



## **SEDIMENTOS EN EMBALSES – APLICACIÓN DE MODELOS**

**Santiago Reyna, Teresa Reyna, María Lábaque, César Riha, Silvia Rafaelli**

Maestría en Ciencias de la ingeniería – Mención en Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.  
Universidad Nacional de Córdoba

E-mail: santiagoreyna@gmail.com; teresamaria.reyna@gmail.com

### **RESUMEN**

La Provincia de Córdoba se encuentra surcada por numerosos cursos de aguas que circulan entre valles y quebradas; esta situación ha favorecido la construcción sobre sus cauces de numerosas presas y embalses que le han otorgado a la provincia una fisonomía particular y la posibilidad del uso de este recurso para múltiples fines (suministro de agua para consumo, para riego, para la producción de energía hidroeléctrica, para recreación, etc.) Pero este tipo de estructuras poseen una vida útil que depende, en parte, de la velocidad con que pierde su capacidad de almacenamiento por causa del sedimento que las corrientes depositan en él. Establecer el estado actual y la disponibilidad futura de este recurso es fundamental para planificar el desarrollo de esta provincia. En este trabajo se presenta el estudio realizado para determinar los valores de la degradación específica de las cuencas de aporte a los principales embalses de la Provincia de Córdoba por uno de los métodos para determinar la degradación (Djorovic y Gravilovic, 1974) y se determina su tarquinamiento.

### **ABSTRACT**

The province of Córdoba is crossed by numerous watercourses flowing through valleys and gorges, this situation has promoted the construction of numerous channels on their dams and reservoirs that have given the province a particular appearance and de possibility of using this resource for multiple purposes (drinking water supply for irrigation, hydropower, recreation, etc.).

But such structure have a useful life that depends in part on how quickly you lose storage capacity because of silt deposited in it flows. Establish the current and future availability of this resource is essential for planning the development of this province.

This paper presents the study to determine the values of the specific degradation of the watershed contribution to the main reservoirs of de province of Córdoba one of the methods for determining degradation (Djorovic and Gravilovic, 1974) and determines the tarquin.

## INTRODUCTION

La vida útil real de un embalse puede diferir en mucho de la que se da como estimada y depende del criterio que se aplique para definirla.

La erosión del suelo tiene como efectos principales la pérdida de apoyo necesarios para el crecimiento de las plantas y el transporte de los sedimentos en ríos y embalses lo que conduce a una pérdida de capacidad de embalse y disminución de la vida útil de los mismos. Los inadecuados usos del suelo como sobrepastoreo, prácticas agrícolas inadecuadas, incendios, desarrollo urbano desordenado entre otros, incrementan los riesgos de erosión los cuales son particularmente problemático en las regiones áridas.

Uno de los principales problemas de las presas y embalses es la sedimentación. Los sedimentos son recogidos por el flujo de agua en su recorrido por la cuenca y se acumulan en el fondo. Es preciso tener presente que la mayor parte de los sedimentos arrastrados y que se depositan en los embalses, representan tierras erosionadas de la cuenca, es decir, tierra que se pierde por fenómenos de erosión. De allí entonces, que la mejor manera de evitar la colmatación prematura de un embalse es realizar una práctica adecuada de suelos en la cuenca y el control de los procesos de deforestación.

Para estimar la vida útil es usual considerar que todo el sedimento que genera la cuenca es retenido en el embalse, "eficiencia de atrape" de 100%, lo cual puede no ser efectivo. Es fácil comprender que en un embalse relativamente pequeño (100 hm<sup>3</sup> de capacidad, por ejemplo) el volumen de una creciente puede ser varias veces superior a la capacidad del embalse; en este caso, una parte de la descarga sólida pasará directamente por el vertedero.

De acuerdo a lo expresado por Fernández (1998) y luego actualizado por Rafaelli (2003) existe extensa bibliografía relacionada a la estimación cuantitativa de erosión hídrica por escurrimiento superficial:

Métodos estadísticos se basan en la determinación de una relación entre las mediciones de la degradación específica y los parámetros del clima y del relieve. Dentro de este grupo se puede citar al método de Fournier (1960, 1962), Jansen y Painter (1974), Dendy y Bolton (1976), Djorovic y Gravilovic (1974).

Se aplicaron los métodos antes citados para la estimación de la degradación específica de las cuencas de aporte a los embalses más significativos de la Provincia. Al contrastar los resultados obtenidos por el cálculo con datos de algunos de los embalses, se consideró como más representativo el valor obtenido por el método de Djorovic y Gravilovic (1974).

A continuación se presenta una descripción de los métodos, los valores considerados y los resultados obtenidos.

### **Método de Fournier (1960, 1962)**

Este método evalúa la degradación específica de una cuenca, con base en sólo dos factores que intervienen en el fenómeno de erosión hídrica: el clima (como precipitación y temperatura) y el relieve. Estudiando numerosas cuencas en todo el mundo concluyó que la abundancia pluvial no es suficiente por sí sola para justificar la degradación específica de una cuenca. Una misma degradación puede ser debida a escorrentías muy diferentes.

Las cuencas que registraban una degradación específica elevada tenían un desigual reparto de la precipitación y una concentración de la lluvia en un período corto. Sin embargo las cuencas con un régimen de precipitaciones más uniforme tenían degradaciones inferiores.

Después de estudiar varios coeficientes se llegó a la conclusión de que el índice que mejor se correlacionaba con la degradación específica era aquél que relaciona la abundancia con la concentración, estableciendo el “índice de agresividad climática de Fournier” F:

$$F = p^2 / P$$

Donde: p es la precipitación caída en el mes más lluvioso del año (en mm) y P es la precipitación anual (en mm).

La evaluación del factor clima por medio del índice de Fournier se complementa con el tipo de clima de la cuenca según la clasificación de Turc. Según ésta, las zonas climáticas se establecen de acuerdo a ciertos criterios, definiendo zona húmeda (criterio  $P > 0,632 L$ ), zona semiárida (criterio  $0,316 L < P < 0,632 L$ ) y árida ( $P < 0,316 L$ ), donde P es la precipitación media anual (en mm),  $L = (300 + 25 t_m + 0,05 t_m^3)$  y  $t_m$  la temperatura media anual en °C.

El relieve se caracteriza por medio del coeficiente orográfico ( $H * \text{tg } \alpha$ ), donde H es la altura media de la cuenca, siendo ésta la ordenada media de la curva hipsométrica referida a la cota mínima de la cuenca y  $\text{tg } \alpha$  es el coeficiente de  $\square$ ansen  $\square$ ad de Martone, igual a la altitud media dividida por la superficie de la cuenca.

Según estos criterios, se definen cuatro clases de cuencas (de A a D) en función del coeficiente orográfico y el índice de agresividad climática de Fournier. Finalmente, la degradación específica en cada cuenca se obtiene mediante una correlación entre la degradación específica Y (en  $t/\text{km}^2/\text{año}$ ) y el factor de Fournier F (en mm).

Con estos principios este autor también desarrolla una fórmula que predice el transporte de sedimentos (1962):

$$\text{Log}_{10} DS = 2,65 \text{log}_{10} (p^2 / P) + 0,46 \text{log}_{10} (H^2 / S) - 1,56$$

donde DS es el aforo de sedimentos suspendidos (en  $t/\text{km}^2/\text{año}$ ), p es la precipitación caída en el mes más lluvioso del año (en mm) y P es la precipitación anual (en mm), H es el relieve medio de la cuenca o diferencia entre la altitud principal y la altitud media (en m) y S el área de captación (en  $\text{km}^2$ ).

### **Método de Jansen y Painter (1974)**

Se basa en cuatro ecuaciones de regresión para cuencas mayores de  $5000 \text{ km}^2$  que pueden ser aplicadas para diferentes climas y topografías. El volumen de sedimentos producidos se incrementa con la escorrentía, altitud, relieve, precipitación, temperatura y susceptibilidad del material. La longitud se evalúa considerando la longitud del cauce principal, el relieve se define como la diferencia en metros entre la altitud del punto de toma de sedimentos y la altitud de la divisoria de agua de la cabecera del cauce principal.

Se definen 4 zonas climáticas: a) tropical lluvioso, el mes más frío tiene una temperatura media mayor de  $18^\circ\text{C}$ , b) seco, c) húmedo mesotérmico; el mes más frío tiene una temperatura media superior a los  $0^\circ\text{C}$  y el mes más cálido por encima de los  $10^\circ\text{C}$ , d) húmedo mesotérmico; el mes más frío tiene una temperatura media por debajo a los  $0^\circ\text{C}$  y el mes más cálido por encima de los  $10^\circ\text{C}$ .

Las ecuaciones de regresión definidas en función de la zona climática, son:

Clima A:

$$\text{log}_{10} Y = 4,354 + 1,527 \text{log}_{10} D - 0,302 \text{log}_{10} A + 0,296 \text{log}_{10} Lr - 3,417 \text{log}_{10} T$$

#### Clima B:

$$\log_{10} Y = -10,133 - 0,34 \log_{10} D + 1,59 \log_{10} H + 3,704 \log_{10} P + 0,936 \log_{10} T - 3,49 \log_{10} V$$

#### Clima C:

$$\log_{10} Y = -6,678 + 1,003 \log_{10} D + 0,686 \log_{10} Lr + 4,287 \log_{10} T - 5,031 \log_{10} V$$

#### Clima D:

$$\log_{10} Y = -5,073 + 0,514 \log_{10} H + 2,195 \log_{10} P - 3,706 \log_{10} V + 1,449 \log_{10} G$$

Donde: Y es el sedimento (en  $\text{tn}/\text{km}^2$ ), A el área de la cuenca (en  $\text{km}^2$ ), D la escorrentía anual (en  $\text{m}^3/\text{km}^2$ ), Lr la relación relieve-longitud (en  $\text{m}/\text{km}$ ), T la temperatura media anual (en  $^{\circ}\text{C}$ ), H la altitud sobre el nivel del mar, P la precipitación media anual (en  $\text{mm}$ ), V la protección de la vegetación (V=4:arbolado, V=3:pradera, V=2:estepa, V=1:desierto) y G la resistencia a la erosión según la litología (G=3: Paleozoico, G=5: Mesozoico, G=6: Cenozoico y G=2: Cuaternario).

### Método de Dendy y Bolton (1976)

En las ecuaciones propuestas expresan la relación entre volumen de sedimentos producidos, escorrentía y superficie:

$$\text{Para escorrentía inferior a } 50 \text{ mm/año: } S = (Q/50,8)^{0,46} \cdot (1,43 - 0,26 \log(A/2,59))$$

$$\text{Para escorrentía superior a } 50 \text{ mm/año: } S = 685,79 \cdot e^{-0,11(Q/50,8)} \cdot (1,43 - 0,26 \log(A/2,59))$$

Donde S es el volumen de sedimentos producidos en  $\text{t}/\text{km}^2/\text{año}$ , Q es la escorrentía media anual en  $\text{mm}$  y A es el área de la cuenca en  $\text{km}^2$ .

### Método de Djorovic y Grailovic (1974)

Calcula la degradación específica mediante la evaluación de una serie de parámetros, los que establecen como representativos de cada uno de los factores determinantes en el proceso erosivo: precipitación, clima, relieve, suelo y vegetación, incluyendo éste último, un parámetro para estimar la influencia del grado de intensidad que han alcanzado los procesos erosivos presentes en la cuenca y el tipo de erosión predominante.

De la aplicación del método se obtiene el caudal sólido medio en  $\text{m}^3/\text{año}$  de producción de sedimento por erosión superficial, W:

$$W = T \cdot P \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F$$

Donde T es el factor de temperatura  $T = [(tm/10)+1]^{0,5}$ , tm es la temperatura media (en  $^{\circ}\text{C}$ ), P la precipitación media anual (en  $\text{mm}$ ), F la superficie de la cuenca (en  $\text{km}^2$ ) y Z el coeficiente que refleja la intensidad y extensión del fenómeno erosivo, que valora la influencia de los factores de suelo, vegetación y relieve.

$$Z = y x (\varphi + s^{0,5})$$

Donde  $y$  es el coeficiente de erosionabilidad del suelo,  $x$  el coeficiente adimensional que cuantifica la vegetación,  $\phi$  el coeficiente adimensional que cuantifica el estado erosivo y  $s$  la pendiente media de la cuenca.

Los valores a asignar a los coeficientes de la ecuación se extraen de tablas (tabla 1,2 y 3) donde los suelos son clasificados. El coeficiente de uso del suelo  $x$  varía desde 1,0 a 0,2 (Spalletti y Brea 1997), el coeficiente de resistencia a la erosión varía de 0,25 a 1,8 (Gravilovic 1988) y el coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados  $\phi$  varía desde 1,0 a 0,2 (Spalletti y Brea, 1997).

**Tabla 1.-** Coeficiente del uso del suelo “X” (Spalletti y Brea, 1997)

Zona desprovista de vegetación	1.0
Vegetación herbácea de cobertura rala	0.6
Vegetación herbácea de cobertura semidensa a densa	0.4
Vegetación predominante arbustiva	0.7
Vegetación arbustiva y boscosa mezclada	0.6
Bosque de alta montaña-alta densidad	0.2
Bosque de alta montaña-media densidad	0.4
Bosque de alta montaña-baja densidad	0.6
Bosque de alta montaña- porte achaparrado	0.6
Áreas de actividad agropecuaria	0.8

**Tabla 2.-** Coeficiente de resistencia a la erosión del suelo “Y” (Gravilovic, 1998)

Cuartario-Cubierta de acarreos indiferenciados	1.8
Terciario-Areniscas y conglomerados rosados	0.25
Cretácico-Areniscas, conglomerados y pelitas rojas-Calizas amarilla	0.9
Ordovícico-Lutitas y areniscas verdosas	1.1
Cámbrico-Areniscas cuarcíticas grises y morados	0.5
Precámbrico-Granito de Tipayoc	0.5
Precámbrico-Pizarras y filitas grises y morados	1.1

**Tabla 3.-** Coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados “ $\phi$ ” (Spalletti y Brea, 1997)

Regolito-Manto derrubial de cumbres	0.6
Suelos sobre sustrato rocoso	0.7
Suelo de área boscosa	0.4
Erosión por cárcavamiento moderado a severo	0.9
Erosión enérgica- Afloramiento de roca	1.0
Remoción en masa menos reptación de escombros de talud	0.8
Reptación de escombros en talud	0.8
Morenas glaciares y acumulaciones aluviales aterrazadas	0.6
Abanicos Aluviales	0.7
Terrazas bajas-Abanicos aluviales aterrazados	0.7
Terrazas altas	0.7
Lechos fluviales	0.2
Áreas de uso humano	0.6

## Parámetros Considerados

La tabla 4. muestra los valores de precipitación media anual, la correspondiente al mes más lluvioso, el área para las cuencas y los valores de temperatura media anual utilizada para los cálculos de la degradación específica de las cuencas de aporte a los principales embalses de la provincia de Córdoba (Reyna et al., 2006)

**Tabla 4.-** Valores de Precipitación, temperatura y áreas de las cuencas de aporte a los embalse estudiados

Embalse	P mes más lluvioso (mm)	P anual (mm)	Temperatura media anual (C°)	Área Cuenca (km <sup>2</sup> )
Cruz del Eje	102	596	18	1840
El Cajón	102	594	16	154
Pichanas	86	500	18	1300
La Quebrada	120	700	17	42
La Falda	103	600	15	132
San Roque	120	700	15	1750
Los Molinos 1	145	843	16	978
La Viña	111	650	13	878
Cerro Pelado	129	750	17	970
Arroyo Corto	129	750	17	73
Embalse Río III	129	750	17	1748
Río III 2	129	750	17	215
Piedras Moras	129	750	17	479

Para representar el relieve de las cuencas de aporte se estiman dos parámetros: la diferencia entre la altura máxima y la altura media de la cuenca (H) y la relación relieve (desnivel) / longitud.

Los valores utilizados para el cálculo se presentan a continuación también se muestran los valores de módulo de aporte a cada uno de los embalse (Tala 5).

**Tabla5.-** Valores de módulos, desniveles y relación desnivel/longitud de los principales cauces de aporte a los embalses estudiados

Embalse	Módulo (m <sup>3</sup> /s)	Hprinc-Hmedia (m)	Relación relieve long. (m/km)
Cruz del Eje	3,08	340	5
El Cajón	0,44	550	45
Pichanas	1,99	870	6
La Quebrada	0,16	300	41
La Falda	1,00	700	39
San Roque	10,00	1250	31
Los Molinos 1	9,49	1370	33
La Viña	5,80	1360	18
Cerro Pelado	15,03	1050	43
Arroyo Corto	16,16	200	20

Embalse	Módulo (m <sup>3</sup> /s)	Hprinc-Hmedia (m)	Relación relieve long. (m/km)
Embalse Río III	27,10	470	16
Río III 2	46,59	270	18
Piedras Moras	54,01	220	12

## RESULTADOS

En la tabla 6 se presentan los valores de tarquinamiento anual para cada embalse expresados en Hm<sup>3</sup> (Reyna, et al.2006). Para la estimación de estos valores se consideró un peso específico del sedimento de 1,1 tn/m<sup>3</sup>. Estos valores fueron verificados con los escasos elementos existentes sobre comparación de volúmenes disponibles a través de batimetrías. Debe hacerse énfasis que toda la metodología de cálculo de degradación específica sin posibilidad de calibración debe ser considerada con gran cuidado.

**Tabla 6.-** Valores de área, degradación específica y tarquinamiento obtenidos para los embalses estudiados

Embalse	Área cuenca (km <sup>2</sup> )	Degradación Específica (t/km <sup>2</sup> /año)	Tarquinamiento (Hm <sup>3</sup> /año)
Cruz del Eje	1840	376	0,63
El Cajón	154	503	0,07
Pichanas	1300	321	0,38
La Quebrada	42	592	0,02
La Falda	132	483	0,06
San Roque	1750	538	0,86
Los Molinos 1	978	669	0,59
La Viña	878	435	0,35
Cerro Pelado	970	641	0,57
Arroyo Corto	73	553	0,04
Embalse Río III	1749	534	0,85
Río III 2	215	544	0,11
Piedras Moras	479	513	0,22

## COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En el cuadro siguiente (tabla 7) se presentan los valores de volumen originales de los embalses, el año de su construcción y, en función de esto, el porcentaje que esta metodología estimaría para el tarquinamiento actual. Por otro lado se estimó el año para el cual ocurriría el 50%, el 75% y el 100% de tarquinamiento de cada embalse.

**Tabla 7.-** Año de construcción, volumen original y tarquinamiento para los embalses estudiados

Embalse	Año construcción	Volumen embalse original	Tarquinamiento			
			2005 (%)	50% (año)	75% (año)	100% (año)
Cruz del Eje	1943	135	28,9	2050	2104	2158

Embalse	Año construcción	Volumen embalse original	Tarquinamiento			
			2005 (%)	50% (año)	75% (año)	100% (año)
El Cajón	1993	12	7,0	2078	2121	2163
Pichanas	1978	79	13,0	2082	2134	2186
La Quebrada	1976	4	16,4	2064	2109	2153
La Falda	1980	1	144,9	1989	1993	1997
San Roque	1944	350	14,9	2149	2251	2353
Los Molinos I	1953	399	7,7	2289	2456	2624
La Viña	1944	242	8,8	2292	2466	2641
Cerro Pelado	1985	371	3,0	2313	2477	2641
Arroyo Corto	1985	30	2,4	2396	2602	2807
Embalse Río III	1936	735	8,0	2369	2585	2801
Río III 2	1967	26	15,5	2089	2150	2211
Piedras Moras	1979	89	6,5	2178	2278	2378
Cipión II						

En el caso particular del embalse La Falda, se observa que, de acuerdo a los valores calculados, se ha producido a la actualidad el tarquinamiento total del embalse (lo que verifica con la realidad constatada en el lugar). Esto significa que el volumen del embalse actualmente se ha reducido y que no se retienen sedimentos en él sino que pasan por los organos de evacuación.

Los valores estimados para fecha de tarquinamiento total son solamente a título ilustrativo. Suponen que la cuenca se mantiene en las mismas condiciones y consideran sólo algunos pocos parámetros representativos.

Además debe tenerse en cuenta que la pérdida de apoyo necesarios para el crecimiento de las plantas que ocurre en las cuencas de aporte a los embalses producto de los inadecuados usos del suelo, así como de los incendios y el desarrollo urbano desordenado entre otros factores incrementan los riesgos de erosión y son particularmente problemáticos en esta región.

Finalmente es de destacar que los cálculos realizados llevan a considerar como vasos a cuidar especialmente a los de Cruz del Eje, Pichanas, El Cajón y La Quebrada sin desatender el resto de los vasos en particular aquellos que son la base del abastecimiento para agua potable para la población.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Dendy, F. E. and Bolton, G. C.** (1976). Sediment yield-drainage area relationships in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol 31(6).

**Djorovic, M. and Grailovic** (1974). Quantitative classification of torrent waterways. Intitute for Forestry and Wood Industry (referido en MOPU 1985).

**Fernandez, R.** (1998). Evaluación de Metodologías para la Estimación de la Erosión Hídrica Superficial en Cuencas Hídricas de la República Argentina. Tesis de Maestría Universidad Nacional de Córdoba. 344p.

**Fournier, F.** (1960) *Climat et érosion. De Presses Universitaire de France. París.*

**Fournier, F.** (1962) *Conservación de Suelos. Consejo de Europa.*



**Gravilovic, Z.** (1988) *The use of empirical method (erosión potencial method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or terrential streams.* In: White, W. R. (ed), International Conference on River Regime; 411-422. Chichester.

**Jansen, J. and Painter, R.** (1974). Predicting sediment yield from climate and Topography. *Joyurnal of Hidrology*, 21(4). Pg. 371-380.

**Rafaelli, S.** (2003) Paisaje erosivo en cuencas de montaña. Modelación con Extrapolación Espacial Ascendente. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

**Reyna, S.; Reyna, T.; Reyna, E.; Lábaque, M.** (2006) *Plan de Gestión de los Recursos Hidricos de Córodoba.* I. Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua Córdoba.

**Spalletti, P. y Brea, J.** (1997) Producción de sedimentos en cuencas de montaña. Informe LHA 150-02-97. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente. Laboratorio de Hidráulica y del Ambiente. Ezeiza. Argentina.



Instituto de Recursos Hídricos



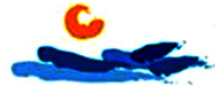
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



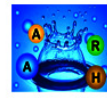
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

