

Procedimiento para evaluar la degradación específica (erosión) de cuencas de embalses a partir de los sedimentos acumulados en los mismos. Aplicación al estudio de embalses españoles

CÁNDIDO AVENDAÑO SALAS (*)
RAFAEL COBO RAYÁN (**)
JOSÉ LUIS GÓMEZ MONTAÑA (***)
MARÍA ESTHER SANZ MONTERO (****)

RESUMEN En este trabajo se detalla el procedimiento de cálculo de la degradación específica o aporte de sedimentos de cuencas de embalses a partir de los sedimentos acumulados en los mismos.

Este tipo de estudios, que en España sólo realiza el CEDEX, requieren del uso combinado de técnicas fotogramétricas, batimétricas y sedimentológicas, así como del cálculo de diferentes parámetros: granulometría, densidad y composición del sedimento, régimen de explotación y capacidad de retención del embalse.

Por aplicación de esta metodología se ha evaluado la degradación específica de 23 cuencas fluviales distribuidas en ocho Confederaciones Hidrográficas. Los resultados de degradación específica obtenidos fluctúan entre 18 y 964 t/km² · año, situándose la media en torno a 300 t/km² · año.

PROCEDURE FOR EVALUATING SPECIFIC DEGRADATION (EROSION) OF RESERVOIR BASINS BY WAY OF THE SEDIMENT ACCUMULATED THERE. ITS APPLICATION TO THE STUDY OF SPANISH RESERVOIRS

ABSTRACT In this study, details are given of the procedure for calculating the specific degradation, or the provision of sediment, of reservoir basins, from the study of the sediment accumulated there.

This type of study, exclusively carried out in Spain by CEDEX, requires the combined use of photogrammetric, bathymetric and sedimentological techniques, as well as the calculation of different parameters: granulometry, sediment density and composition, operating regime and retention capacity of the reservoir.

By applying this methodology, the specific degradation of 23 river basins, distributed in eight Hydrographic Confederations, has been evaluated and the results obtained fluctuate between 18 and 964 t/km² a year, whilst the average specific degradation was found to be around 300 t/km² a year.

Palabras clave: Degradación específica; Cuencas de embalses; Batimetría; Sedimentología de embalses.

1. INTRODUCCIÓN

La "degradación específica" o "aporte de sedimentos" (*sediment yield*) se define, formalmente y de acuerdo con Vanoni (1975),

como: el total de sedimentos derivados de una cuenca de drenaje o vertiente, medido en una sección transversal de referencia en un período concreto de tiempo. Se expresa normalmente en peso por unidad de superficie y tiempo (t/km² · año).

Existen diversos procedimientos para evaluar la degradación específica. Se pueden agrupar en dos categorías. La primera incluye métodos empíricos que predicen la degradación específica mediante ecuaciones paramétricas (por ejemplo, ecuaciones de Fournier, 1960 y de Gravelovic y Djorovic, 1974). La segunda abarca aquellos procedimientos que determinan dicha degradación específica basándose en la cuantificación de sedimentos. De estos últimos, el de mayor aceptación es el que considera los sedimentos acumulados en un embalse durante un período de tiempo (ICOLD, 1989).

(*) Ingeniero de Camisas, Canales y Puertas. Director de Programa de Erosión y Sedimentación del CEDEX (MOPMA).

(**) Licenciado en Ciencias Geológicas. Técnico Superior de la División de Erosión y Sedimentación del CEDEX (MOPMA).

(***) Perito Industrial Químico. Ingeniero Técnico de la División de Erosión y Sedimentación del CEDEX (MOPMA).

(****) Doctora en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.

Dicha metodología comenzó a desarrollarse en los años 50. Sin embargo, no es hasta la década de los ochenta, coincidiendo con una mayor conciencia social sobre los problemas de la erosión, cuando este método despierta mayor interés y comienza a usarse de forma sistemática en diversas partes del mundo. De tal modo que en la actualidad son numerosos los trabajos en los que se determinan valores de degradación específica aplicando este procedimiento (Jolly, 1982; Le Roux y Roos, 1982; Duck y Mannus, 1993).

En España, sin embargo, son muy escasos los estudios encaminados a determinar la degradación específica de cuencas hidrográficas. El presente trabajo pretende cubrir, al menos en parte, esta carencia de datos evaluando la degradación específica de 23 cuencas de drenaje, a la vez que se describe el procedimiento detalladamente.

2. PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR LA DEGRADACIÓN ESPECÍFICA DE UNA CUENCA A PARTIR DE LOS SEDIMENTOS ACUMULADOS EN EL EMBALSE

El procedimiento para evaluar la degradación específica y tasas de erosión a partir del volumen de sedimentos acumulados en los embalses requiere conocer los siguientes parámetros: el volumen de aterramiento, el régimen de explotación y la capacidad de retención de los embalses, y la granulometría y densidad de los sedimentos. Asimismo es necesario realizar un estudio de la naturaleza del sedimento para desvelar la procedencia de éste.

2.1. ATERRAMIENTO DE LOS EMBALSES

El primer paso del procedimiento lo constituye la medida del volumen de sedimentos acumulados en un embalse. Esta medida se obtiene por diferencia entre la capacidad inicial del embalse y la capacidad del mismo en la fecha del estudio.

El valor de la capacidad de los embalses se obtiene mediante la combinación de técnicas fotogramétricas y batimétricas (CEDEX, 1992).

La técnica fotogramétrica permite determinar a partir de fotografías aéreas la topografía de la parte del embalse no cubierta por agua el día que se realizó el vuelo fotogramétrico. Mediante los trabajos batimétricos se recaba la información topográfica referente a la parte del vaso del embalse que se encontraba sumergida en la fecha del reconocimiento.

2.2. RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN DEL EMBALSE

Un embalse se puede clasificar en cuatro tipos de acuerdo con el régimen de explotación al que está sometido (Tabla 1).

En el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX se analiza el sesgo estadístico de la distribución de valores correspondiente al volumen de agua embalsado a lo largo del tiempo. En función del valor que toma el sesgo de esta distribución se establece la categoría del embalse. Así, valores

del sesgo comprendidos entre 1 y 0,7 corresponden a embalses de tipo 1; entre 0,7 y 0 caracterizan a embalses de tipo 2; entre 0 y -0,7 varían los embalses de tipo 3, y entre -0,7 y -1 se situarían los embalses de tipo 4.

2.3. CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE EMBALSES

De las partículas que son aportadas por los cauces fluviales hasta un embalse la mayor parte queda sedimentada y el resto escapa por los desagües y tomas de la presa.

La capacidad de un embalse determinado para retener las partículas que llegan hasta él es lo que se denomina "capacidad de retención de sedimentos" (*trap efficiency*) y se expresa como el porcentaje de sedimentos, del total recibido, que se acumula en su fondo.

Son tres los factores que inciden de forma más notable en dicha capacidad de retención (Gottschalk, 1984): a) las características de las partículas aportadas (tamaño, forma y composición química, fundamentalmente) y la velocidad del flujo de agua a lo largo del embalse; b) el tiempo de retención del agua en el embalse, que depende del régimen de explotación al que éste se encuentra sometido; c) la naturaleza (posición y dimensiones) de las estructuras de desagüe y toma.

Estos tres factores son muy difíciles de cuantificar por lo que en la práctica para evaluar la capacidad de retención de un embalse se recurre a relaciones empíricas. Entre éstas, las más utilizadas son las curvas de Churchill (1948) y de Brune (1953) y la ecuación de Brown (1943).

Churchill (1948) estableció una relación con el porcentaje de sedimentos que pasan a través del embalse versus un índice de sedimentación (Figura 1). Definió dicho índice de sedimentación como el cociente entre el periodo de retención y la velocidad media de descarga de agua. La relación de Churchill se emplea para embalses pequeños o para embalses destinados a la retención de sedimentos.

Las curvas de Brune (1953) surgen de relacionar el porcentaje de sedimentos retenidos en un embalse con el tiempo de retención del agua en el mismo (Figura 1). Este tiempo de retención se obtiene de dividir la capacidad del embalse entre los caudales medios que entran en él. El método de Brune se usa en aquellos embalses de tamaño medio o grande que están destinados a almacenar agua.

La ecuación de Brown (1943) se basa en la relación existente entre la capacidad del embalse y la superficie de la cuenca de drenaje y se expresa como sigue:

$$C_R = 100 [1 - 1 / (1 + KC / W)]$$

Donde:

C_R : Capacidad de retención del embalse (%).

C : Capacidad del embalse en miles de m^3 .

W : Área de drenaje (km^2).

K : Coeficiente que varía entre 0,09 y 2,1 en función del régimen de explotación del embalse del modo que se expresa en la tabla 2.

TIPO DE EMBALSE	RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN
TIPO 1	Embalses siempre o casi siempre llenos
TIPO 2	Embalses con descensos moderados del nivel del agua
TIPO 3	Embalses con descensos considerables del nivel del agua
TIPO 4	Embalses normalmente vacíos

TABLA 1. Tipos de embalses en función del régimen de explotación. Modificado de ICOLD (1989).

EMBALSE	K
TIPO 1	2,10
TIPO 2	1,43
TIPO 3	0,76
TIPO 4	0,09

TABLA 2. Valores modificados del coeficiente k de la ecuación de Brown en función del tipo de embalse.

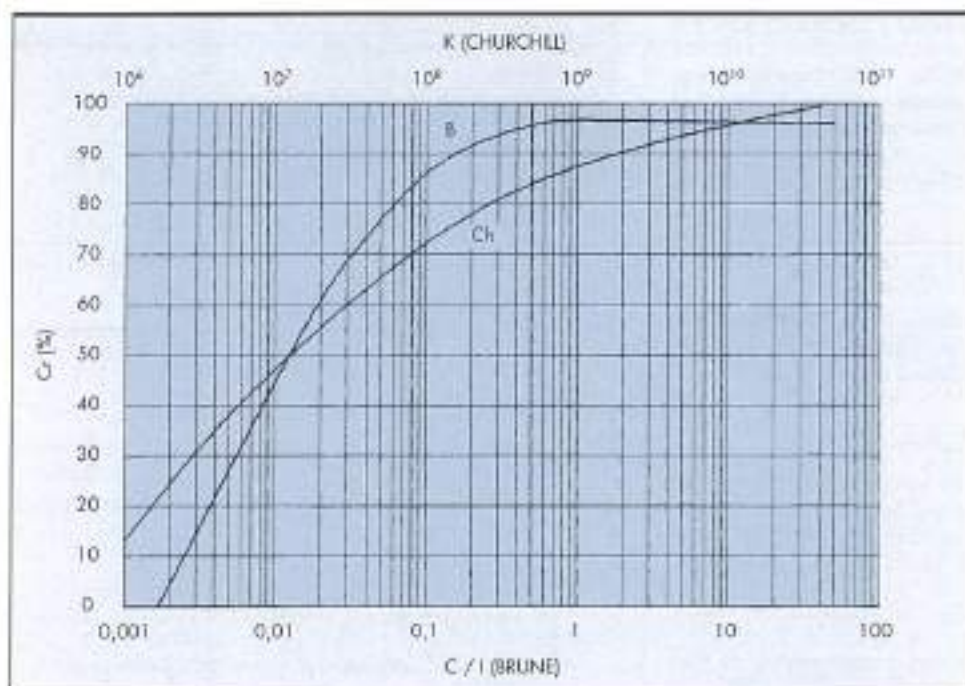


FIGURA 1. Curvas de capacidad de retención de sedimentos en embalses. Cr: Coeficiente de retención de sedimentos; B: Curva media de Brune; Ch: Curva media de Churchill; K: IS (Índice de sedimentación de Churchill) = g ; C/I : Capacidad / Aportación media anual.

En el presente trabajo se ha determinado la capacidad de retención de los embalses empleando la ecuación de Brown (1943) ya que este método no sólo es el más apropiado para los embalses situados en las zonas de cabecera de una cuenca (Butcher et al., 1993), condición que cumplen la mayoría de los embalses estudiados, sino que también requiere de un número más reducido de datos.

2.4. DENSIDAD DE LOS SEDIMENTOS ACUMULADOS EN LOS EMBALSES

Calculado el volumen de sedimentos acumulados en un embalse es necesario conocer la densidad de éstos para transformar dicha medida en unidades de masa (toneladas).

En general, los autores coinciden en señalar que son tres los factores que condicionan la densidad de las partículas sedimentadas en un embalse. Estos factores son: a) el régimen de explotación del embalse, b) la naturaleza de los sedimentos (textura y composición) y c) el grado de compactación de los sedimentos.

- El régimen de explotación del embalse condiciona que los sedimentos estén frecuentemente expuestos o sumergidos (tabla 1). Los sedimentos de grano fino (arcillas) cuando se encuentran sometidos a frecuentes exposiciones se compactan y adquieren una densidad mayor que los del mismo tamaño que se encuentran sumergidos durante períodos de tiempo más prolongados.
- El tamaño de las partículas que entran en un embalse influye de forma notable sobre la densidad, de modo que un sedimento compuesto de granos de tamaño arena ($2 - 0,062$ mm) o limo ($0,062 - 0,004$ mm) presentarán mayor densidad que otro sedimento con predominio de partículas de tamaño arcilla ($< 0,004$ mm).

La naturaleza mineralógica de las partículas de tamaño arcilloso también juega un papel importante en la densidad de los sedimentos. Esto es debido, por un lado, a que

existen grandes diferencias de tamaño entre los distintos grupos mineralógicos de la arcilla y, por otro lado, a que algunas arcillas, entre las que se encuentra el grupo de las montmorillonitas, tienen una estructura molecular inestable. Esta estructura causa que estas arcillas se expanden en contacto con el agua, propiedad que, a su vez, las dota de un mayor grado de compresibilidad. Así un sedimento compuesto por montmorillonitas necesitará más tiempo para compactarse que otro en el que predominan arcillas de otra naturaleza.

- Los sedimentos se compactan y aumentan su densidad a medida que se depositan nuevas capas. La velocidad de compactación guarda estrecha relación con el tamaño de los sedimentos de tal modo que existe una pauta general según la cual las partículas de grano grueso se consolidan de una forma más rápida que las de grano fino.

Claro está que, con todas estas variables en juego, para obtener una medida muy precisa de la densidad sería necesario disponer de un gran número de sondeos en los que quedaran reflejadas tanto las variaciones verticales como laterales de los sedimentos de los embalses.

Un muestreo de esta naturaleza es muy costoso por lo que normalmente, como ocurre en nuestro caso, sólo se dispone de un número discreto de muestras procedentes de las capas superiores del sedimento recogidas a lo largo y ancho del embalse.

Para obtener la densidad media de los sedimentos a partir de estas muestras se aplican fórmulas que tengan en cuenta todos los factores que influyen en la densidad. Una de estas fórmulas fue desarrollada por Lane y Koelzer (1943) y se basa en el tiempo y en el tamaño de grano de los constituyentes:

$$W = W_1 + K \log T$$

En esta ecuación, W representa la densidad de los sedimentos después de T años de compactación; W_1 es la densi-

dad inicial del sedimento considerada a partir de 1 año, y K es una constante.

Basándose en la anterior, Miller (1953) estableció una nueva ecuación que considera además el cambio de densidad anual que experimentan los sedimentos. Esta ecuación es la más aceptada actualmente y es también la que se ha empleado en el presente trabajo. Dicha ecuación se enuncia del siguiente modo:

$$W_T = W_1 + 0.4343K \left(\frac{T}{T-1} (Int) - 1 \right)$$

W_T representa la densidad media de los sedimentos después de T años de explotación del embalse; W_1 es la densidad inicial que se puede calcular, a su vez, usando la siguiente expresión:

$$W_1 = W_c P_c + W_l P_l + W_a P_a$$

Donde P_a , P_l y P_c representan los porcentajes de arcilla, limo y arena, respectivamente, que integran el sedimento. W_c , W_l y W_a son coeficientes que indican la densidad inicial de arcilla, limo y arena y toman los valores que aparecen recogidos en la Tabla 3.

TIPO DE EMBALSE	W_c	W_l	W_a
1	416	1.120	1.550
2	513	1.130	1.550
3	609	1.145	1.550
4	641	1.150	1.550

TABLA 3. Variación de los coeficientes W_c , W_l y W_a en función del régimen de explotación del embalse. Modificada de ICOLD (1989).

K es una constante que depende del régimen de explotación del embalse y el tamaño de los sedimentos y puede tomar los valores expresados en la Tabla 4.

TIPO DE EMBALSE	K		
	ARENA	LIPO	ARCILLA
1	0	91	256
2	0	50	187
3	0	15	80
4	0	0	0

TABLA 4. Variación de la constante K en función del régimen de explotación del embalse. Modificada de ICOLD (1989).

2.5. DEGRADACIÓN ESPECÍFICA DE UNA CUENCA

Una vez calculada la masa de sedimentos que ha quedado retenida en un embalse dado, se puede obtener la degradación específica (DE) de su cuenca de drenaje aplicando la siguiente expresión:

$$DE = \frac{SAE}{Tf \times (Ac - Ae)}$$

Donde:

SAE: cantidad de sedimentos que se han depositado en el embalse (t).

Tf: tiempo de funcionamiento del embalse (años).

Ac: superficie de la cuenca de drenaje (km^2).

Ae: superficie del embalse (km^2).

2.6. PROCEDENCIA DE LOS SEDIMENTOS

Los sedimentos que se acumulan en los embalses pueden ser, en cuanto a su procedencia se refiere, externos, si se originan fuera del embalse o internos, si se producen en el agua del mismo. Los sedimentos fluviales, coluviales, eólicos o derivados de la erosión por oleaje de las orillas, componen el grupo de los sedimentos externos; mientras que la materia orgánica, los precipitados salinos y la sílice biogénica (esqueletos de algas diatomeas), se producen mayoritariamente en el interior del embalse (Figura 2). Algunos autores inclu-

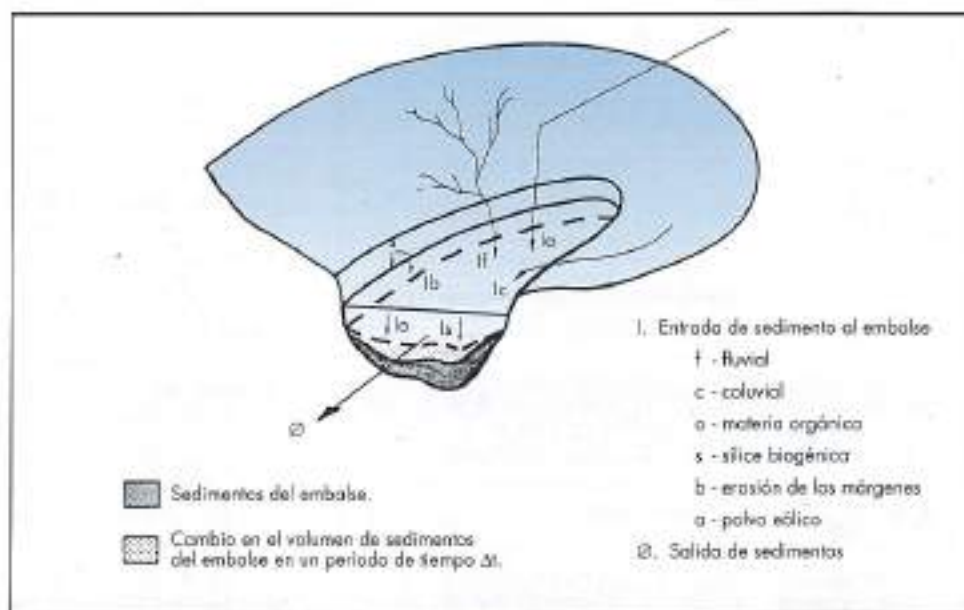


FIGURA 2. Fuentes de sedimentos en un embalse. Tomada de Owens y Slaymaker.

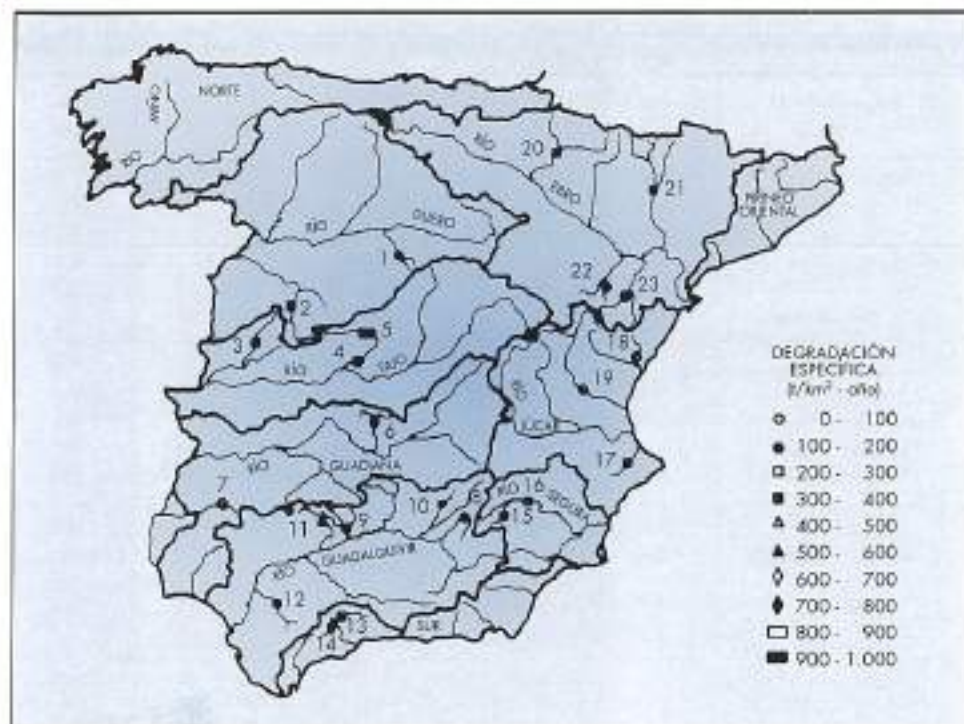


FIGURA 3. Situación geográfica y valores de degradación específica de los embalses estudiados. Relación de embalses: 1) Burguillos; 2) Santa Teresa; 3) Gabriel y Galán; 4) Castejón; 5) San Juan; 6) Torre de Abad; 7) Valdecañas; 8) Tranco de Beas; 9) Guadalquivir; 10) Guadalquivir; 11) Puente Nuevo; 12) Torre del Águila; 13) Conde de Guadalquivir; 14) Guadalquivir; 15) Taibilla; 16) Cauceja; 17) Benicarló; 18) María Cristina; 19) Busea; 20) Yosa; 21) Barasona; 22) Cueva Foradada; 23) Santalea.

yen todo el contenido de materia orgánica en el grupo de los sedimentos internos. Sin embargo, nuestra experiencia confirma que un alto porcentaje de ésta es arrastrada hasta los embalses por los cauces fluviales.

De todo este conjunto de sedimentos, los únicos que permiten evaluar correctamente la degradación específica y tasas de erosión hídrica de una cuenca son los aportados por el sistema fluvial. Sin embargo, dadas las dificultades que entraña cuantificar los aportes procedentes de cada una de las fuentes, en la mayor parte de los trabajos publicados, la degradación específica se ha estimado incorrectamente, considerando el conjunto total de sedimentos (Foster et al., 1985; Stott et al., 1988; Owens y Slaymaker, 1993).

En este caso el CEDEX realiza diversos análisis sobre las características del sedimento lo que permite discriminar aquellos embalses que generan un volumen importante de sedimentos internos. Los análisis a los que se hace alusión son: análisis granulométricos, análisis geoquímicos, curvas de evolución granulométrica y geoquímica de los sedimentos a lo largo del embalse y, ocasionalmente, se ha contado también, con observaciones petrográficas (lupa binocular y microscopio electrónico de barrido).

Desafortunadamente, estos métodos no permiten discriminar el origen (coluvial, fluvial, eólico, etc) de los aportes externos y tampoco se han realizado mediciones encaminadas a evaluar la importancia relativa de cada una de ellas. Así, en este estudio se asume que todos los aportes externos que se reciben en el embalse han sido transportados por los cauces fluviales y, por tanto, se han considerado despreciables otras posibles fuentes externas complementarias.

3. RESULTADOS

Hasta ahora el procedimiento descrito se ha aplicado aproximadamente a 60 embalses. En este trabajo se ha

seleccionado, entre todos ellos, una muestra de 23 embalses que aparecen distribuidos en ocho Confederaciones Hidrográficas (Figura 3). La relación de estos embalses y los resultados del estudio aparecen resumidos en las Tablas 5 y 6.

En la Tabla 5 se incluye la siguiente información sobre los embalses estudiados:

- Superficie de la cuenca. A la vista de esta columna de datos se comprueba que en el estudio están representadas cuencas que cubren un rango muy amplio de tamaños que oscila entre los 220 km² de la cuenca del embalse de Busea y los 2.181 km² de la cuenca de Yosa.
- Años de funcionamiento del embalse hasta la fecha en que se realizó el estudio batimétrico. El periodo de funcionamiento varía entre 8 y 71 años que corresponde a los embalses de Taibilla y María Cristina, respectivamente.
- Tipo de embalse, según el régimen de explotación (Tabla 1). Se aprecia que los de tipos 2 y 3 son los más comunes en el conjunto estudiado.
- Capacidad de retención (CR). Este parámetro ha sido calculado según la ecuación de Brown (1942). De acuerdo con esta ecuación, los embalses objeto de estudio retienen más del 91% de las partículas que entran en el vaso. En los embalses con gran capacidad de almacenamiento este porcentaje se aproxima al 100%.
- Número de muestras de sedimentos recogidas para realizar el análisis sedimentológico. Este número, que varía entre 23 y 237, está en relación con la morfología y tamaño del embalse.
- Densidad del sedimento expresada en kg/m³, que se ha obtenido aplicando la ecuación de Miller.

La densidad varía en un intervalo que oscila entre 1.020 y 1.435 kg/m³ y el valor medio se sitúa en torno a

NOMBRE DEL EMBALSE	SUPERFICIE (km ²)	AÑOS EN USO	TIPO	CE	Nº DE MUESTRAS	DENSIDAD (kg / m ³)
Buigomillado	800	36	2	96,27	35	1.358
Santa Teresa	1.858	29	3	99,50	90	1.435
Gabriel y Galán	1.846	29	3	99,73	112	1.400
Cazalegas	1.955	41	1	91,53	43	1.387
San Juan	863	37	1	99,75	63	1.267
Torre de Abraham	761	14	2	99,12	62	1.219
Vánuaga	1.156	26	2	95,95	47	1.154
Guadalén	1.281	23	2	99,00	31	1.094
Tranco de Beas	550	45	2	99,50	95	1.166
Guadalmellato	1.195	64	3	93,00	50	1.101
Torre del Águila	439	45	3	98,18	52	1.026
Fuente Nueva	559	22	3	99,00	237	1.249
Guadalhorce	965	19	3	95,20	47	1.109
Conde de Guadalhorce	268	70	3	99,78	43	1.043
Tabilla	380	8	2	97,34	33	1.143
Canaja	1.060	32	2	99,80	140	1.156
Beniarés	469	18	2	98,94	49	1.022
María Cristina	1.334	71	3	96,00	54	1.020
Buseo	220	68	2	98,07	38	1.202
Yeso	2.181	26	2	99,67	85	1.044
Barasona	1.224	61	2	97,80	72	1.112
Cueva Foradada	643,5	66	2	97,00	39	1.100
Santolea	1.221	61	2	98,00	59	1.109

TABLA 5. Datos generales de los embalses estudiados.

1.100 kg/m³. El valor más alto de densidad lo presenta el embalse de Santa Teresa con la siguiente granulometría media: arena (72,51%), limo (26,11%) y arcilla (1,38%). En el extremo opuesto se encuentra el embalse de María Cristina que tiene como componentes medios: arena (8,04%), limo (51,85%) y arcilla (40,11%).

En la Tabla 6 aparecen reflejados la cantidad de sedimentos acumulados en los embalses (S.A.E.) y los valores de degradación específica de las cuencas estudiadas. La cantidad de sedimentos de un embalse resulta de multiplicar el volumen de sedimentos, obtenido mediante fotogrametría y batimetría, por el valor de la densidad señalado en la Tabla 5. El dato que se obtiene del cálculo anterior se corrige teniendo en cuenta el coeficiente de retención. El valor de degradación específica (D.E.) se obtiene de dividir la cantidad de sedimentos acumulados (expresada en toneladas) entre los años de funcionamiento del embalse y la superficie de la cuenca (km²), una vez sustraída de ésta la superficie ocupada por el embalse.

A la vista de los valores de degradación específica, se comprueba que ésta presenta un rango de variación muy amplio comprendido entre un valor pequeño de 18 t/km²·año (Santolea) y otro muy elevado de 964 t/km²·año (San Juan). En general, se pone de manifiesto que los valores más altos de degradación específica se presentan en las cuencas de los embalses que se ubican en los sistemas montañosos más jóvenes (Sistema Central, Pirineos y Cor-

dilleras Béticas). Por el contrario, en las cuencas situadas en zonas con relieves más evolucionadas (Cuenca del Júcar y margen derecha del Ebro) se dan las tasas de aportes y sedimentos más reducidas.

Se puede destacar también que dentro de una misma cuenca hidrográfica los valores de degradación específica varían notablemente de unos embalses a otros, aun en los casos en los que éstos se encuentran próximos, San Juan y Cazalegas, por ejemplo (Figura 3).

En las Tablas 7 y 8 aparecen recopilados algunos datos de degradación específica publicados en diversas revistas especializadas y que hacen referencia a cuencas fluviales situadas en diferentes países y contextos sedimentarios. Estos datos han sido determinados mediante diferentes metodologías (carga de sedimentos en suspensión en ríos, sedimentos acumulados en lagos o embalses y avance de complejos deltaicos).

Si se establece una comparación entre los resultados obtenidos en el presente estudio con los recogidos en la Tabla 7, se puede comprobar que las tasas de degradación específica en las cuencas estudiadas aquí varían en el mismo orden de magnitud que las otras cuencas seleccionadas. Sin embargo, el valor medio de aproximadamente 300 t/km²·año que se obtiene a partir de las 23 cuencas reflejadas en este trabajo es elevado si se contrasta, por ejemplo, con la degradación específica media europea y es sólo equiparable con la asiática (600 t/km²·año) (Tabla 8).

NOMBRE DEL EMBALSE	SEDIMENTOS ACUMULADOS (t)	D.E. ($t/km^2 \cdot año$)
Burgomillado	3.552.116	122,29
Santa Teena	18.193.526	337,65
Gabriel y Galán	18.443.426	344,51
Cazalega	5.590.811	69,75
San Juan	30.811.916	964,95
Torre de Abraham	3.879.441	364,13
Valuenga	2.206.711	73
Guadalén	10.738.880	364,48
Tranco de Beas	4.429.507	178,97
Guadalmellato	19.306.774	252,44
Torre del Águila	5.848.200	296,00
Puente Nuevo	6.219.645	516,00
Guadalhorce	4.601.418	250,96
Conde de Guadalhorce	11.499.804	612,99
Torbillo	1.175.690	386,74
Cenajo	38.418.158	220
Benarrán	3.015.229	357,17
María Cristina	3.984.375	40,46
Buaco	971.203	64,92
Yalo	21.891.918	386,06
Barasona	28.157.022	377,00
Cueva Foradada	7.503.814	176,68
Santolea	1.343.835	18,04

TABLA 6. Valores de la degradación específica de los embalses estudiados.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado valores de degradación específica de cuencas de embalses obtenidos a partir de los sedimentos acumulados en los mismos.

La metodología empleada es muy precisa aunque laboriosa, ya que requiere del uso de técnicas fotogramétricas, batimétricas y sedimentológicas, así como del cálculo de diferentes parámetros: procedencia, granulometría, densidad del sedimento, régimen de explotación, capacidad de retención del embalse, etc.

Los resultados de degradación específica obtenidos en las cuencas de los 23 embalses seleccionados para este trabajo (de los más de mil existentes en España) fluctúan entre 18 y 964 $t/km^2 \cdot año$, situándose la media en torno a 300 $t/km^2 \cdot año$, valor que ha de considerarse como elevado. La labor, ya emprendida, de ampliar este estudio a mayor número de embalses permitirá aumentar la representatividad de estos valores.

De las cuencas estudiadas, las ubicadas en las depresiones del Guadalquivir y del Sur son las que aportan a los embalses las cantidades medias más elevadas de sedimentos. En la cuenca del Júcar y en la margen derecha del Ebro se dan, por el contrario, las degradaciones específicas medias más bajas.

Entre los procedimientos que se usan para evaluar la degradación específica, el descrito en este estudio se revela como el más apropiado para aplicar en España.

5. BIBLIOGRAFÍA

- AL-JIBBURI, H. y MCMANUS, J. (1993). Estimation of Sediment Yields in the Cameron Reservoir Catchment Fife Scotland, Using Two Different Approaches. En: *Geomorphology and Sedimentology of lakes and Reservoirs*, Ed. J. McManus y R. W. Duck. Wiley, 93-104.
- BROWN, C. B. (1943). Discussion of "Sedimentation in reservoirs by J. Witzig". *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 109, 1.080-1.086.
- BRUNE, G. M. (1953). Trap Efficiency of Reservoirs. *Transactions of American Geophysical Union*, 34, (3), June, 407-418.
- CEDEX (1992). *Informe sobre la situación de los estudios de aforos de sólidos, batimetría y sedimentología de embalses hasta 1992*. Dirección General de Obras Hidráulicas (MOPTMA). 38 pp.
- CHURCHILL, M. A. (1948). Discussion of Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data por L. C. Gottschalk. *Proceedings of Federal Inter-Agency Sedimentation Conference*, Denver, Colorado.
- DUCK, R. W. y MCMANUS, J. (1987). Sediment yields in lowland Scotland derived from reservoir surveys. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 78, 369-377.
- DUCK, R. W. y MCMANUS, J. (1993). Sedimentation in Natural and Artificial Impoundments: as Indicator of Evolving Climate, Land use and Dynamic Conditions. En: *Geomorphology and Sedimentology of Lakes and Reservoirs*. Ed. J. Mcmanus y R. W. Duck. Wiley, 1-3.
- FOSTER, I. D. L.; DEARING, J. A.; GREW, R. y ÖREND, K. (1990). The Sedimentary data base: and appraisal of lake and reservoir sediment based studies of sediment yield. En: *Erosion, Transport and Deposition Processes*, Ed. D. E. Walling, A. Yair y S. Berkowicz. I.A.H.S. Publication, 189, 19-43.
- FOURNIER, F. (1960). *Climat et érosion. La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques*. Presses Universitaires de France, 201 pp.
- GILBERT, R. (1973). Sedimentation in Lilloet Lake, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 12, 1.697-1.711.
- GOTTSCHALK, L. C. (1964). Reservoir Sedimentation. En: *Handbook of Applied Hydrology*. Ed. V. Te Chow. New York. McGraw-Hill, 17.1-17.33.
- GRAVILOVIC, S. y DJOROVIC, M. (1974). *Quantitative classification of torren waterways*. Institute for Forestry and Wood Industry-Belgrad.
- GREGORY, K. J. y WALLING, D. E. (1973). *Drainage Basin Form and Process*. Edward Arnold, London.
- HICKIN, E. J. (1989). Contemporary Squamish River Sediment flux to Howe Sound, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26, 1.953-1.963.
- I.C.O.L.D. (1989). *Sedimentation Control of reservoirs. Guidelines*. Bulletin 67, 159 pp.
- JOLLY, J. P. (1982). A proposed method for accurately calculating sediment yields from reservoir deposition volumes. En: *Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment yield*. I.A.S.H. Publication, 137, 153-161.
- LANE, E. N. y KOELZER, V. A. (1943). Density of Sediment Deposited in Reservoir. *Federal Inter - Agency Sedimenta-*

RÍO O CUENCA	PAÍS	D. E. (t / km ² · año)	FUENTE
Sena	Francia	17	Fournier (1960)
Garona	Francia	250	
Rin	Países Bajos	17	
Po	Italia	280	Sundborg (1983)
Vistula	Polonia	7	
Danubio	Rumania	80	
Don	URSS	11	
Obi	URSS	6	
Niger	Nigeria	19	
Congo	Zaire	18	
Misipi	EEUU	91	
Amazonas	Brasil	139	
Paraná	Argentina	38	
Indo	Pakistán	450	
Ganges	India - Bangladesh	1.500	
Brahmaputra	India - Bangladesh	1.100	
Irawaddy	Birmania	700	
Rio Rojo	Vietnam	1.100	
Rio Perla	China	260	
Yangtsé	China	280	
Amarillo	China	2.480	
Ulloet	Canadá	350	Gilbert (1973)
Squamish	Canadá	500	Hickin (1989)
Seymour	Canadá	60	Owens y Slaymaker (1993)
Fraser	Canadá	81	
Varios lagos	Canadá	0,005 - 0,220	Duck y McManus (1987) Al-Jiburi y McManus (1993)
Varios embalses	Escocia	2 - 52	

TABLA 7. Valores de degradación específica de diversas cuencas publicados por diferentes autores.

CONTINENTE	SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN (t / km ² · año)
ÁFRICA	27
ASIA	600
AUSTRALIA	45
EUROPA	35
NORTEAMÉRICA	96
SURAMÉRICA	63

TABLA 8. Degradación específica media de los continentes estimada a partir de la descarga de sedimentos fluviales, según Gregory y Walling (1973).

tion Project. Report n° 9. Minneapolis, Minnesota.
LE ROUX, J. S. y ROOS, Z. N. (1982). Rate of soil erosion

from the Wural dam catchment calculated from sediments trapped in the dam. *Zeitschrift für geomorphologie*, Suppl. 26, 315-329.

MILLER, C. R. (1953). *Determination of the unit weight of sediment for use in sediment volumen computations*. U.S. Bureau of reclamations.

OWENS, PH. y SLAYMAKER, O. (1993). Lacustrine sediment budgets in the Coast Mountains of British Columbia, Canadá. En: *Geomorphology and Sedimentology of lakes and Reservoirs*. Ed. J. Mcmanus y R. W. Duck. Wiley, 105-123.

STOTT, A. P.; BUTCHER, D. P. y PEMBERTON, T. J. L. (1988). Problems in the use of reservoir sedimentation data to estimate erosion rates. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 30, 205-226.

SUNDBORG, A. (1983). Los problemas de la sedimentación en las cuencas fluviales. *La naturaleza y sus recursos*, 19, 10-21.

VANONI, V. A. (Ed.) (1975). *Sedimentation Engineering. Reports in Engineering Practice*, 54, A.S.C.E., New York, 745 pp.



Distribuidor San M. del Alcarín Acceso Puerto de Valencia

Ahorramos
tiempo, ganamos
en seguridad.



TRATAMIENTO DE AGUAS DESDE 1964

		Qm ³ /día	POBLACION EQUIVALENTE
AGUAS POTABLES (municipales, industriales y desalación)	Construcción	2.666.276	11 millones
	Explotación	311.303	1,3 millones
AGUAS RESIDUALES (urbanas, industriales)	Construcción	2.201.822	8,9 millones
	Explotación	1.858.650	7,6 millones
TOTAL		7.038.051	28,8 millones

MAS DE 1.400 PLANTAS CONSTRUIDAS EN ESPAÑA Y EN EL EXTRANJERO

Para más información sobre tecnologías y financiación, póngase en contacto con el teléfono 94-481.73.90, fax 94-481.73.91 ó en el EMAIL: cadagu01@sarenet.es