

FUNDAMENTOS PARA LA FORMULACIÓN DE UNA METODOLOGÍA GENERAL PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS

Hector Daniel Farias , Luis Alejandro Olmos

Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE)
Av. Belgrano (S) 1912, (G4200ABT) Santiago del Estero, Argentina
E-mail: hfarias@bigfoot.com lolmos@unse.edu.ar - Web: <http://irh-fce.unse.edu.ar/>

RESUMEN

Se presentan los primeros resultados obtenidos en un estudio tendiente a establecer las relaciones fundamentales para la formulación de una metodología general para la predicción de la producción global de sedimentos en una cuenca, con vistas a aplicaciones en estudios de factibilidad y planificaciones regionales que incluyan sistemas de embalses para estimar su vida útil. Se analizan las variables y relaciones fundamentales, y se investiga la forma matemática que deberían tener las ecuaciones en función de cada variable de importancia. En ese contexto se analiza una metodología basada en la fórmula de Miraki. La contrastación con datos dos conjuntos de cuencas de distintas geografías muestra un buen funcionamiento de las relaciones presentadas. Finalmente, se formula una relación general que deberá ser calibrada con bases de datos más extensas.

ABSTRACT

The first results obtained from a study aimed to establish the fundamental relationships for a general methodology to predict global sediment yield in watersheds is presented in this paper. The research is focused on applications to estimate the useful life of reservoirs in relation to the sedimentation problem. The main variables and relationships area analyzed to determine the mathematical form of the involved equations in terms of each significant variable. In this context, a methodology based on the Miraki formula is analyzed. The comparison of observed and predicted sediment yield for two sets of watersheds from different geographic regions show a good agreement. Finally, a new general relationship is proposed, which will be calibrated by using larger data sets.

INTRODUCCIÓN

La estimación de la producción global de sedimentos en una cuenca es un tema que merece especial atención en la planificación de los recursos hídricos de una región. Aunque se han desarrollado modelos más o menos sofisticados a escala distribuida (de Vente *et al.*, 2005), su aplicación no es sencilla por el elevado número de parámetros y en ciertas instancias de planes de aprovechamiento hídrico (por ejemplo, estudios de factibilidad de sistemas de embalses) se requiere de una estimación expeditiva del aporte global potencial de sólidos al reservorio y no de una modelación detallada.

La finalidad de este estudio es formular, a nivel preliminar, un criterio general para estimar la producción global de sedimentos (en forma de un modelo agregado) en cuencas, basado en la consideración de las variables que controlan los procesos físicos dominantes a escala de cuenca y analizar en este contexto algunos métodos disponibles, mediante la contrastación de sus predicciones con datos de campo colectados en geografías diversas. En particular interesa la obtención de ecuaciones sencillas para aplicaciones prácticas expeditivas.

PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS

En una revisión general de aspectos cuantitativos de geomorfología de cuencas, Strahler (1964) presentó un análisis de las variables fundamentales que gobiernan la dinámica y la evolución de cuencas hidrográficas. Ellas son:

- La densidad de drenaje D_d (que posee dimensiones $L/L^2=L^{-1}$).
- La intensidad de escorrentía I_Q (representada por la tasa volumétrica de flujo por unidad de área de la superficie de la cuenca, con dimensiones $L^3/T/L^2=L \cdot T^{-1}$).
- El factor de proporcionalidad de erosión K_E (expresado como la tasa másica de remoción de suelo por unidad de área, dividida por la fuerza por unidad de área. Las dimensiones de este factor son: $[K_E] = (M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}) / (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}) = L^{-1} \cdot T$).
- El relieve de la cuenca H_c (L).
- La aceleración de la gravedad g ($L \cdot T^{-2}$).
- Las propiedades del fluido: densidad ρ y viscosidad μ .

Considerando las variables anteriores, la dinámica de la cuenca estaría representada por una función de la forma:

$$f(D_d, I_Q, K_E, H_c, \rho, \mu, g) = 0 \quad (1)$$

Aplicando el Teorema "II" de Vaschy-Buckingham se obtiene la siguiente función adimensional:

$$\Phi \left(H_c \cdot D_d, I_Q \cdot K_E, \frac{\rho \cdot I_Q \cdot H_c}{\mu}, \frac{I_Q^2}{g \cdot H_c} \right) = 0 \quad (2)$$

O bien:

$$\Phi(\Pi_H, \Pi_E, \Pi_R, \Pi_F) = 0 \quad (3)$$

donde

$\Pi_H = H_c D_d$: número de "escarpamiento" de la cuenca

$\Pi_E = I_Q K_E$: número de Horton

$\Pi_R = \rho I_Q H_c / \mu$: es una forma de número de Reynolds

$\Pi_F = I_Q^2 / (g H_c)$ es una forma de número de Froude (elevado al cuadrado).

Cada uno de estos parámetros tiene su significado físico en relación con la dinámica evolutiva de la cuenca. El Número de Horton expresa la intensidad relativa de los procesos de erosión en la cuenca. Estos parámetros adimensionales definen los criterios de semejanza entre cuencas y

por lo tanto deberían ser considerados en estudios de homogeneidad hidrológica para aplicar técnicas de transposición. Asimismo, se puede obtener una primera aproximación de las variables a considerar en un modelo de erosión en cuenca, al expresar Π_E en función de las cantidades restantes, pero incluyendo aspectos relativos a los suelos y vegetación presentes en la cuenca.

Puede observarse que la intensidad de escorrentía aparece en tres de los cuatro parámetros adimensionales, lo cual pone en evidencia la importancia del mismo como agente modelador del paisaje que gobierna los procesos de erosión y sedimentación.

Para intentar una formulación adimensional de la producción de sedimentos en función de otras magnitudes fácilmente mensurables, la relación funcional expresada por la ecuación 3 puede reagruparse en la forma:

$$\Pi_E = \Phi_E(\Pi_H, \Pi_R, \Pi_F) \quad (4)$$

Si bien esta relación es correcta en lo formal, resulta dificultoso encontrar una fórmula de rápida aplicación práctica a partir de ella, puesto que no se dispone de una base de datos lo suficientemente confiable como para poder calibrar los parámetros que resulten de eventuales ajustes a fórmulas de una estructura matemática dada en función de un análisis de sensibilidad de cada uno de los parámetros adimensionales característicos. Por ello, se recurre a un enfoque alternativo, en la que se analiza una relación funcional general y luego se encuentra la forma que la misma debería tener para poder transformarla a una fórmula útil en la práctica.

METODOLOGÍA GENERAL DE CÁLCULO

Teniendo en cuenta los aspectos previamente enunciados, y considerando las variables de mayor relevancia que determinan la producción de sedimentos en una cuenca, se considera que una formulación generalizada debería tener la siguiente forma:

$$V_{Ps} = f_{Ps}(\Gamma_{CL}, \Gamma_{SU}, \Gamma_{TO}, \Gamma_{ES}, \Gamma_{VG}, \Gamma_{MA}) \quad (5)$$

donde V_{Ps} es el volumen anual de producción de sedimentos (L^3T^{-1}), que también se puede expresar en forma gravimétrica, es decir, en peso de material producido anualmente.

Γ_{CL} es una variable (o conjunto de variables y parámetros) que tiene en cuenta los factores climáticos. Habitualmente se incluye algún indicador de la precipitación pluvial, en algunos casos la lluvia media anual, en otros la escorrentía superficial, y también se suelen introducir indicadores de la variabilidad durante el año de estas magnitudes (como por ejemplo, factores calculados en base a la razón entre la precipitación máxima y la media, etc.).

Γ_{SU} es una variable que depende de las características de los suelos predominantes en la cuenca. Esta es una cantidad que intrínsecamente es distribuida arealmente en la cuenca y por lo tanto es una de las que más se presta para la implementación de modelos a escala distribuida. En ella se incluyen aspectos relacionados con la susceptibilidad de los suelos a ser

erosionados y transportados por la escorrentía y generalmente sus valores cuantitativos se estiman a partir de clasificadores más o menos objetivos.

Γ_{TO} es una variable (en la mayoría de los casos un conjunto de variables) relacionada con la topografía de la cuenca. Las cantidades que influyen en los procesos de erosión y transporte dependen de las características areales y de relieve, por lo que las magnitudes que habitualmente se consideran son el área de la cuenca, la pendiente media, la densidad de drenaje, indicadores de relieve, indicadores de forma, etc.

Γ_{ES} es una variable indicativa de la eficiencia en los procesos de transporte de sedimentos en la cuenca. En la mayoría de las formulaciones esta cantidad queda implícitamente contenida en el factor de entrega de sedimentos (sediment delivery ratio, k_{SDR}), pero es una cantidad que también se podría gestionar de una manera pseudo-distribuida en un modelo a escala de sub-cuencas.

Γ_{VG} es una variable que depende del tipo y extensión de la cobertura vegetal de la cuenca o sub-cuencas. Esta cantidad, que a su vez se relaciona en cierto grado con Γ_{SU} puede estimarse a partir de recursos basados en tecnologías de percepción remota (e.g., imágenes satelitales, fotografías aéreas, etc.) y se distribuye superficialmente en toda la extensión de la cuenca, por lo que resulta apropiada para modelación distribuida.

Γ_{MA} es una variable que depende del manejo ambiental en la cuenca o sub-cuencas, y debe interpretarse que la misma se refiere a los aspectos antrópicos fundamentalmente relacionados con las prácticas culturales de uso del suelo, laboreo agrícola, etc. También es una cantidad susceptible de ser gestionada en forma distribuida.

Teniendo en cuenta la formulación general, existen diversos modelos que pueden enmarcarse como casos particulares de la relación funcional generalizada. Por ejemplo, la denominada “ecuación universal de pérdida de suelo” (USLE) estima la erosión potencial E_S como el producto de seis factores, que más o menos tienen en cuenta los aspectos antes enunciados.

La producción de sedimentos global en un punto de la cuenca, que puede expresarse tanto en forma gravimétrica (G_{Ps}) o volumétrica (V_{Ps}), se relaciona con la tasa global de erosión potencial (E_S) a través de:

$$G_{Ps} = k_{SDR} \cdot E_S \quad (6)$$

donde k_{SDR} se denomina “factor de entrega” (o “sediment delivery ratio”), y depende fundamentalmente de la capacidad de la cuenca (a través de su red de cauces e interfluvios) de transportar el material generado por la erosión hacia aguas abajo. En una de las situaciones en que más interesa estimar la producción de sedimentos, como lo es el tema de la deposición de sólidos en un embalse, el valor de k_{SDR} se debe evaluar en el punto de localización del reservorio.

Teniendo en cuenta los procesos involucrados en la transferencia de las masas sólidas a través de la cuenca hidrográfica, k_{SDR} debería ser una función de las características fisiográficas, tales

como el relieve (incluyendo la pendiente), la densidad de drenaje, la geometría hidráulica de los cauces y sus rugosidades, etc., además, obviamente del área de la cuenca. Es decir:

$$k_{SDR} = f_{k_{SDR}}(S_c, D_d, A_c) \quad (7)$$

Sin embargo, y como en muchos de los aspectos relacionados con este tema, generalmente se expresa al factor de entrega como una función exclusiva del área de la cuenca (A_c). Es decir:

$$k_{SDR} = f_{k_{SDR}}(A_c) \quad (8)$$

Resulta evidencia que la producción específica de sedimentos es una función del área de la cuenca. Es más, a priori se sabe que cuanto más grande es la superficie de la cuenca la producción específica debería decrecer, ya que el material producido en las zonas altas se deposita en las regiones con menor pendiente. En la Fig. 1 se presenta un gráfico de estas variables en la que se observa que, no obstante la apreciable dispersión, se demuestra la tendencia antes descrita.

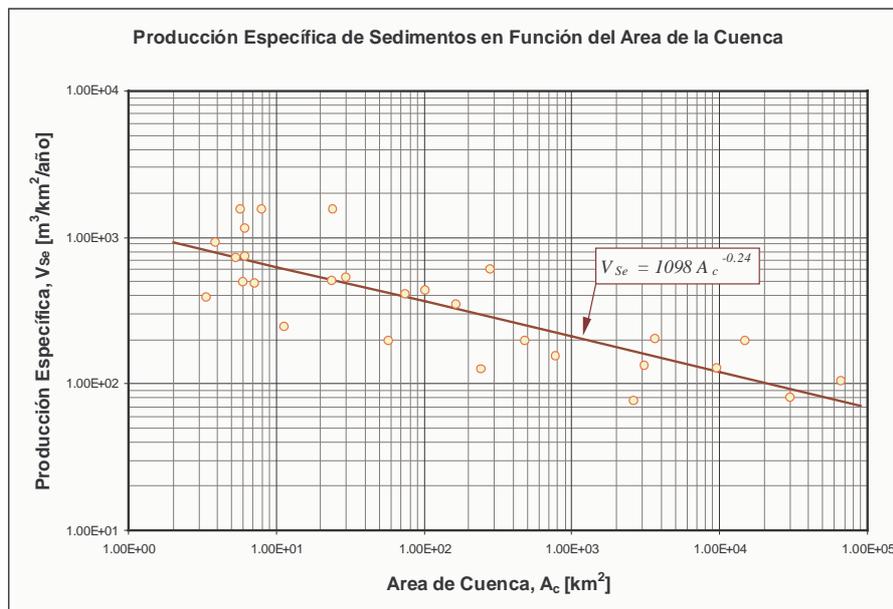


Figura 1.- Producción Específica de Sedimentos en función del Área de la Cuenca (Datos de Strand y Pemberton, 1987) [Julien, 1995].

En función del patrón de comportamiento antes observado, resulta evidente que gran parte de la dispersión se debe a la falta de consideración de las otras variables que influyen sobre la producción de sedimentos, por lo que su incidencia aparece contenida en el coeficiente de la ecuación potencial de ajuste, entre ellos el propio factor de entrega.

En virtud de lo expresado, resulta razonable suponer que el factor de entrega debería seguir la misma tendencia. La Fig. 2 presenta datos que aparecen en varios textos sobre erosión y sedimentación (en este caso se ha usado el presentado por Julien, 1995). La curva que aparece dibujada en esa figura no tiene una representación analítica sino simplemente indica la tendencia general de los datos ploteados.

En la Fig. 3 se presentan los mismos de producción de sedimentos en cuencas de variadas geografías en los Estados Unidos y se indica la fórmula potencial sugerida por Julien (1995), la cual sostiene que $K_{SDR} \sim A_c^{-0.3}$. Sin embargo, si se realiza un análisis de regresión sobre los datos se encuentra que la curva de mejor ajuste resulta: $K_{SDR} = 28.63 A_c^{-0.22}$. Puede apreciarse que esta curva interpreta mucho mejor los datos de campo que la propuesta por Julien.

Por lo tanto, si únicamente se dispone del área de la cuenca como dato, puede emplearse esta relación como una primera aproximación para estimar el factor de entrega.

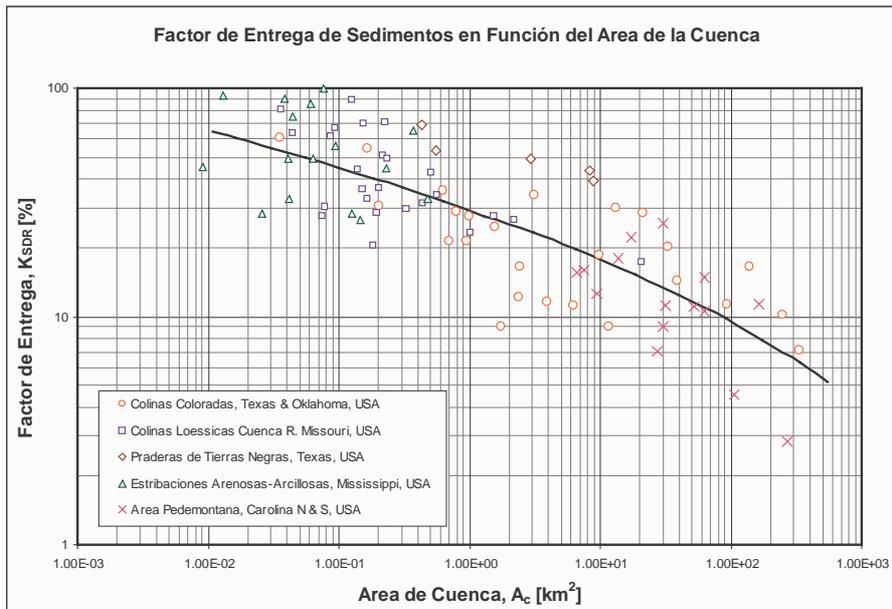


Figura 2.- Factor de Entrega de Sedimentos en función del Área de la Cuenca. Datos extraídos de Julien (1995). La curva es la que se encuentra publicada en la literatura.

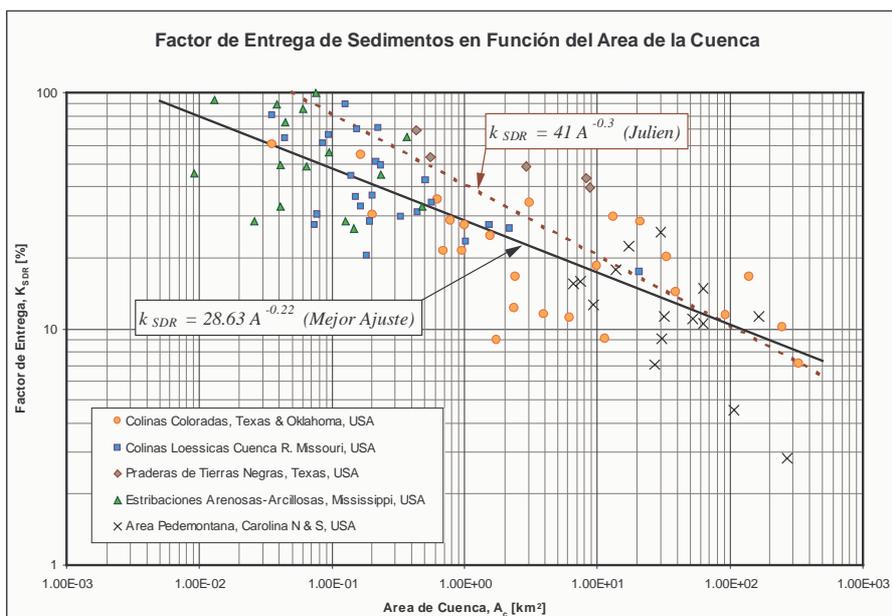


Figura 3.- Factor de Entrega de Sedimentos en función del Área de la Cuenca. Datos extraídos de Julien (1995). Se indica el ajuste propuesto por Julien y el resultante del análisis de regresión.

ANÁLISIS DE FORMULACIONES EXISTENTES

En el marco del presente estudio se analizaron varias formulaciones existentes para predecir V_{Ps} o G_{Ps} , entre ellas USLE y modificaciones (van Rompaey et al., 2005), Gavrilovic (de Cesare et al, 1998) y Miraki (Chakraborti, 1991).

Mediante un estudio comparativo de las fórmulas, que considera su fundamento físico y el resultado de las predicciones comparadas con datos de campo, se encontró que las relaciones basadas en los criterios de Gavrilovic y Miraki pueden expresarse en un formato tal que resulta adecuado para obtener una formulación sencilla en función de cantidades fácilmente disponibles en estudios regionales. Para la fórmula tipo Gavrilovic, se obtiene:

$$V_{Ps} = f_{Ps}(k_{\Xi}, k_{\Pi}, k_{\Phi}, k_{\Theta}, L_X, \Sigma L_{N-1}, Z, L_{CP}, A_c, S_c, P_a) \quad (9)$$

en la que aparecen factores empíricos que dependen de los suelos presentes en la cuenca, su uso y su cubierta vegetal [k_{Ξ} es un factor de cobertura vegetal del suelo (variable entre 0.05 y 1.00), k_{Π} es un factor de resistencia a la erosión del suelo (con valores de 0.2 a 2.0), k_{Φ} es un factor de tipo y extensión de la erosión observada en la cuenca (varía entre 0.1 y 1.0) (todos estos factores se estiman a partir de tablas)], además de los parámetros morfométricos [L_X es el perímetro de la cuenca, L_{CP} la longitud del curso principal, ΣL_{N-1} la longitud de los cursos de menor orden, Z la altitud media y S_c es la pendiente media de la cuenca en %] y las variables hidrológico-climáticas (precipitación anual P_a y temperatura a través del factor k_{Θ}).

Una fórmula tipo Miraki se puede expresar en la forma de una relación funcional genérica de la siguiente manera:

$$V_{Sa} = f_{Vs}(A_c, P_a, V_Q, S_c, D_d, F_c) \quad (10)$$

en la que:

V_{Sa} : representa el volumen absoluto de sedimentos producido por la cuenca, expresados en hm^3 .

A_c : área de la cuenca en Km^2

P_a : precipitación media anual en cm

V_Q : esorrentía media anual en hm^3

S_c : pendiente media de la cuenca (adimensional)

D_d : densidad de drenaje en Km^{-1}

F_c : Factor de cobertura vegetal y uso del suelo (adimensional)

En su presentación original (Garde y Ranga Raju, 1985) esta relación se presenta como un producto de potencias, cuyos coeficientes y exponentes se encontraron mediante un análisis de regresión múltiple usando datos de cuencas en las que se tenían embalses sobre los que se realizaron batimetrías para mensurar la producción real de sedimentos teniendo en cuenta los

volúmenes depositados en los cuerpos de agua. La formulación tipo Miraki se puede expresar en forma general como sigue:

$$\nabla_{sa} = c_0 A_c^{c_1} S_c^{c_2} D_d^{c_3} P_a^{c_4} V_Q^{c_5} F_c^{c_6} \quad (11)$$

donde se pueden aplicar cuatro formulaciones alternativas, según la Tabla 1.

Tabla 1.- Coeficientes y exponentes de las cuatro ecuaciones propuesta por Miraki (Garde & Ranga-Raju, 1985)

Ecuación	c₀	c₁	c₂	c₃	c₄	c₅	c₆
1	1.182E-06	1.026	0.075	0.398	1.289	0.287	2.422
2	1.067E-06	1.292	0.129	0.397	1.384	0.000	2.510
3	2.410E-06	1.154	0.060	0.000	1.071	0.000	1.893
4	4.169E-05	0.841	0.000	0.000	0.139	0.312	0.000

Garde y Ranga-Raju (1985) indican que las cuatro ecuaciones tienen un orden decreciente de precisión y recomiendan usar una u otra en función de la disponibilidad de datos.

Para los embalses situados en la India que se usaron para calibrar las ecuaciones, puede realizarse un estudio de los exponentes de cada una de las variables involucradas. A continuación se analizan los valores aproximados característicos de cada exponente:

$$c_1 = 1.026 \sim 1.0$$

$$c_2 = 0.075 \sim 0.1$$

$$c_3 = 0.398 \sim 0.4$$

$$c_4 = 1.289 \sim 1.3$$

$$c_5 = 0.287 \sim 0.3$$

$$c_6 = 2.422 \sim 2.5$$

Se puede observar la fuerte dependencia del factor F_c en todas las ecuaciones en las que el mismo interviene. Particularmente, en las primeras dos (las de uso más extendido) el exponente se sitúa en torno a $5/2$, por lo que el resultado que se obtenga para la producción de sedimentos está fuertemente condicionado por una correcta estimación del factor de cobertura.

Afortunadamente, el mismo puede estimarse con suficiente confiabilidad a partir de cartas o mapas temáticos basados en la aplicación de tecnologías de percepción remota.

En cuanto a la dependencia de los factores fisiográficos, la relación de ∇_{sa} con el área de la cuenca es casi lineal (lo cual es lógico), mientras que la producción de sedimentos se muestra como poco sensitiva a la pendiente (exponente del orden de 0.1), lo cual posiblemente estaría indicando una singularidad del área con cuyos datos fueron calibradas las formulaciones de Miraki. Por su parte, la dependencia con la densidad de drenaje (exponente ~ 0.4) es una característica que destaca a esta fórmula y debería ser explorada con una mayor nivel de profundidad una vez que se dispongan de mayores datos de campos, al igual que en el caso de la pendiente.

Por tratarse de una formulación de tipo empírica, la primera ecuación parecería presentar una variable superabundante, puesto que la escorrentía superficial se relaciona con la precipitación a través del coeficiente de escorrentía global, por lo que P_a y V_Q resultan interdependientes y parecería atinado usar la segunda ecuación como la de carácter más general. Inclusive, esta singularidad se ve reflejada en los propios valores de los exponentes. En efecto, el exponente de la precipitación en la segunda ecuación es del orden de 1.4, aproximadamente 10% mayor que en la primera, que a su vez incluye la escorrentía, por lo que al no considerar la escorrentía superficial aquel valor resulta razonablemente incrementado en relación a la primera ecuación.

Sin embargo, no resulta absolutamente justificado que la dependencia de la precipitación por parte de la producción de sedimentos siga una ley de tipo potencial. En efecto, existen estudios que indican un comportamiento apartado de aquella tendencia. Por ejemplo, hace ya mucho tiempo, Langbein y Schumm en 1958 (Schumm, 1977) encontraron que la producción específica, en su relación con la precipitación media anual, exhibe un patrón creciente hasta un máximo cerca de los 270 mm (zonas áridas) y luego comienza a decrecer para valores mayores de P_a , indicando que en las zonas con mayor precipitación es también mayor la cobertura vegetal y por tanto menor la producción específica de sedimentos.

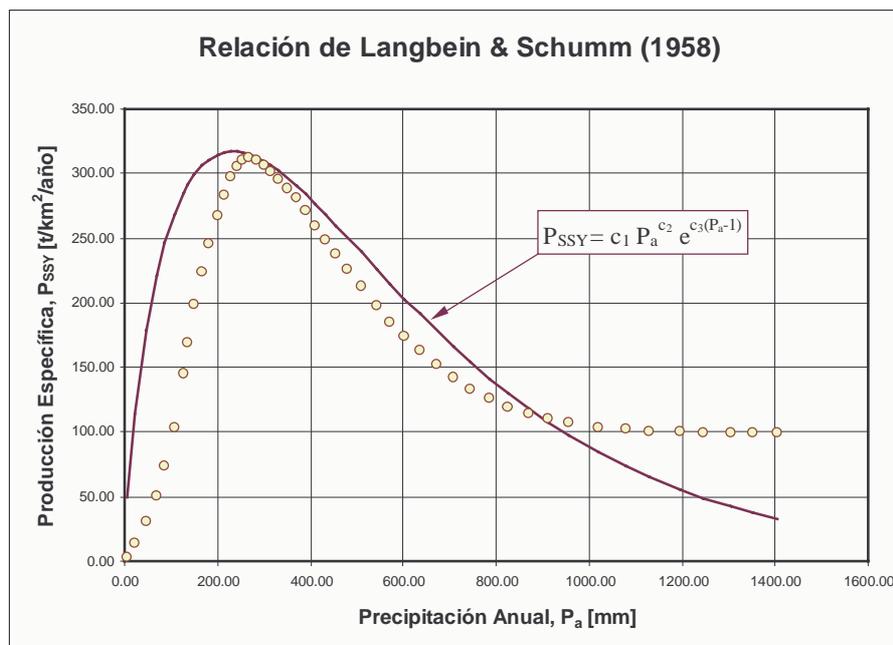


Figura 4.- Relación entre la producción específica y la precipitación anual según el criterio de Langbein y Schumm. La curva indicada corresponde a los valores: $c_1=14$, $c_2=0.7$, $c_3=-0.003$.

Este patrón de comportamiento se observa en la Fig. 4, y también se presenta una relación funcional aproximada que en primera instancia se ha considerado como el producto de una potencial por una exponencial decreciente, y que describiría aceptablemente la tendencia.

En otros estudios, por ejemplo los conducidos por Dendy y Bolton en 1976 [Julien 1995], se han observado patrones de comportamiento semejantes para la relación entre la producción específica y la escorrentía específica (Fig. 5). Como se comentó antes, la fuerte dependencia entre la escorrentía superficial y la precipitación media justifica esta tendencia, que también

puede describirse aceptablemente por una ecuación del tipo producto potencial-exponencial, tal como se representa en la Fig. 5. En definitiva, un aspecto que debería explorarse con mayor detalle es la forma de la función que incluye la componente precipitación en la ecuación general (Ec. 10), ya que se ha demostrado que la potencial no resulta completamente satisfactoria para rangos amplios, aunque se estima que una región con valores de precipitación media sin variaciones significativas, la incidencia de P_a sobre la producción de sedimentos no debería ser tan importante.

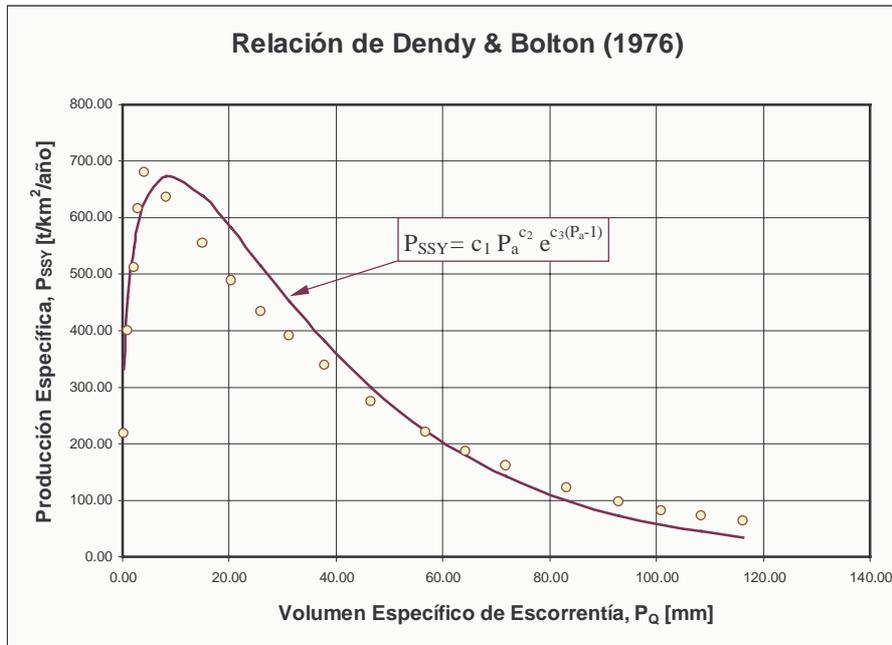


Figura 5.- Relación entre la producción específica y el volumen específico de escorrentía según el criterio de Dendy y Bolton. La curva indicada corresponde a los valores: $c_1=450$, $c_2=0.31$, $c_3=-0.035$.

APLICACIÓN

Entre las aplicaciones realizadas se llevó a cabo una validación independiente de la segunda ecuación de Miraki (Tabla 1) usando datos de cuencas situadas en Europa y en Sudamérica, teniendo en cuenta que la fórmula fue calibrada inicialmente con datos de cuencas y embalses de la India. En la Fig. 6 se presenta uno de los resultados que indica que, no obstante la dispersión típica de estas verificaciones, la formulación predice de manera razonable el comportamiento de V_{Ps} en el caso de cuencas estudiadas en Italia.

En la misma se han graficado los puntos correspondientes a 39 cuencas presentadas recientemente por Van Rompaey et al. (2005), para las que se ha representado la relación entre G_{Ps} (producción total expresada en forma gravimétrica, en toneladas anuales) y lo que se ha denominado “producto 2 de Miraki”, simplificado por X y calculado como:

$$X = A_c^{1.292} S_c^{0.129} D_d^{0.392} P_a^{1.384} \quad (12)$$

Como no se disponía de la información detallada, el único factor que no interviene en este producto, es el factor de cobertura F_c .

Como se mencionó antes, no obstante la dispersión general observada, puede apreciarse que los puntos definen una franja creciente en escala log-log, y tienden a agruparse alrededor de una recta, lo cual indicaría una relación potencial entre G_{Ps} y X del tipo $G_{Ps}=k_1.X^{k_2}$, donde k_1 y k_2 resultan del ajuste.

En la Fig. 6 se indica la curva de mejor ajuste obtenida (con un coeficiente de correlación cercano a 0.7), la cual presenta como aspecto destacado que $k_2 = 0.9413$, es decir, un valor muy cercano a la unidad, lo cual estaría indicando que una formulación tipo Miraki explica de una manera mu aceptable el comportamiento de este conjunto de cuencas en Italia. Con ello, se estaría en una primera instancia en una situación cercana a la validación independiente de esta formulación, usando datos que no fueron usados para su calibración. Debe tenerse en cuenta que la dispersión observada se debe en gran medida a la omisión de F_c , ya que su efecto que “enmascarado” en el valor del coeficiente k_1 obtenido en el ajuste.

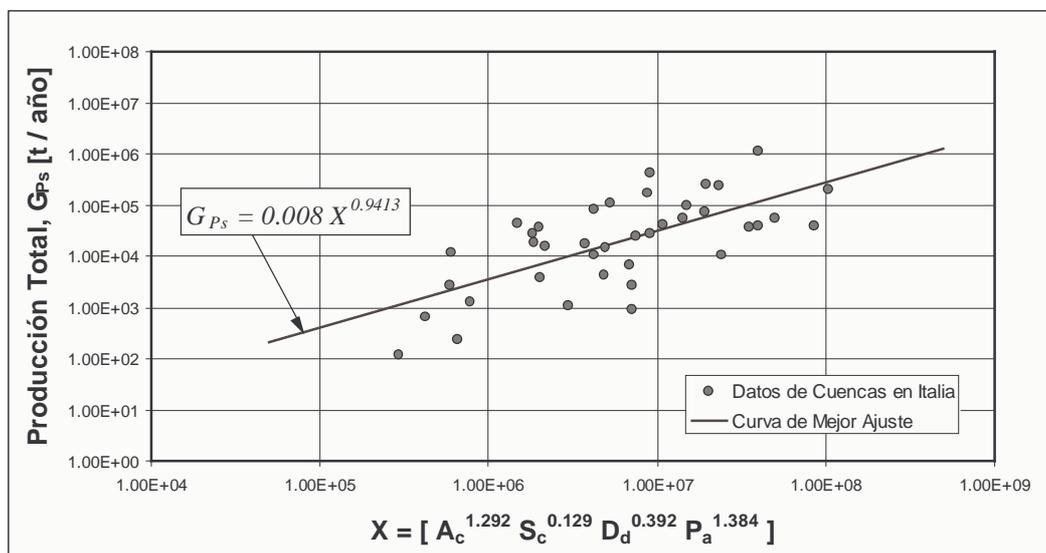


Fig. 6.- Relación entre la producción total y la variable X de la Ec. 2 de Miraki.

Paralelamente, se compilaron datos de cinco cuencas situadas en la Región NOA de Argentina, para las que se aplicó un procedimiento semejante al de las cuencas de Italia. Los datos de producción usados resultan de los sedimentos depositados en los embalses Los Sauces (La Rioja), Escaba (Tucumán), El Cadillal (Tucumán), Río Hondo (Santiago del Estero) y Cabra Corral (Salta).

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7. En la misma se han ploteado los valores de la producción global de sedimentos expresada en forma volumétrica (V_{Ps} en hm^3 por año) en función del producto 2 de Miraki. Observando el patrón de dispersión se infiere que el comportamiento resulta semejante al caso anterior. Por ello, lo que se hizo fue realizar un ajuste del tipo $V_{Ps}=k_1.X^{k_2}$, pero manteniendo constante el valor de $k_2 = 0.94$ (idéntico al resultante para las cuencas italianas). Sorprendentemente, se encontró que con un ajuste de k_1 (del orden de 10^{-6} para las unidades empleadas) se obtiene una concordancia muy buena entre valores observados y calculados para las cinco cuencas (Fig. 7), lo cual nuevamente es un fuerte indicio del buen comportamiento de la ecuación tipo Miraki para las cuencas del NOA.

Los resultados obtenidos no son definitivos, pero indican una buena perspectiva para procurar el desarrollo de una nueva ecuación general, que una primera instancia se podría formular como:

$$V_{Ps} = \Phi(F_c) \cdot \lambda_1 \cdot P_a^{\lambda_2} \cdot e^{-\lambda_3 \cdot P_a} \cdot X^{\lambda_4}, \text{ con: } X = A_c^{1.292} S_c^{0.129} D_d^{0.392} P_a^{1.384} \quad (13)$$

donde los λ_i ($i = 1, 2, 3, 4$) son los coeficientes y exponentes a calibrar y la función $\Phi(F_c)$ debe explorarse con un mayor nivel de detalle.

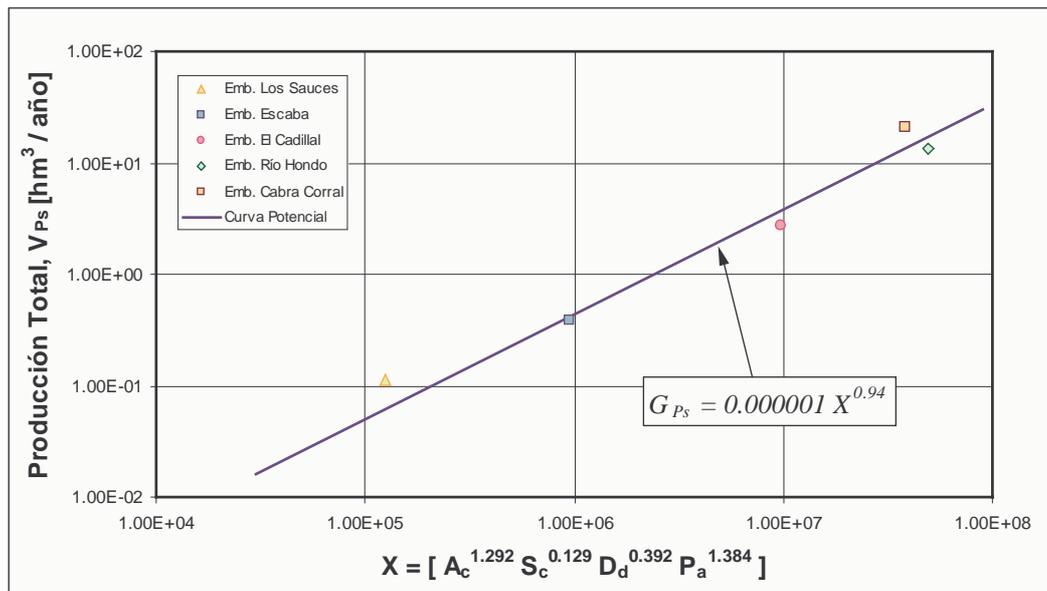


Figura 7.- Relación entre la producción anual de sedimentos y el producto 2 de Miraki para 5 cuencas de la región NOA

CONCLUSIONES

Se han presentado los primeros resultados de un estudio tendiente a explorar las relaciones fundamentales para la formulación de una metodología general para predecir la producción global de sedimentos en una cuenca, con vistas a aplicaciones en estudios de factibilidad y planificaciones regionales que incluyan sistemas de embalses para estimar su vida útil. Se han investigado las variables y relaciones fundamentales y se han analizado formulaciones existentes. Las aplicaciones realizadas a conjuntos de cuencas en diferentes geografías han posibilitado encontrar una relación básica para la producción global de sedimentos, que deberá ser perfeccionada en el futuro mediante calibraciones con bases de datos más extensas.

Agradecimiento. Las investigaciones presentadas en el presente trabajo fueron financiadas por el Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad nacional de Santiago del Estero (CICYT-UNSE) [Proyecto 23-C042], la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) [Proyecto FONCYT PICTR2002-00175] y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c : área de la cuenca

H_c : relieve de la cuenca.

D_d : densidad de drenaje de la cuenca

E_S : tasa global de erosión potencial

F_C : factor de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca.

g : aceleración de la gravedad

I_Q : intensidad de escorrentía

K_E : factor de proporcionalidad de erosión

k_{SDR} : "factor de entrega" (o "sediment delivery ratio")

k_{Ξ} : factor de cobertura vegetal del suelo en la formulación de Gavrilovic

k_{Π} : factor de resistencia a la erosión del suelo

k_{Φ} : factor de tipo y extensión de la erosión observada en la cuenca

k_{Θ} : factor de temperatura en la formulación de Gavrilovic

L : longitud del cauce principal.

L_X : perímetro de la cuenca

L_{CP} : longitud del curso principal

ΣL_{N-1} : longitud de los cursos de menor orden

P_a : precipitación media anual.

S_c : pendiente media de la cuenca.

t : tiempo

V_{Ps} : volumen anual de producción de sedimentos

V_Q : derrame medio anual

Z : altitud media de la cuenca.

Γ_{CL} : conjunto de variables y parámetros que tiene en cuenta los factores climáticos

Γ_{SU} : variable que depende de las características de los suelos predominantes en la cuenca

Γ_{TO} : conjunto de variables relacionada con la topografía de la cuenca

Γ_{ES} : variable de eficiencia en los procesos de transporte de sedimentos en la cuenca

Γ_{VG} : variable que depende de la cobertura vegetal de la cuenca o sub-cuencas

Γ_{MA} : variable que depende del manejo ambiental en la cuenca o sub-cuencas

μ : viscosidad dinámica

Π_H : número de "escarpamiento" de la cuenca

Π_E : número de Horton

Π_R : forma de número de Reynolds

Π_F : forma de número de Froude (elevado al cuadrado)

ρ : densidad

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chakraborti, A.K. (1991). "Sediment yield prediction & prioritisation of watershed using Remote Sensing data". *12th Asian Conference on Remote Sensing*, Singapore, Oct. 30–Nov. 5. [<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1991/psq/ps003pf.htm>]

de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G. (2005). "The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain". *Journal of Hydrology*, Vol. 305, pp. 63–86.

De Cesare G., N. A. Beyer Portner, J.-L. Boillat and A. Schleiss (1998). "Modelling of Erosion and Sedimentation Based on Field Investigation in Alpine Reservoirs of Hydropower Schemes". In : K. P. Holz, W. Bechteler, S. S. Y. Wang and M. Kawahara (eds.). *Advances in Hydro-Science and -Engineering*, Vol. III. Proceedings of ICHE '98, Cottbus/Berlin, Germany.

Garde, R.J. & Ranga-Raju, K.G.R. (1985). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. (2nd edition) Wiley Eastern Ltd., 618 pages [ISBN 0-85226-306-6].

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

Schumm, S. A. (1977). *The Fluvial System*. Blackburn Press, UK & USA.

Strahler, A.N. (1964). "Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks". In: V.T. Chow (ed.) *Handbook of Applied Hydrology*, Section 4-II. McGraw-Hill, NY, USA.

Van Rompaey, A., Bazzoffi, P., Jones, R.J.A., Montanarella, L. (2005). "Modeling sediment yields in Italian catchments". *Geomorphology*, Vol. 65, pp. 157–169.

Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J., Koninckx, X. (2003). "Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates". *Geomorphology*, Vol. 50, pp. 327–348.