

**Producciones Científicas. Sección: Ciencias de la Tierra y Ambiente**

**Técnicas para la Estimación de la Producción de Sedimentos en Cuencas con Escasos Datos Hidrológicos. Aplicaciones en la Región NOA**

**Autores:** Hector Daniel Farias; Marcelo J. Borsellino; María T. Pilán.-

**Dirección:** Instituto de Recursos Hídricos, FCEyT-UNSE.- Av. Belgrano (S) 1912, (4200) Santiago del Estero, Argentina; e-mail: hdf@unse.edu.ar

**RESUMEN**

Las cuencas de la región del NOA muestran evidencias de importantes procesos de degradación asociados a erosión superficial y remoción de sedimentos en masa, que tienen implicancias determinantes sobre proyectos de obras en sus cauces, ya que potencializan el impacto de las crecidas, incrementan la sedimentación en embalses, afectan el regular funcionamiento de las obras de toma, influyen negativamente en la fauna acuática, inducen procesos de metamorfosis fluvial, etc..

Por su parte, la gran mayoría de estas cuencas carecen de registros de aforos de caudales sólidos, por lo que es necesario recurrir a técnicas indirectas o aproximadas para estimar las potenciales producciones de sedimentos anuales.

En el marco del estudio que aquí se presenta, se consideraron tres metodologías alternativas para estimar las producciones de sedimentos, a saber: (1) Empleo de mediciones en cuencas vecinas y aplicación de un criterio regional de transposición de información sedimentológica. (2) Estimación de la capacidad total de transporte de sedimentos en una sección idealizada a la salida de la cuenca, mediante la aplicación de fórmulas basadas en las propiedades hidráulicas, geométricas y sedimentológicas del cauce. (3) Cálculo estimativo de la producción anual de materiales sólidos de la cuenca, a partir de información hidrológica, geomorfológica, fisiográfica y de uso del suelo en la misma. Los métodos se aplicaron con la finalidad de adoptar una herramienta para predecir los potenciales aportes de material sólido a embalses proyectados en las cuencas.

Los resultados que se obtuvieron con la aplicación de estas técnicas sobre una cuenca característica de la región NOA se discuten y analizan, encontrándose ciertas discrepancias entre las diferentes metodologías consideradas. No obstante, el criterio que parecería tener un mayor sustento desde el punto de vista físico del problema (considerando los factores globales intervinientes a nivel de la cuenca) produce un resultado que se sitúa aproximadamente en el promedio de los dos anteriores, lo cual conlleva a una conclusión interesante en el sentido de disponer de un elemento de predicción razonable, y compatible con el nivel de información hidrológica habitualmente disponible.

**PALABRAS CLAVE:** erosión, sedimentación, cuencas, ríos, embalses, región NOA.

## INTRODUCCIÓN

La región del Noroeste Argentina (NOA) exhibe en la actualidad un considerable deterioro de su medio ambiente, especialmente puesto de manifiesto en las cuencas hídricas. Dentro de este contexto, los procesos de erosión hídrica superficial y fenómenos de remoción de sedimentos en masa típico de cuencas montañosas en la región, terminan agudizando algunos problemas tales como la ocurrencia de inundaciones, a la vez que acentúan los fenómenos de colmatación de embalses, condicionan el regular funcionamiento de las obras de toma, influyen negativamente en la fauna acuática, promueven procesos de metamorfosis fluvial, etc..

La cuantificación de los procesos erosivos, típicamente expresada a través de los volúmenes de sedimentos producidos por una cuenca hídrica, y por ende el nivel de degradación o grado de erosión exhibido por la misma, puede hacerse en forma indirecta, a través de relevamientos topográficos y batimétricos de los vasos de eventuales embalses, o bien mediante la utilización de mediciones sistemáticas de caudales sólidos en los cursos de agua, o alternativamente a través de la aplicación de diversas técnicas de estimación. Los relevamientos y mediciones son sumamente importantes en el proceso de validación de distintas metodologías que comúnmente se emplean para estimar la producción de sedimentos en cuencas sin registros. En efecto, no todas las cuencas que componen una región poseen mediciones sistemáticas de caudales sólidos, ni tampoco poseen embalses construidos o, si éstos existen, es probable que no se cuente con una cantidad adecuada de relevamientos topo-batimétricos. Esta situación es típica en un país como Argentina.

En relación a los sedimentos producidos por erosión superficial, que son los de principal interés por parte de la Hidráulica Fluvial, estos están asociados principalmente al fenómeno de destrucción del suelo por el impacto directo de las gotas de lluvia y el posterior transporte de las partículas por parte del escurrimiento superficial. Este es un proceso que muestra un cierto grado de continuidad temporal asociada a eventos hidrológicos ordinarios característicos de la cuenca. Por su parte, los sedimentos producidos por remoción en masa (deslizamientos de laderas, colapso de márgenes, flujos de barro, flujos de detritos, etc.) se vinculan con eventos hidrológicos extremos y no presentan la continuidad temporal de los primeros. Cabe señalar que, tanto las mediciones sistemáticas de caudales sólidos, como así también los relevamientos topobatimétricos de los embalses, ambos contemplan en forma agregada los dos tipos de producción de sedimentos mencionados anteriormente.

En este contexto, el principal objetivo de este trabajo es el de presentar una serie de técnicas alternativas como propuestas para ser aplicadas en general a regiones con escasos datos hidrológicos y de transporte de material sólido, aspectos típicos de la región NOA, enfatizándose las ventajas y limitaciones de cada una de ellas en situaciones típicas de diseño hidrológico, como por ejemplo cuando se trata de estimar el aporte de sedimentos a un embalse que se proyecta sobre un cauce fluvial.

## CARACTERIZACIÓN DE CAUDALES SÓLIDOS EN LA REGIÓN NOA

Una primera consideración para el tratamiento del problema planteado consiste en establecer algún tipo de criterio para la caracterización de los procesos de transporte de sedimentos bajo una perspectiva regional. En un estudio reciente, Brea *et al.* (2002) presentaron una primera caracterización a partir de información sedimentométrica (aforos sólidos), en la que se considera el sedimento que efectivamente ingresa al curso de agua y es transportado por el mismo. El objetivo del estudio fue el caracterizar los caudales sólidos a los efectos de estimar los distintos grados de erosión que experimentan las cuencas del NOA. Se usaron datos disponibles en la SSRH de las estaciones de medición de caudales líquidos y de transporte de sedimentos en suspensión actualmente en funcionamiento. Las 8 estaciones consideradas fueron: La Paz (Río Pilcomayo), Aguas Blancas (Río Bermejo), Balapuca (Río Bermejo), Pozo Sarmiento (Río Bermejo), San José (Río Iruya), Cuatro Cedros (Río Pescado), Caimancito (Río San Francisco) y Potrero del Clavillo (Río Las Cañas). Por su parte, también se analizaron e incorporaron los datos de caudales sólidos en suspensión medios anuales disponibles en diversas publicaciones.

La metodología aplicada en el estudio consistió en utilizar los aforos disponibles en cada estación para determinar las leyes de correlación entre caudal sólido en suspensión y caudal líquido. A partir de los datos de caudales líquidos medios diarios, para la serie de años de observación en cada estación, se construyeron las respectivas curvas de duración. Posteriormente, mediante las ecuaciones de correlación y las curvas de duración obtenidas en los puntos anteriores, se determinaron las curvas de duración de caudales sólidos en suspensión. Luego, a través de la integración numérica de las curvas de duración determinadas se calcularon los volúmenes de escurrimiento y los correspondientes aportes de sólidos en suspensión para cada año. Finalmente, se determinaron ecuaciones de correlación entre el aporte sólido en suspensión anual y el volumen de escurrimiento anual en cada estación. Asimismo, se determinaron ecuaciones de correlación entre el aporte sólido en suspensión anual y una variable hidrológica característica definida mediante el producto del volumen de escurrimiento anual y el caudal líquido máximo anual de cada estación.

Con la finalidad de ejemplificar este procedimiento, en las Figuras 1, 2, 3 y 4 se presentan las gráficas correspondientes a la Estación La Paz, sobre el río Pilcomayo.

En la instancia final del estudio, sobre la base de los valores medios anuales de aporte de sedimentos en suspensión y las áreas de las respectivas cuencas con cierre en las diferentes estaciones de medición, se calculó la degradación específica (D.E.) correspondiente a cada una de las cuencas. Esta degradación fue sucesivamente caracterizada en distintos grados de erosión (G.E.) siguiendo la clasificación propuesta por Albaladejo (Brea *et al.*, 2002).

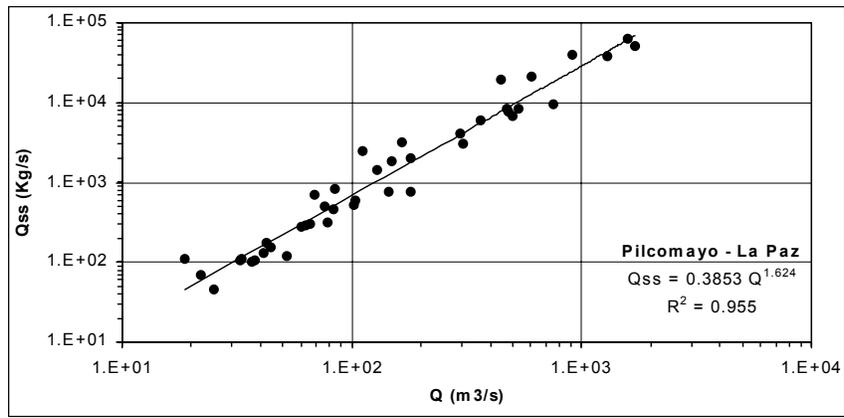


Figura 1.- Relación entre caudal sólido en suspensión y caudal líquido

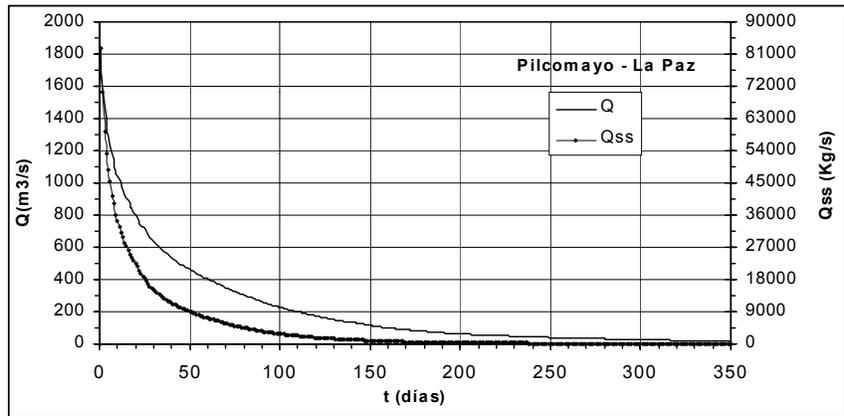


Figura 2.- Curvas de duración de caudales (líquidos y sólidos)

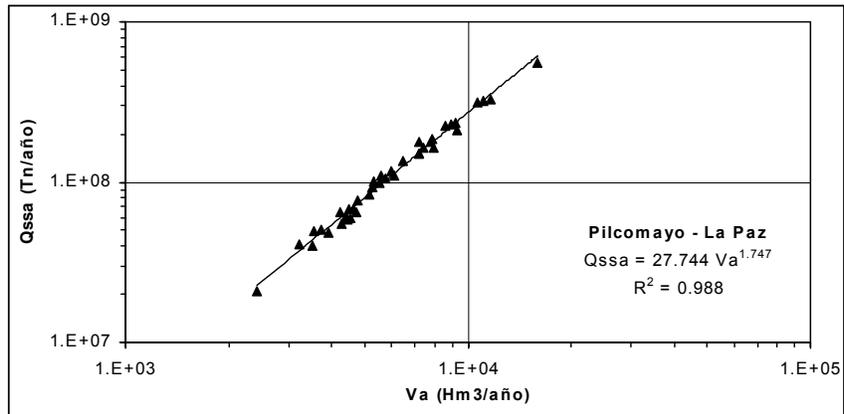
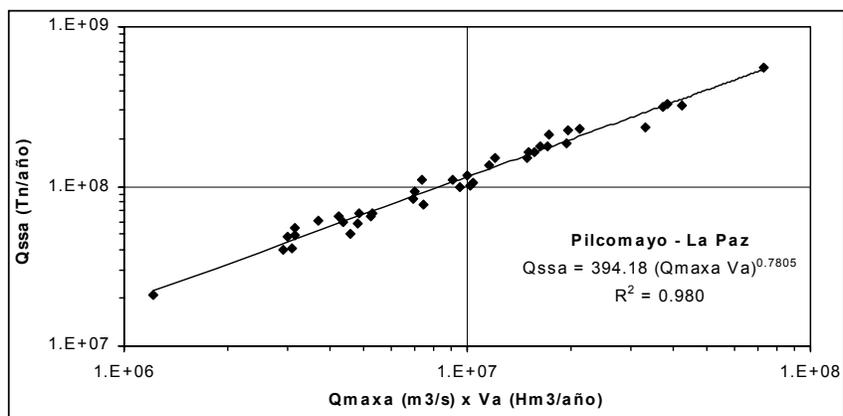


Figura 3.- Curva empírica de producción de sedimentos en función del derrame



**Figura 4.-** Función alternativa de la producción anual en función del derrame y caudal

Como resultado del análisis, de la totalidad de las estaciones consideradas, el 41% evidencia un grado de erosión entre muy alto y alto (con valores de degradación específica mayores a 1860 Tn/km<sup>2</sup> año), el 47% exhibe un grado de erosión entre moderado-alto y moderado (con degradación específica entre 260 y 1860 Tn/km<sup>2</sup> año) y mientras que sólo el 12% presenta un grado de erosión entre bajo y nulo (con degradaciones específicas inferiores a 260 Tn/km<sup>2</sup> año), según la clasificación utilizada. Estos indicadores sitúan a la región NOA una zona donde los procesos erosivos adquieren una preponderancia significativa, inclusive con regiones localizadas proclives al desarrollo de movimientos de masa.

Posteriormente se llevó a cabo una segunda caracterización de los caudales sólidos, a partir del estudio de producción de sedimentos por erosión superficial, aplicando una metodología distribuida basada en la ecuación de Gavrilovic (Spalletti y Brea, 2000), lo que permitió la estimación de la tasa de erosión superficial potencial específica en todo el territorio del NOA, expresada por la cantidad  $w_c$  [m<sup>3</sup>/año.km<sup>2</sup>]. Los resultados de esta aplicación se sintetizan en el mapa presentado en la Figura 5.

Esta metodología estima la cantidad de material producida por erosión superficial en una cuenca, y que es transportada a la sección del río que la define.

Es un método empírico que se compone de dos partes: el cálculo de la producción media anual de sedimento por erosión superficial ( $W$ ), y la determinación del coeficiente de re-deposición o de retención de sedimentos ( $R$ ).

De ambos se obtiene el volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección final de la cuenca ( $G$ ).

$$G = W \cdot R \quad [\text{m}^3/\text{año}]$$

Los procesos erosivos son el resultado de la interacción de varios factores: topografía, clima, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas, geomorfología. Por ello las formulaciones intentan incluir estas variables con un adecuado peso relativo.

La metodología desarrollada ha sido empleada con éxito en cuencas alpinas, andinas y en otras zonas montañosas, obteniéndose buenos resultados, y con buena concordancia entre los valores medidos y calculados en cuencas piloto o en casos en que pudo efectuarse esta comparación (Brea y Spalletti, 1998, 2000).

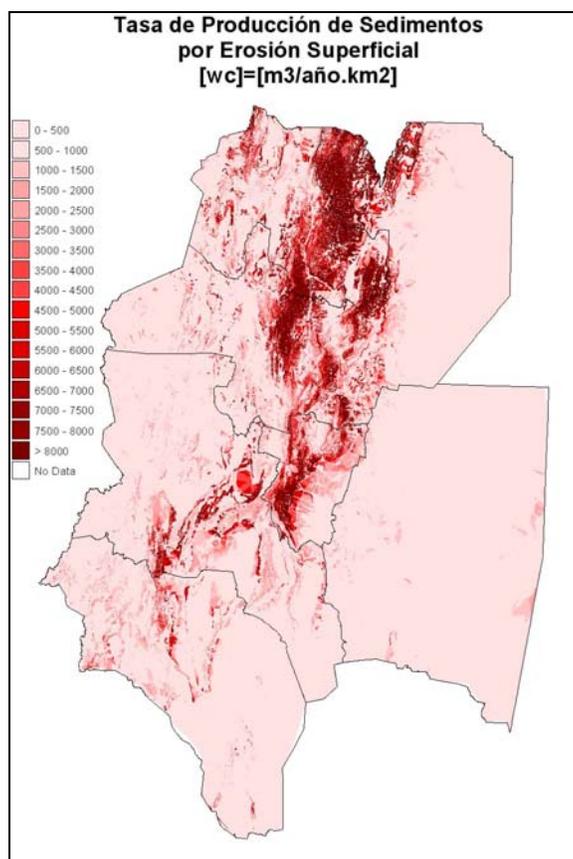


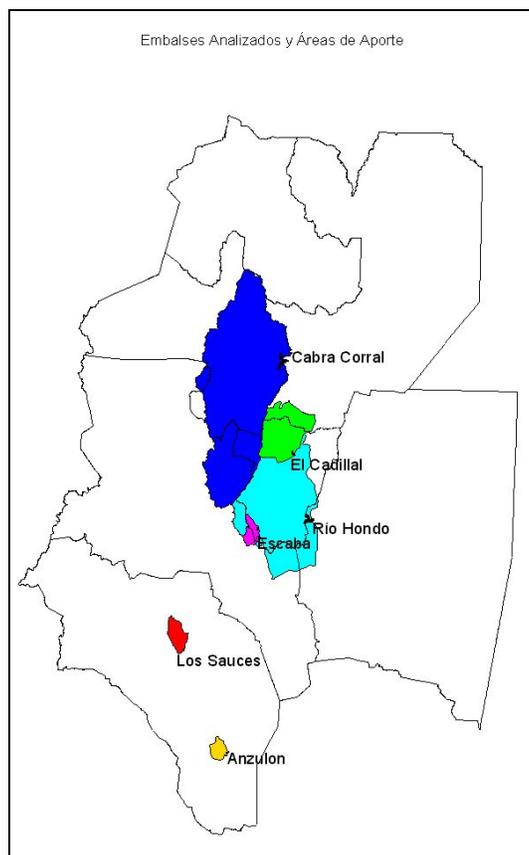
Figura 5.- Tasa de erosión superficial potencial específica en todo el territorio del NOA.

En primer lugar, para verificar el comportamiento del método en relación a los valores de aforos sólidos disponibles, se consideró la Estación Caimancito sobre el río San Francisco, cuya cuenca de aporte se localiza íntegramente en la región del NOA. Para realizar la validación se compararon los valores del material sólido en suspensión medio anual de todos los años con registros, con los correspondientes al material sólido producido por erosión superficial y que llega a la sección del río donde se ubica la estación de aforo, calculado con la metodología descrita en el trabajo.

El valor calculado con el método de Gavrilovic fue de aproximadamente 19240000 Tn/año, siendo el valor medio anual de los caudales sólidos medidos de 19336255 Tn/año. La comparación de ambos valores estaría indicando que los resultados del modelo utilizado para estimar la producción de material sólido son aceptables.

Una segunda verificación se realizó a partir de la sedimentación registrada en espejos de agua, analizándose el comportamiento de seis cuencas de aporte a embalses en la región del NOA. Los embalses con datos de sedimentación fueron: el de Los Sauces en La Rioja, localizado sobre el río Los Sauces, el de Anzulón en La Rioja, sobre el río Anzulón, el de Escaba en Tucumán, sobre

el río Marapa, el de El Cadillal en Tucumán, sobre el río Salí, el de Río Hondo en Santiago del Estero, sobre el río Dulce y el de Cabra Corral en Salta, sobre el río Juramento (Agua y Energía Eléctrica, 1991) (Figura 6).



**Figura 6.-** Embalses con datos de sedimentación en la región NOA

La comparación de los volúmenes calculados por la metodología empleada con los surgidos de la comparación de batimetrías en cada caso arrojó diferencias promedio del orden del 30 %, siendo siempre menores los valores calculados. Estas discrepancias se consideran aceptables, ya que la única fuente de sedimentos de las cuencas analizadas no es la erosión superficial, y no se contó con el dato de la densidad de los depósitos en los embalses analizados.

Estos aspectos generales a escala regional proporcionan algunos elementos básicos a tener en cuenta en cualquier estudio de producción de sedimentos en la región NOA. A estos se le pueden adicionar algunos procedimientos más específicos, lo que se desarrollan a continuación a través de un ejemplo para una cuenca de la región.

## **TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO ROSARIO-HORCONES**

En el caso de cuencas sin aforos de caudales sólidos, como la cuenca del Río Rosario-Horcones (Fig. 7), es necesario recurrir a técnicas indirectas o aproximadas para estimar las potenciales producciones de sedimentos anuales. En el contexto del presente estudio, se consideraron tres

metodologías alternativas, a saber: (1) Empleo de mediciones en cuencas vecinas y aplicación de un criterio regional de transposición de información sedimentológica. (2) Estimación de la capacidad total de transporte de sedimentos en una sección idealizada a la salida de la cuenca, mediante la aplicación de fórmulas basadas en las propiedades hidráulicas, geométricas y sedimentológicas del cauce. (3) Cálculo estimativo de la producción anual de materiales sólidos de la cuenca, a partir de información hidrológica, geomorfológica, fisiográfica y de uso del suelo en la misma. A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de estos criterios.

### Criterio 1. Transposición Regional.

En este caso se usaron mediciones de transporte sólido en suspensión ( $Q_{ss}$ ) practicadas en una sección del Río Medina (vecina al norte de la cuenca del Horcones), en inmediaciones de su desembocadura en el Río Juramento (AYEE, 1991; EVARSA, 1994). La serie de datos se extiende desde el año 1967-1968 hasta 1981-1982, totalizando 15 años de mediciones con botellas normalizadas. Los valores de transporte medio anual de sedimento suspendido  $Q_{ss}$  se expresan en miles de toneladas por año, y expresa la suma de la carga de lavado (material fino proveniente de la cuenca) y material de lecho suspendido.

Con la finalidad de poder establecer una relación funcional de tipo regional, se procuró estudiar una posible correlación entre esta magnitud y alguna variable hidrológica relevante. Teniendo en cuenta la información disponible y la compatibilidad en cuando a los períodos de tiempo en que se efectuaron los registros, se adoptó el volumen de escorrentía media anual (ó derrame)  $V_Q$  como variable hidrológica característica. En la Tabla 1 se presenta la serie cronológica de caudales sólidos en suspensión  $Q_{ss}$  (en  $10^3$  tn/año) y los correspondientes derrames  $V_Q$  (en  $Hm^3$ ).

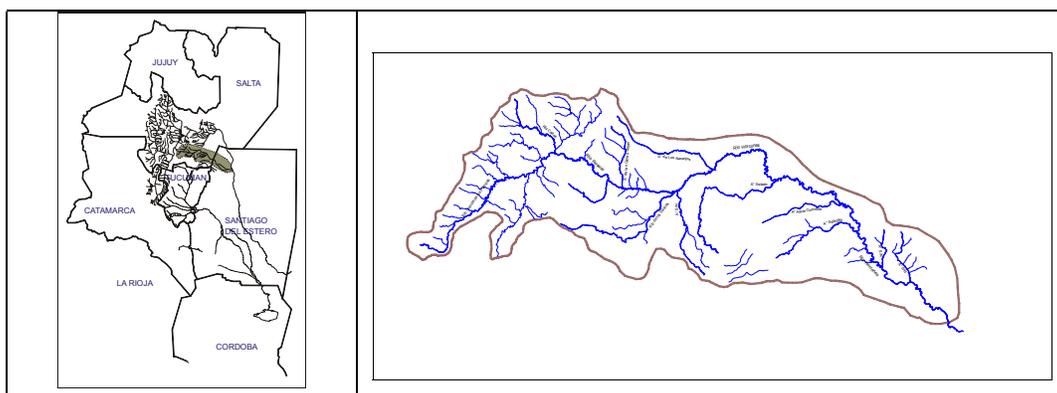


Figura 7.- Cuenca del Río Rosario u Horcones. Ubicación y red hidrográfica.

Tabla 1.- Datos de transporte de sedimentos en suspensión y derrames anuales en el Río Medina.

Año	$Q_{ss}$	$V_Q$	Año	$Q_{ss}$	$V_Q$	Año	$Q_{ss}$	$V_Q$
-	[ $10^3$ tn]	[ $Hm^3$ ]	-	[ $10^3$ tn]	[ $Hm^3$ ]	-	[ $10^3$ tn]	[ $Hm^3$ ]
1967	285.9	61.52	1972	367.4	74.24	1977	6245.2	296.32
1968	177.4	70.66	1973	1897.2	165.19	1978	2114.2	286.36
1969	427.1	79.11	1974	2218.8	130.73	1979	668.4	121.99
1970	447.5	68.92	1975	1893.5	160.34	1980	4446.7	330.84
1971	75.9	44.95	1976	1296.0	150.51	1981	2836.3	206.26

Teniendo en cuenta esta serie de valores, se investigó la posible estructura matemática de la relación:  $Q_{ss} = f(V_Q)$ . Graficando estas variables (escala log) podría inferirse que la relación funcional entre  $Q_{ss}$  y  $V_Q$  tiende a ajustarse a una ecuación de tipo potencial, es decir:

$$Q_{ss} = a_1 V_Q^{a_2}$$

donde  $a_1$  y  $a_2$  son constantes a ser determinadas por regresión. En efecto, realizando un análisis de regresión sobre los datos observados, se obtuvieron los valores:  $a_1 = 0.6845$ ;  $a_2 = 1.5537$ , ajustados con un coeficiente de correlación  $r = 0.9395$ .

Por lo tanto, la ecuación a aplicar para estimar la producción anual de sólidos transportados como carga suspendida por el Río Medina resulta ser:  $Q_{ss} = 0.6845 V_Q^{1.5537}$ , donde  $Q_{ss}$  se expresa en miles de toneladas por año y  $V_Q$  en hectómetros cúbicos. Ahora bien, desde el punto de vista práctico, conviene disponer de elementos adicionales a fin de poder estimar el caudal sólido total ( $Q_s$ ), el cual se compone de la carga en suspensión más la carga arrastrada a nivel del lecho fluvial, o carga de fondo  $Q_{sb}$ . Es decir, el transporte sólido total se expresa como:  $Q_s = Q_{ss} + Q_{sb}$ .

Existen en la literatura varios estudios tendientes a proporcionar algunos métodos aproximados de estimación de la carga total a partir de la carga en suspensión. La mayoría de ellos se basa en la introducción de coeficientes empíricos que correlacionan la carga de fondo como una fracción de la carga suspendida, o bien la razón entre la carga en suspensión sobre la carga total, es decir, el factor:  $k_{Qs} = Q_{ss}/Q_s$ . Garde y Ranga Raju (1985) presentan una tabla (p. 262) en la que enumeran una serie de valores observados (a través de mediciones) para el factor  $k_{Qs}$ , en la cual el mismo varía aproximadamente entre 0.5 y 0.9, en función de las características de arrastre de material grueso por parte de la corriente en cuestión. En este caso, teniendo en cuenta que la carga de lecho está fundamentalmente constituida por arena gruesa y gravilla, se estima conveniente adoptar para el factor de transporte el valor:  $k_{Qs} = 0.75$ . De esta manera, la ecuación para el transporte sólido total podría escribirse como:  $Q_s = 0.9127 V_Q^{1.5537}$ . El transporte sólido, que en la expresión anterior se expresa de manera gravimétrica, puede representarse volumétricamente teniendo en cuenta el peso específico promedio de los sedimentos aluviales, que es del orden:  $\gamma_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$ . En forma volumétrica, la ecuación anterior se escribe:  $Q_s = 0.000344 V_Q^{1.5537}$ . En ella, tanto  $Q_s$  como  $V_Q$  se expresan en  $\text{Hm}^3$ . Esta relación incluye la carga de lavado ( $< 0.062 \text{ mm}$ ).

El paso siguiente consiste en estudiar la manera de poder transponer estos resultados a la cuenca del Río Horcones. Teniendo en cuenta que las cuencas de los ríos Medina y Horcones pertenecen al mismo sistema fluvial (Pasaje-Juramento-Salado) y se emplazan en la misma región hidrológica, con características climáticas, litológicas y de uso del suelo razonablemente homogéneas, resulta aceptable suponer que también se mantienen aproximadamente constantes entre ambas los principales factores que controlan los mecanismos de erosión y producción de sedimentos. En una serie de estudios sobre procesos de sedimentación en embalses en la región de la India y Pakistan, Khosla (Garde y Ranga Raju, 1985; p. 264) encontró que el volumen anual de sedimentos ( $V_s$ ) producidos por una cuenca (el cual pudo medirse a través de relevamientos batimétricos de embalses colmatados) varía con el área de la cuenca elevada a una potencia del orden de 0.72. Es decir:  $V_s = c_A A^{0.72}$ , donde  $c_A$  es una constante que engloba todos los factores restantes que afectan a  $V_s$  (que en este caso se supone que no varían de una cuenca a otra). Por lo tanto, si se asume que  $c_A$  es el mismo para ambas cuencas, se podría obtener una estimación

regional de la producción de sedimentos del Río Horcones a partir del dato homólogo del Río Medina de la siguiente manera:  $V_{S [Horcones]} = (A_{[Horcones]} / A_{[Medina]})^{0.72} \cdot V_{S [Medina]}$ , donde A indica el área de la cuenca. Efectuando las operaciones correspondientes, y teniendo en cuenta que el área de la cuenca del Río Medina en la sección de aforo vale:  $A_{Medina} = 1650 \text{ Km}^2$  y la del Río Horcones en el punto de interés  $A_{Horcones} = 3147 \text{ Km}^2$ , se obtiene finalmente:  $Q_s = 0.000548 \cdot V_Q^{1.5537}$ , donde ambos volúmenes, de sedimento y de escorrentía, se expresan en  $\text{Hm}^3$ .

Con estas relaciones, para un derrame medio anual de 160  $\text{Hm}^3$  por parte del Río Horcones, se obtendría:  $V_{Qs} = 1.4284 \text{ Hm}^3/\text{año}$ .

## **Criterio 2. Fórmulas de Transporte en Cauce.**

En este caso se procedió a definir una sección transversal hidráulica típica para caracterizar el punto de interés, es decir, una sección que pueda considerarse representativa del tramo de curso fluvial actualmente presente en la zona de emplazamiento de la futura obra de regulación.

Para ello, se consideraron algunos antecedentes documentales (e.g., Proyecto NOA Hídrico, 1980) en los que se presentan relevamientos topográficos del cauce fluvial del Río Horcones en la zona de "Las Tomas". Se analizó la geometría hidráulica de esas secciones y se terminó adoptando para el cálculo hidráulico una sección trapezoidal equivalente con ancho de fondo del orden de los 40 metros, que es un valor medio razonable teniendo en cuenta las secciones observadas en campo. Con respecto a la pendiente longitudinal del cauce en ese tramo, se usaron los valores típicos obtenidos a partir de la cartografía de la cuenca. En efecto, mediante un análisis del perfil longitudinal del río en sus cursos medio e inferior, se estableció que el mismo presenta una fisonomía cóncava, que tiende a ajustarse a una función exponencial decreciente. Realizando un análisis de regresión entre la altitud del lecho fluvial (H) y el desarrollo longitudinal del mismo desde las nacientes hacia aguas abajo (L), se obtuvo la ecuación de ajuste:

$$H = 2076 \cdot e^{-0.0086 \cdot L}$$

con un coeficiente de correlación  $r = 0.9574$ . En esta ecuación H se expresa en m.s.n.m. y L en kilómetros desde la cabecera de la cuenca. La pendiente longitudinal de equilibrio en un punto cualesquiera a lo largo del cauce puede estimarse derivando la ecuación anterior respecto de la distancia:

$$S = dH/dL = -0.0178 e^{-0.0086 \cdot L}$$

Puesto que el punto de interés se sitúa a unos 250 Km aguas abajo de las nacientes del río Rosario, se obtuvo para la pendiente longitudinal el valor:  $S = 0.0024$ . Este valor podría ser ajustado con más detalle en base a trabajos topográficos de campaña.

En relación al tipo de sedimento presente en el lecho, las observaciones realizadas en estudios anteriores permiten afirmar que se trata de material arenoso grueso, con granulometría moderadamente extendida. En esta instancia del análisis se consideró como válida la hipótesis de que la distribución granulométrica del sedimento se ajusta a una ley del tipo log-Normal (como la gran mayoría de los cauces fluviales en zonas pedemontanas y de planicie). Por lo tanto, para el

cálculo se adoptó un diámetro mediano  $d_{50}=0.8\text{mm}$  y una desviación estándar geométrica del sedimento  $\sigma_g=1.5$ .

Para la estimación de las características friccionales del cauce, se consideró (como se comentó antes) que el lecho del mismo está constituido fundamentalmente por arena, sin la presencia de vegetación ni elementos macro-rugosos significativos, mientras que las márgenes exhiben taludes limo-arenosos, consolidados por vegetación arbustiva. Con ello, se adoptó un coeficiente de rugosidad de Manning:  $n=0.030$ .

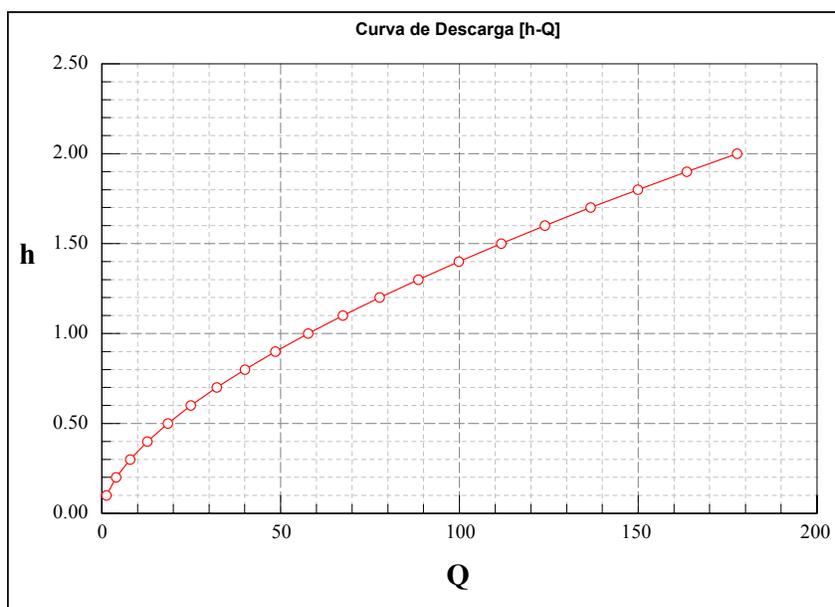
Con estos datos se estimaron las características hidráulicas del tramo en estudio, para un rango de tirantes hidráulicos variables desde 0.10 m hasta 2.00 m., con lo cual se estima que se cubren las condiciones de flujo imperantes a lo largo del año en respuesta a los distintos niveles de respuesta hidrológica de la cuenca a cada una de las estaciones climáticas.

En la Tabla 2 se presenta el cálculo de las características hidráulicas del cauce para las condiciones señaladas, con incrementos de tirante  $\Delta h = 0.10$  m. Los valores que aparecen en la tabla son:  $h$  : profundidad del flujo o tirante [m];  $A$  : área de la sección transversal [m<sup>2</sup>];  $P$  : perímetro mojado [m];  $R$  : radio hidráulico [m];  $V$  : velocidad media del flujo [m/s];  $Q$  : caudal [m<sup>3</sup>/s].

h	A	P	R	V	Q
0.1	4.0	40.2	0.10	0.32	1.28
0.2	8.0	40.4	0.20	0.51	4.05
0.3	12.0	40.6	0.30	0.66	7.94
0.4	16.0	40.8	0.39	0.80	12.78
0.5	20.0	41.0	0.49	0.92	18.48
0.6	24.0	41.2	0.58	1.04	24.95
0.7	28.0	41.4	0.68	1.15	32.16
0.8	32.0	41.6	0.77	1.25	40.05
0.9	36.0	41.8	0.86	1.35	48.58
1.0	40.0	42.0	0.95	1.44	57.72
1.1	44.0	42.2	1.04	1.53	67.44
1.2	48.0	42.4	1.13	1.62	77.72
1.3	52.0	42.6	1.22	1.70	88.54
1.4	56.0	42.8	1.31	1.78	99.86
1.5	60.0	43.0	1.40	1.86	111.69
1.6	64.0	43.2	1.48	1.94	123.99
1.7	68.0	43.4	1.57	2.01	136.75
1.8	72.0	43.6	1.65	2.08	149.95
1.9	76.0	43.8	1.74	2.15	163.59
2.0	80.0	44.0	1.82	2.22	177.65

**Tabla 2.-** Características Hidráulicas de la sección transversal típica para el Río Horcones.

A partir de estos resultados, se confeccionó la curva de descarga [h-Q] para la sección típica, la cual se presenta en la Figura 8.



**Figura 8.-** Curva de descarga para la sección en estudio (h en m y Q en m³/s).

Una vez calculadas las características hidráulicas del cauce, se procedió a estimar la capacidad de transporte total de material del lecho aplicando un conjunto de formulaciones que se consideran adecuadas para las condiciones imperantes en el Río Horcones. Las fórmulas escogidas fueron (Garde y R. Raju, 1985; Julien, 1995; Yang, 1996): Engelund & Hansen, Peterson & Peterson, Brownlie. La mayor parte de las ecuaciones para cuantificar el transporte total de material de lecho en una corriente fluvial obedecen al formato funcional generalizado siguiente:

$$q_s = \Phi_{q_s}(V, R, S, d; g, \rho, \rho_s, \nu, \dots)$$

donde  $q_s$  es el transporte total de sedimentos por unidad de ancho del cauce,  $V$  es la velocidad media del flujo,  $R$  el radio hidráulico,  $d$  el tamaño medio del sedimento,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\rho_s$  la densidad del sedimento,  $\rho$  la densidad del agua y  $\nu$  la viscosidad cinemática.

Las fórmulas de transporte total de sedimentos también se pueden expresar en un formato adimensional estandarizado, en el cual las principales variables que gobiernan los procesos físicos involucrados en el movimiento de las partículas sólidas se agrupan en parámetros adimensionales, de los cuales los principales son los siguientes:

$$\tau_* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{R \cdot S}{(\rho_s / \rho - 1) \cdot d} = \frac{R \cdot S}{\Delta \cdot d} \quad (\text{tensión de Shields})$$

$$C_* = \frac{V}{U_*} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot R \cdot S}} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{R^{1/6}}{n \sqrt{g}} \quad (\text{coeficiente adimensional de Chezy})$$

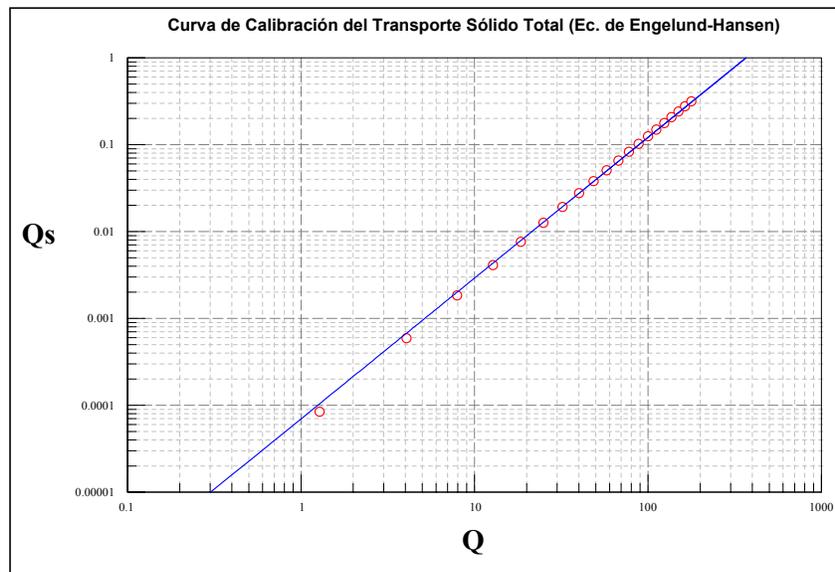
$$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{g \cdot \Delta \cdot d^3}}$$

(transporte adimensional de Einstein)

En las tablas que siguen se presentan los valores calculados para cada uno de estos parámetros correspondientes a las tres formulaciones escogidas para el análisis. Asimismo, se presentan los valores calculados para las variables:  $q_s$  : tasa de transporte sólido total por unidad de ancho del cauce [ $m^3/s/m$ ],  $Q_s$  : tasa de transporte sólido total en el cauce [ $m^3/s$ ],  $C_{sT}$ : concentración total de sedimentos, expresada en partes por millón en peso de sedimento seco [ppm]. En las primeras columnas de las tablas se presentan los valores de las variables hidráulicas  $h, A, P, R, V, Q$  , cuyo significado ya fuera previamente explicado en la sección en la que se obtuvo la curva de descarga [ $h-Q$ ] de la sección transversal.

**Tabla 3.-** Cálculo del transporte sólido total. Fórmula de Engelund & Hansen

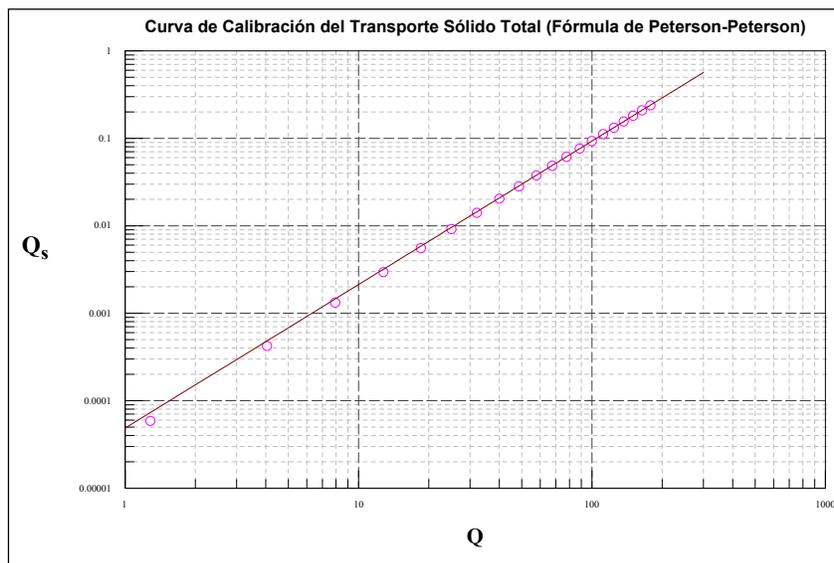
h	A	P	R	V	Q	$\tau^*$	$C^*$	$q_{s*}$	$q_s$	$Q_s$	$C_{sT}$
0.1	4.0	40.2	0.10	0.32	1.28	0.15076134	7.24463592	0.02315944	2.10833E-06	8.4333E-05	174.543
0.2	8.0	40.4	0.20	0.51	4.05	0.30003	8.12510556	0.16275703	1.48167E-05	0.00059267	387.64506
0.3	12.0	40.6	0.30	0.66	7.94	0.44782803	8.68600571	0.50627726	4.60893E-05	0.00184357	615.498891
0.4	16.0	40.8	0.39	0.80	12.78	0.59417706	9.10515922	1.12806676	0.000102694	0.00410777	851.854039
0.5	20.0	41.0	0.49	0.92	18.48	0.7390983	9.44246241	2.09361125	0.000190593	0.00762373	1093.51698
0.6	24.0	41.2	0.58	1.04	24.95	0.88261253	9.72590252	3.46142603	0.000315113	0.01260453	1338.51952
0.7	28.0	41.4	0.68	1.15	32.16	1.02474016	9.97096496	5.28419421	0.00048105	0.019242	1585.52292
0.8	32.0	41.6	0.77	1.25	40.05	1.16550117	10.187173	7.60955307	0.000692741	0.02770962	1833.55941
0.9	36.0	41.8	0.86	1.35	48.58	1.30491518	10.3808268	10.4806834	0.000954116	0.03816463	2081.90001
1.0	40.0	42.0	0.95	1.44	57.72	1.44300144	10.5563235	13.9367754	0.001268743	0.05074973	2329.97943
1.1	44.0	42.2	1.04	1.53	67.44	1.57977883	10.7168614	18.0134108	0.001639862	0.0655945	2577.34984
1.2	48.0	42.4	1.13	1.62	77.72	1.71526587	10.8648434	22.7428853	0.002070413	0.08281653	2823.65077
1.3	52.0	42.6	1.22	1.70	88.54	1.84948072	11.0021239	28.1544852	0.002563062	0.10252246	3068.58857
1.4	56.0	42.8	1.31	1.78	99.86	1.98244123	11.1301654	34.2747303	0.003120222	0.12480888	3311.92194
1.5	60.0	43.0	1.40	1.86	111.69	2.1141649	11.2501429	41.1275874	0.003744076	0.14976305	3553.45128
1.6	64.0	43.2	1.48	1.94	123.99	2.24466891	11.3630159	48.7346621	0.004436591	0.17746365	3793.01079
1.7	68.0	43.4	1.57	2.01	136.75	2.37397012	11.469578	57.1153709	0.005199534	0.20798138	4030.46244
1.8	72.0	43.6	1.65	2.08	149.95	2.50208507	11.5704942	66.2870974	0.006034488	0.24137954	4265.6912
1.9	76.0	43.8	1.74	2.15	163.59	2.62903003	11.6663273	76.2653347	0.006942864	0.27771455	4498.60138
2.0	80.0	44.0	1.82	2.22	177.65	2.75482094	11.7575579	87.0638154	0.00792591	0.31703641	4729.1136



**Figura 9.-** Relación transporte total - caudal líquido (F. de Engelund-Hansen) [ $Q_s=0.0000699 \cdot Q^{1.620}$ ]

**Tabla 4.-** Cálculo del transporte sólido total. Fórmula de Peterson & Peterson.

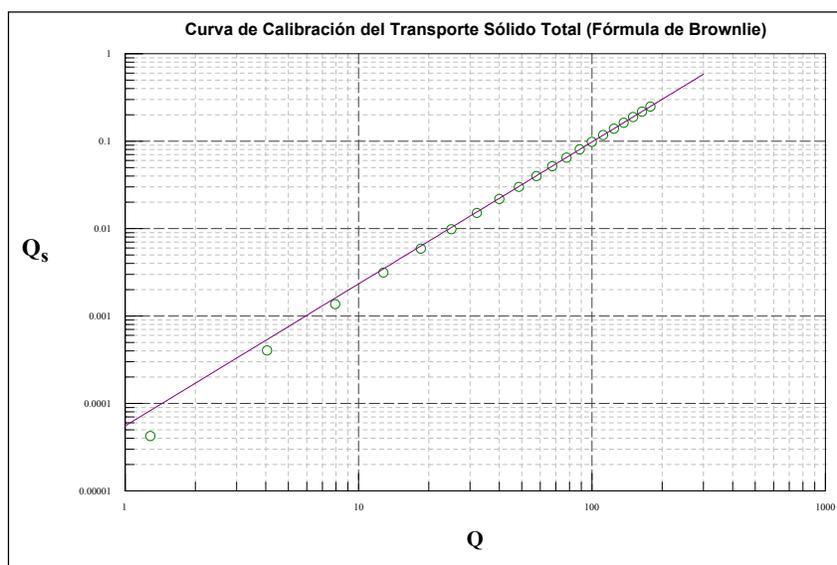
h	A	P	R	V	Q	$\tau^*$	C*	qs*	qs	Qs	CsT
0.1	4.0	40.2	0.10	0.32	1.28	0.15076134	7.24463592	0.01613615	1.46897E-06	5.8759E-05	121.611409
0.2	8.0	40.4	0.20	0.51	4.05	0.30003	8.12510556	0.1154999	1.05146E-05	0.00042058	275.090842
0.3	12.0	40.6	0.30	0.66	7.94	0.44782803	8.68600571	0.36313564	3.30583E-05	0.00132233	441.47664
0.4	16.0	40.8	0.39	0.80	12.78	0.59417706	9.10515922	0.81524857	7.42167E-05	0.00296867	615.630929
0.5	20.0	41.0	0.49	0.92	18.48	0.7390983	9.44246241	1.52187478	0.000138545	0.00554179	794.892522
0.6	24.0	41.2	0.58	1.04	24.95	0.88261253	9.72590252	2.52809318	0.000230147	0.00920586	977.60346
0.7	28.0	41.4	0.68	1.15	32.16	1.02474016	9.97096496	3.87477026	0.000352742	0.01410969	1162.62514
0.8	32.0	41.6	0.77	1.25	40.05	1.16550117	10.187173	5.59908391	0.000509716	0.02038865	1349.12693
0.9	36.0	41.8	0.86	1.35	48.58	1.30491518	10.3808268	7.7349222	0.000704154	0.02816614	1536.47754
1.0	40.0	42.0	0.95	1.44	57.72	1.44300144	10.5563235	10.313203	0.000938869	0.03755476	1724.18298
1.1	44.0	42.2	1.04	1.53	67.44	1.57977883	10.7168614	13.3621397	0.001216431	0.04865724	1911.84829
1.2	48.0	42.4	1.13	1.62	77.72	1.71526587	10.8648434	16.9074672	0.001539182	0.06156728	2099.15242
1.3	52.0	42.6	1.22	1.70	88.54	1.84948072	11.0021239	20.9726396	0.001909258	0.0763703	2285.83114
1.4	56.0	42.8	1.31	1.78	99.86	1.98244123	11.1301654	25.5789988	0.002328601	0.09314402	2471.66488
1.5	60.0	43.0	1.40	1.86	111.69	2.1141649	11.2501429	30.7459387	0.002798976	0.11195905	2656.46983
1.6	64.0	43.2	1.48	1.94	123.99	2.24466891	11.3630159	36.4910343	0.003321985	0.13287939	2840.09124
1.7	68.0	43.4	1.57	2.01	136.75	2.37397012	11.469578	42.8301729	0.003899072	0.15596289	3022.39836
1.8	72.0	43.6	1.65	2.08	149.95	2.50208507	11.5704942	49.7776677	0.004531542	0.18126168	3203.28039
1.9	76.0	43.8	1.74	2.15	163.59	2.62903003	11.6663273	57.3463633	0.005220563	0.20882252	3382.64337
2.0	80.0	44.0	1.82	2.22	177.65	2.75482094	11.7575579	65.5477323	0.00596718	0.23868719	3560.40763



**Figura 10.-** Relación transporte total - caudal líquido (F. de Peterson-Peterson)  $[Q_s = 0.00004864 \cdot Q^{1.6411}]$

**Tabla 5.-** Cálculo del transporte sólido total. Fórmula de Brownlie.

h	A	P	R	V	Q	$\tau^*$	C*	qs*	qs	Qs	CsT
0.1	4.0	40.2	0.10	0.32	1.28	0.15076134	7.24463592	0.01163954	1.05961E-06	4.2385E-05	87.7223001
0.2	8.0	40.4	0.20	0.51	4.05	0.30003	8.12510556	0.11090696	1.00965E-05	0.00040386	264.151651
0.3	12.0	40.6	0.30	0.66	7.94	0.44782803	8.68600571	0.3740902	3.40555E-05	0.00136222	454.794487
0.4	16.0	40.8	0.39	0.80	12.78	0.59417706	9.10515922	0.86125616	7.8405E-05	0.0031362	650.373328
0.5	20.0	41.0	0.49	0.92	18.48	0.7390983	9.44246241	1.62328233	0.000147777	0.00591106	847.858838
0.6	24.0	41.2	0.58	1.04	24.95	0.88261253	9.72590252	2.70463009	0.000246218	0.00984871	1045.86957
0.7	28.0	41.4	0.68	1.15	32.16	1.02474016	9.97096496	4.14484657	0.000377329	0.01509315	1243.66156
0.8	32.0	41.6	0.77	1.25	40.05	1.16550117	10.187173	5.97950878	0.000544348	0.02177394	1440.79218
0.9	36.0	41.8	0.86	1.35	48.58	1.30491518	10.3808268	8.24087317	0.000750213	0.03000853	1636.90046
1.0	40.0	42.0	0.95	1.44	57.72	1.44300144	10.5563235	10.9583509	0.000997601	0.03990402	1832.04016
1.1	44.0	42.2	1.04	1.53	67.44	1.57977883	10.7168614	14.1588714	0.001288962	0.05155848	2025.84427
1.2	48.0	42.4	1.13	1.62	77.72	1.71526587	10.8648434	17.8671701	0.001626549	0.06506197	2218.30467
1.3	52.0	42.6	1.22	1.70	88.54	1.84948072	11.0021239	22.1060219	0.002012436	0.08049744	2409.35984
1.4	56.0	42.8	1.31	1.78	99.86	1.98244123	11.1301654	26.896435	0.002448534	0.09794137	2598.96701
1.5	60.0	43.0	1.40	1.86	111.69	2.1141649	11.2501429	32.2578149	0.002936611	0.11746443	2787.09695
1.6	64.0	43.2	1.48	1.94	123.99	2.24466891	11.3630159	38.208104	0.003478299	0.13913197	2973.7305
1.7	68.0	43.4	1.57	2.01	136.75	2.37397012	11.469578	44.7639034	0.004075111	0.16300443	3158.85598
1.8	72.0	43.6	1.65	2.08	149.95	2.50208507	11.5704942	51.940579	0.004728444	0.18913776	3342.46753
1.9	76.0	43.8	1.74	2.15	163.59	2.62903003	11.6663273	59.7523556	0.005439594	0.21758376	3524.56369
2.0	80.0	44.0	1.82	2.22	177.65	2.75482094	11.7575579	68.2124001	0.00620976	0.24839038	3705.14648



**Figura 11.-** Relación transporte total - caudal líquido (F. de Brownlie) [ $Q_s=0.00005548 \cdot Q^{1.6233}$ ].

La estimación de la tasa anual de transporte total de sedimentos, se llevó a cabo mediante una integración de la curva de duración de caudales empleando la función  $Q_s=f(Q)$  obtenida para cada fórmula de transporte aplicada. De esta manera se obtuvieron los siguientes valores:

- Fórmula de Engelund & Hansen:  $V_{Qs} = 0.2601 \text{ Hm}^3/\text{año}$
- Fórmula de Peterson & Peterson:  $V_{Qs} = 0.2015 \text{ Hm}^3/\text{año}$
- Fórmula de Brownlie:  $V_{Qs} = 0.2099 \text{ Hm}^3/\text{año}$
- Promedio de las tres fórmulas:  $V_{Qs} = 0.2238 \text{ Hm}^3/\text{año}$

### **Criterio 3. Fórmulas de Producción de Sedimentos a nivel de Cuenca.**

Existen varias formulaciones para estimar la producción de sedimentos por parte de una cuenca hidrológica. Entre ellas, una de las más conocidas es la denominada “Ecuación Universal de Pérdida de Suelo” ó USLE (por su denominación en inglés) la cual, como indica su nombre, es una formulación que sirve para obtener una cuantificación de la cantidad de suelo superficial que puede ser removido de la cuenca por acción combinada de precipitación y escorrentía. Esta relación ha sido muy difundida por parte del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Julien, 1995) y, a pesar de su denominación de ‘universal’ la misma ha sido testada inicialmente para pequeñas cuencas agrícolas y su aplicación a cuencas naturales de escala importante induce cierto nivel de incertidumbre. En la misma, la tasa de erosión potencial por unidad de superficie ( $E_s$ ) se expresa como el producto de seis factores:

$$E_s = F_R F_K F_L F_S F_C F_P$$

donde  $F_R$ : factor de precipitación pluvial;  $F_K$ : factor de estabilidad del suelo;  $F_L$ : factor de longitud del flujo superficial;  $F_S$ : factor de pendiente de la cuenca;  $F_C$ : factor de manejo de cultivos;  $F_P$ : factor de prácticas de conservación.

Otra formulación difundida en Europa, fundamentalmente por su efectividad cuando se la ha aplicado a ambientes de cuencas montañosas, es la de Gavrilovic. Esta metodología estima la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca, y que es transportado a la sección del río que la define (Spalletti y Brea, 1998).

Finalmente, existen algunas metodologías que se han originado como una necesidad de estimar la producción de sedimentos de la cuenca para evaluar la posible sedimentación en embalses. Justamente, con esta finalidad se desarrolló la metodología propuesta por Miraki (Garde y Ranga Raju, 1985), la cual ha sido calibrada con datos observados en 32 embalses cuya colmatación progresiva fue monitoreada conjuntamente con las características físicas e hidrológicas de las cuencas que aportaban su escorrentía a los cuerpos de agua. De esta manera, puede presentarse una relación funcional general para estimar el volumen total absoluto ( $V_{sa}$ ) de sólidos producidos por una cuenca en un año en la forma:

$$V_{sa} = \Psi_{V_{sa}}(A_c, P_a, V_Q, S_c, D_d, F_c)$$

En ella:

$A_c$  : área de la cuenca;  $P_a$  : precipitación media anual;  $V_Q$  : derrame medio anual;  $S_c$  : pendiente media de la cuenca;  $D_d$  : densidad de drenaje de la cuenca;  $F_c$  : factor de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca, que adquiere los valores: 0.20 para bosques protegidos y reservas forestales, 0.40 para bosques nativos, 0.60 para áreas agrícolas, 0.80 para pastizales y 1.00 para suelos denudados.  $F_c$  se determina ponderando cada una de las sub-áreas de la cuenca en relación al área total. Aplicando un análisis de regresión múltiple, Miraki propuso la siguiente ecuación:

$$V_{sa} = 1.182 \times 10^{-6} \cdot A_c^{1.026} P_a^{1.289} V_Q^{0.287} S_c^{0.075} D_d^{0.398} F_c^{2.422}$$

En esta ecuación, para obtener  $V_{sa}$  en  $Hm^3/año$ , se deben ingresar  $A_c$  en  $Km^2$ ,  $P_a$  en  $cm$ ,  $V_Q$  en  $Hm^3$ ,  $S_c$  adimensional,  $D_d$  en  $Km^{-1}$  y  $F_c$  adimensional. En cuando al comportamiento predictivo de la ecuación anterior, se ha reportado que en más del 85% de los casos testeados, las predicciones estuvieron dentro del rango del  $\pm 30\%$  de los valores observados, por lo que se estima que su aplicación resulta razonablemente confiable cuando se puede disponer de todos los datos básicos para su aplicación. Para la estimación del factor de uso del suelo, se consideró que la cuenca está ocupada en un 10% por bosques protegidos, un 30% por bosques nativos, 25% de áreas agrícolas, 30% pastizales y 5% de suelos denudados. Con estos valores el factor  $F_c$  resulta:  $F_c = 0.580$ . Los datos restantes son:  $A_c = 3147 Km^2$ ;  $P_a = 786 mm$ ;  $V_Q = 160.54 Hm^3$ ;  $S_c = 0.0454$ ;  $D_d = 0.3655 Km^{-1}$ . La producción de sedimentos resulta:  $V_{sa} = 0.7762 Hm^3/año$ . En función de los datos usados para su calibración, puede suponerse que esta metodología contempla, además de la parte de la carga de lavado retenida en los embalses, la fracción correspondiente al material de lecho transportado por los cauces a través de la red de drenaje de la cuenca y luego depositados en el lago.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha presentado una caracterización regional de caudales sólidos para cuencas del Noroeste Argentino (NOA), en base al procesamiento de la escasa información sedimentométrica disponible en la región.

Asimismo, a través de un ejemplo práctico se han presentado tres metodologías alternativas para la estimación de la producción de sedimentos en cuencas con escasos datos hidrológicos y de transporte sólidos, especialmente orientadas al diseño de embalses.

La aplicación de las tres técnicas consideradas para la estimación de la producción anual de sedimentos del Río Horcones produjo los siguientes resultados:

Criterio 1 (transposición regional):	$V_{QS(1)} = 1.4284 \text{ Hm}^3/\text{año}$
Criterio 2 (fórmulas de transporte en cauce):	$V_{QS(2)} = 0.2238 \text{ Hm}^3/\text{año}$
Criterio 3 (fórmulas de producción en cuenca):	$V_{QS(3)} = 0.7762 \text{ Hm}^3/\text{año}$

Como puede apreciarse, los resultados parecerían muy disímiles de acuerdo al criterio que se considere, lo cual es muy común en el campo de la Hidráulica Fluvial. Sin embargo, los mismos resultan consistentes en el sentido que el primer criterio incluye el transporte de material sólido en todas sus modalidades (carga de fondo, material de lecho suspendido y carga de lavado), mientras que el segundo sólo contempla el transporte total de material del lecho. En el caso del tercer criterio, los parámetros del modelo aplicado están calibrados para predecir el material total retenido en los embalses estudiados. Puede observarse que este criterio produce un resultado que se sitúa aproximadamente en el promedio de los dos anteriores. Además, para la cuenca analizada los valores obtenidos estarían indicando que el volumen anual de carga de lavado podría llegar a alcanzar hasta un 80% del volumen total de sólidos. Este aspecto tiene una importancia significativa para la predicción de la sedimentación en embalses, ya que dependiendo de la eficiencia de retención del lago la eventual colmatación estaría afectada en gran medida por la carga de lavado y por tanto sería fuertemente dependiente del uso del suelo en la cuenca de aporte.

Por lo antes apuntado, se recomienda (como una primera aproximación) adoptar el criterio 3 como un valor de cálculo para la predicción de las potenciales tasas de sedimentación en el embalse a proyectar. Esta cantidad se puede estimar a partir de parámetros de la cuenca fácilmente mensurables y datos hidrológicos de disponibilidad expeditiva.

**RECONOCIMIENTO.** Parte de los estudios aquí presentados se realizaron en el marco del Estudio de Factibilidad de la Presa sobre el Río Horcones (Provincia de Santiago del Estero), financiado por el Consejo Federal de Inversiones (CFI). Los autores desean expresar su consideración al equipo técnico de Red Ingeniería por el apoyo brindado durante la realización de los estudios.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Agua y Energía Eléctrica** (1991). *Estadística hidrológica hasta 1990*. Tomo II: Sedimentología-Nivología.

**Brea, J.D., Farias, H.D., Basile, P. & Spalletti, P.** (2002): "Análisis del riesgo y vulnerabilidad de la región noroeste de la Argentina (NOA). Análisis hidráulico y del transporte sólido". *Memorias Jornadas sobre Proyecto, Reconstrucción y Prevención de las Calamidades Naturales en América Latina. Análisis del Riesgo Hidrogeológico y Medidas de Prevención de los Riesgos Naturales en América Latina*. Tema 3. IILA, AIDI. Buenos Aires, febrero 2002.

**EVARSA** (1994). *Estadística hidrológica hasta 1994*. Secretaría de Energía, Buenos Aires.

**Garde, R. J. & Ranga-Raju, K.** (1985). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. Halsted Press, J. Wiley & Sons, NY, USA.

**Julien, P.Y.** (1995). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press, NY, USA.

**Proyecto NOA Hídrico** (1980). *Disponibilidad y Calidad del Recurso Hídrico Superficial. Area La Fragua – Nueva Esperanza, Santiago del Estero*. Salta, Argentina.

**Spalletti, P.; Brea J.D.** (1998). "Producción de sedimentos en cuencas de ríos de montaña". *XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Oaxaca, México.

**Spalletti P.D. y Brea J.D.** (2000). Validación de una metodología para estimación de producción de sedimentos. XVIII Congreso Nacional del Agua. Santiago del Estero 2000.

**Yang, C.T.** (1996): *Sediment Transport: Theory and Practice*. Mc Graw-Hill Book Co., NY, USA.