En la margen izquierda se reconocen el mismo tipo de materiales que en la otra margen, aunque con mayor predominio de rocas detríticas y, además en el entorno de los Pirineos aparecen rocas graníticas hercínicas.

Relación superficie de la cuenca-aporte de sedimentos. Sanz Montero et al. (1998), establecieron una relación para valorar la influencia que ejerce el tamaño de la cuenca en los aportes anuales de sedimentos a distintos embalses españoles, entre los que se encuentran los de la cuenca del Ebro. Los resultados fueron indicativos de que tal correlación existe en las cuencas analizadas. Aunque el intervalo de variación resultante es algo amplio, se constata que la mayoría de cuencas analizadas se agrupan en torno a una recta definida por una expresión exponencial, cuyo exponente adquiere un valor superior a 1, lo que indicaría que los aportes de sedimento aumentan algo más deprisa que la superficie de la cuenca. Dedkov y Moszherin (1992) interpretan que este tipo de relación es característica de zonas en las que predominan los procesos de erosión en cauces. En las rectas de correlación definidas por exponentes inferiores a 1, se denota el efecto contrario, es decir, un descenso de la degradación específica aguas abajo. Según los citados autores en tales cuencas se produciría principalmente erosión en laderas.

De acuerdo con tales resultados, ocho de los embalses de la cuenca del Ebro analizados se distribuyen junto al grupo de cuen-

cas de embalses españoles que sufrirían una erosión más intensa en cauces, frente a los siete restantes que experimentarían mayor erosión en las laderas. No obstante, se ha establecido una relación específica para los embalses situados en la cuenca del Ebro, sin considerar el de la Tranquera que, quizás debido a que se encuentra prácticamente colmatado, se aleja de la tendencia general. A pesar de que se reduce mucho el número de datos disponible, se ha procedido a analizar por separado los que se encuentran en la margen derecha y en la izquierda ya que se han observado diferencias de comportamiento. A la vista de la Fig. 2 donde se plasman los resultados, se constata que las cuencas de cada margen se agrupan en torno a dos rectas distintas que tienden a confluir en el embalse de Mequinenza que se localiza en el mismo río Ebro. El exponente con valor 0,95 que define la recta de correlación en las cuencas de la margen derecha se aproxima mucho a 1. Por el contrario, el exponente que define la relación para la margen izquierda (0,71) se distancia de este valor. Según los comentarios anteriores, estos resultados indican que los fenómenos erosivos son claramente distintos en ambas zonas.

De esta manera, se puede concluir que se observa cierta influencia de los factores naturales en la distribución espacial de degradación específica observados en la Cuenca del Ebro. Es decir, mayores pendientes del terreno y mayores precipitaciones suelen llevar asociados valores más altos de degradación específica. Por otro lado, la geología del terreno y usos del suelo también parece que determinan de algún modo las tasas de sedimentación en los embalses de esta cuenca. Asimismo, al relacionar el tamaño de la cuenca con los aportes de sedimento, se ha comprobado como los fenómenos erosivos en laderas son más intensos en las cuencas de la margen izquierda del Ebro, mientras que en la de la derecha podría darse también erosión en cauces.

Sin embargo, hay algunas cuencas de embalses, como las de la Sotonera y de La Tranquera, que escapan a las tendencias generales. Se interpreta que el comportamiento anómalo observado en éstas pudiera deberse a errores metodológicos indeterminados o, quizás, tales valores pudieran estar motivados por distintas actuaciones humanas llevadas a cabo dentro de la cuenca, entre las que se incluiría el abandono de las tierras de cultivo, actuaciones que se superponen a los factores naturales provocando un efecto difícil de valorar.

#### *Aporte de sedimentos a los embalses mediante aforos*

*Sólidos en suspensión.* Sanz Montero *et al.*, 1999 recogen los resultados de sólidos en suspensión obtenidos mediante aforos según

la metodología señalada anteriormente. A modo de resumen sólo se comenta que el complejo de embalses estudiado Mequinenza-Ribarroja-Flix, recibe de sus alimentadores principales una aportación anual media de sólidos en suspensión que asciende aproximadamente a 1 millón de toneladas. De éstas, casi el 70% han sido suministradas por el río Ebro y el 30% por sus afluentes de la margen izquierda, mientras que de los cauces de la margen derecha recibe menos del 1%.

*Sólidos en disolución.* En lo referente a las cantidades aportadas por cada río se repite la misma tendencia observada en los sólidos en suspensión (Tabla 2). Es decir, el río Martín (margen derecha) es el que menos sustancias en disolución transporta, aproximadamente 50.000 t/año. En el lado opuesto se encuentra el río Ebro en Sagstago que lleva durante el mismo período 90 veces esa cantidad.

En total los embalses estudiados reciben al año algo más de 6 millones de toneladas de sustancias en disolución. Este valor, algo incrementado con las aportaciones de los cauces que no han sido considerados en esta campaña, pero que también contribuyen, es el que se ha medido en la estación de Flix (salida del complejo).

Para convertir los valores de transporte en disolución en tasas de erosión química es necesario realizar algunas correcciones ya que la mitad de bicarbonatos deliberados en disolución a partir de la alteración de las rocas carbonatadas es de origen atmosférico. En este trabajo no se han llevado a cabo dichas correcciones por lo que no se pueden determinar con precisión las tasas de erosión química, pero sí se puede destacar que en el área estudiada los ríos transportan más cantidad de sólidos en disolución que en suspensión. Esto se manifiesta especialmente en los ríos Martín y Guadalupe (margen derecha), que transportan, respectivamente, del orden de 35 y 13 veces más sólidos en disolución que en suspensión, mientras que en el resto de los cauces estudiados este número varía entre 5 y 7.

#### *Comparación de valores de degradación específica y de aportes en suspensión*

Si se comparan los datos de sedimentos que llegan hasta los embalses obtenidos con batimetría con los resultantes de la evaluación de sólidos en suspensión, se observan diferencias que, aún siendo notables, no suelen superar un orden de magnitud. Estas diferencias se deben a que con el segundo método sólo se estima una parte de los sólidos que son transportados en suspensión pero en ningún caso los que viajan por el fondo. Mediante los reconocimientos batimétricos se evalúan todos los sedimentos que han sido acarreados, de uno u otro modo, hasta el embalse. Así, en el

embalse de Mequinenza se acumulan, según la batimetría, una media aproximada de 6 toneladas. Mientras que tomando en cuenta los aforos, al complejo formado por éste, Ribarroja, y Flix llegan un máximo de algo más de 2 toneladas.

Lo que sí se desprende de ambos métodos es que los ríos de la margen derecha del Ebro transportan una carga de sedimentos en suspensión que es inferior, en dos órdenes de magnitud, a la carga de la margen izquierda. Sin embargo, la carga de sólidos en disolución es sólo superior en un orden de magnitud en los cauces de la margen izquierda con respecto a los de la derecha.

Estos resultados ponen de manifiesto que en la margen derecha de la cuenca los valores de degradación específica son más bajos que los de la margen izquierda, debido, en gran parte, a que no se tiene en cuenta la degradación química.

#### **Agradecimientos**

Este trabajo se ha realizado en el marco de un convenio de colaboración entre la Fundación Agustín de Betancourt y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas para la "Investigación conjunta sobre los efectos de la erosión de cuencas en la capacidad de embalses. Aplicación específica a la cuenca del Ebro". En su elaboración se ha contado con la colaboración inestimable de los distintos componentes de la División de Erosión y Sedimentación del CEH (CEDEX).

#### **Referencias**

- Avendaño, C., Cobo, R., Gómez, J.L. y Sanz Montero, M.E. (1995): *Ingeniería Civil*, 99, 51-58.
- Avendaño, C., Sanz Montero, M.E., Cobo, R. y Gómez, J.L. (1997): *Nineteenth Congress on Large Dams*. Q. 74, R.54, 863-874.
- Dedkov, A.P. y Moszherim, V.T. (1992): *IAHS Publ.*, 209, 29-36.
- Muller, G. y Forstner, U. (1968): *Nature*, 217, 244-245.
- Sanz Montero, M.E., Avendaño, C., Cobo, R. y Gómez, J.L. (1998): *Geogaceta*, 23, 135-138.
- Sanz Montero, M.E., Avendaño, C. Y Cobo, R. (1999): En: *Hydrological and geochemical processes in large-scale river basin*. HIBAM, (Ed.). 1-7.
- Vanoni, V.A. (Ed.) (1975): *Reports in engineering Practice*, 54. A.S.C.E. 745 pp.
- Walling, D.E. y Webb, B.W. (1981): *Assoc. Int. Hidrol. Sc. Proc. Symp.* Exeter. Publ., 137, 327-337.