

VERIFICACIÓN DE MODELOS DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS DEL N.O. ARGENTINO

L.A. Olmos

Instituto de Recursos Hídricos
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Universidad Nacional Santiago del Estero
Av. Belgrano (S) 1912, (4200) Santiago del Estero, Argentina
lolmosunse.edu.ar

P. Spalletti

Instituto Nacional de Agua (INA)
Casilla de Correo 21
(1804) Ezeiza, Buenos Aires, Argentina

H.D. Farias, M.T. Pilán

Instituto de Recursos Hídricos
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Universidad Nacional Santiago del Estero
Av. Belgrano (S) 1912, (4200) Santiago del Estero, Argentina

Resumen: La erosión en cuencas es uno de los problemas ambientales más complejos a nivel mundial. Es así que ha sido tema de investigación durante décadas en los países con los más variados climas, y considerando una diversidad de factores tales como: amplios rangos de temperaturas, distribución temporal y espacial irregular de las lluvias, degradación de la cobertura vegetal, entre otros.

Las metodologías desarrolladas (USLE, MUSLE, WEPP, etc.) y aplicadas principalmente en Estados Unidos y en Europa, tienen la limitación de ser aplicables bajo ciertas condiciones, por ejemplo: zonas agrícolas con los factores controlados, cuencas de superficies pequeñas (menores a 500 km²), disponibilidad de datos hidrológicos a nivel diario y en un período de tiempo representativo, entre las más importantes y con variables difícilmente de ser aplicadas de manera distribuida. En la mayoría de los casos 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.

En el presente trabajo se analiza el comportamiento de una serie de modelos a escala distribuida (Gavrilovic, USLE y Miraki) en un conjunto de cuencas de la región del Noroeste Argentino. Se utilizan para su validación los datos disponibles de relevamientos batimétricos de sus embalses, de manera de establecer los criterios de aplicación de cada metodología según el caso de estudio a tratar.

INTRODUCCIÓN

La erosión de cuencas de drenaje y la degradación son problemas ambientales complejos a nivel mundial. Es así que ha sido naturalmente el tema de investigación durante muchas décadas en los países que presentaban todos los tipos de clima en el planeta. El problema se agrava debido a diferentes factores, como ser: amplio rango de temperatura, distribución irregular de la lluvia, degradación de la cobertura vegetal, entre otros.

La región del Noroeste Argentino (NOA) pre-

senta un cuadro de severo deterioro ambiental, que adquiere una considerable gravedad en el caso de las cuencas hídricas. En particular, los procesos de erosión superficial y remoción de sedimentos en masa, que afectan a las cuencas de dicha región, agudizan el problema de las inundaciones, acentúan los fenómenos de colmatación de embalses, condicionan el regular funcionamiento de las obras de toma, influyen negativamente en la fauna acuática y promueven procesos de metamorfosis fluvial. Es decir, afectan significativamente las condiciones ambienta-

les tanto en las áreas montañosas como en las zonas pedemontanas y de llanura.

Los métodos para la valoración de la degradación de la tierra debido a la acción erosiva del escurrimiento del agua de lluvia puede ser de dos tipos: cualitativos o cuantitativos. Los primeros apuntan al conocimiento de las formas y el grado de intensidad del fenómeno, tomando como base unidades homogéneas a las que se le asigna el grado de erosionabilidad cualitativo (nulo, bajo, moderado, alto), dentro de los cuales se pueden citar a Bordás y Sánchez Díaz, Programa CORINE (Fernández *et al.*, 1998), entre otros. De hecho, la valoración cuantitativa es más difícil que la cualitativa, puesto que implica un intento por calcular las magnitudes y volúmenes de interés que son escasamente medidos en la práctica. En los últimos años se han desarrollado varios métodos para la valoración cuantitativa de la degradación entre los que se pueden citar: USLE, MUSLE, RUSLE, WEPP, AGNPS, CREAMS, ANSWERS. La mayoría de ellos se ha usado principalmente en Estados Unidos y en menor medida en Europa (Olmos y Jegat, 2001).

De estos dos enfoques el que más interés tiene desde el punto de vista de la ingeniería es el cuantitativo. Al respecto, las metodologías enunciadas poseen la limitación de ser aplicables bajo alguno de los siguientes condicionantes: cuencas con pendientes medias límites, zonas agrícolas con todos los factores controlados, cuencas de superficies pequeñas (menores a 500 Km²), necesidad de contar con medidas y datos hidrológicos de las cuencas a nivel diario para un período de tiempo desde el punto de vista hidrológico representativo y con variables difícilmente de ser aplicadas de manera distribuida.

OBJETIVO

Dentro de este contexto, los ingenieros dedicados al área fluvial en Argentina cuando tienen que abordar la determinación del proceso de erosión y transporte de sedimentos debido a la precipitación y flujo superficial en cuencas rurales de dimensiones importantes (mayores a 1000 Km²) normalmente aplican modelos paramétricos como el de Gavrilovic o el de Miraki a nivel agregado, los cuales permiten salvar los condicionantes antes expuestos y arribar a una cuantificación razonablemente aceptable a la hora de predecir el fenómeno de estudio en algún sitio de interés o donde se emplazará o está emplazada una obra hidráulica. Es por ello, que resulta necesario realizar una evaluación del comportamiento de estos modelos a escala distribuida de

manera de poder observar la variación espacial del fenómeno estudiado para una serie de cuencas que permitan generalizar la aplicación de los mismos.

En virtud de esta situación, el presente trabajo tiene como objetivo el análisis de los modelos Gavrilovic, USLE, y Miraki (según orden cronológico de aparición) de manera de poder implementarlos a escala distribuida y proceder a la validación de los mismos en base a datos medidos disponibles a partir de relevamiento batimétricos en una serie de embalses de la región noroeste de la Argentina (NOA). Si bien es cierto que las condiciones de borde bajo las cuales ha sido calibrado el modelo USLE hacen que no sea recomendable su aplicación, se utiliza el mismo a fin de ratificar o rectificar dichas restricciones. Las áreas de las cuencas de aportes se sitúan entre los 780 Km² y los 32.600 Km², correspondiendo a cuencas de magnitud superficial media y grande según la clasificación de Ponce (Clarke y Waldo, 1986), lo que le confiere, como se dijo anteriormente, una generalidad considerable al fenómeno de estudio.

CONCEPCIÓN DE LOS MODELOS DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

En general las ecuaciones para la estimación de la producción de sedimentos son semejantes a la más conocida y difundida de ellas, como lo 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 (Wischmeier y Smith 1978) y, a pesar de su denominación de 'universal' la misma ha sido testeada inicialmente para pequeñas cuencas agrícolas y como se dijo anteriormente su aplicación a cuencas naturales de escala importante induce cierto nivel de incertidumbre. A continuación se realiza una descripción breve de cada uno de los modelos de acuerdo al orden de aparición.

Modelo de Gavrilovic

Esta formulación fue difundida especialmente en Europa, fundamentalmente por su efectividad cuando se ha aplicado a ambientes de cuencas montañosas y fue concebida por Gavrilovic (1972). 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 (Emmanouloudis y Filippidis, 2000). Es un método empírico que se compone de dos partes:

- El cálculo de la erosión media anual de sedimento por lluvia y escorrentía superficial (W).
- La determinación del coeficiente de redistribución 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), el que se estima con la expresión:

$$G = W \cdot R \quad [m^3/año] \quad (1)$$

En cuanto a la concepción del fenómeno de estudio por parte de esta metodología, la misma es semejante a la USLE en un alto porcentaje, ya que tiene en cuenta la interacción de los siguientes factores: precipitación, clima, topografía, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas, geomorfología. Por ello las formulaciones intentan incluir estas variables con un adecuado peso relativo.

La expresión para determinar el volumen promedio anual erosionado de sedimento es:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F \quad [m^3/año] \quad (2)$$

$$T = [(t/10) + 0,1]^{1/2} \quad (3)$$

$$Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + I^{1/2}) \quad (4)$$

Los valores de X , Y y φ son propuestos por los autores, como producto de más de 20 años de experiencia en aplicaciones a cuencas naturales.

Estos coeficientes representan, respectivamente, el grado de protección del suelo dado por la vegetación y la intervención antrópica, el grado de erodabilidad del suelo, y el estado de inestabilidad de la cuenca. Los mismos se obtienen de tablas en función de las características de la cuenca y del clima

$$R = \frac{\sqrt{O \cdot D} \cdot (L + Li)}{(L + 10) \cdot F} \quad (5)$$

Modelo USLE

Este modelo plantea el cálculo de una tasa de erosión potencial por unidad de superficie (E_s) expresada como el producto de seis factores:

$$E_s = F_R \cdot F_K \cdot F_L \cdot F_S \cdot F_C \cdot F_P \quad (6)$$

Erosión Promedio Anual (E_s)

Es el valor estimado de la erosión para un año promedio y está expresada en $[tn/ha.año]$ en el sistema internacional.

Índice de Erosividad por Lluvia y Escorrentía (F_R)

Es el número de unidades del índice de erosividad de la lluvia, más un factor de escorrentía por nieve o agua aplicada, cuando estas generan una escorrentía significativa. Es una medida de la fuerza erosiva e intensidad de la precipitación en un año normal, es por ello que el valor numérico usado para R , debe cuantificar el efecto del impacto de la gota de lluvia y también debe proveer una información relativa sobre la cantidad y proporción de escorrentía a ser asociada con la lluvia y sus dimensiones son $[(10^7 J/ha) \cdot (mm/hr.año)]$.

Los datos de investigaciones muestran, que cuando los factores distintos de la lluvia se mantienen constantes, la pérdida de suelo desde un campo cultivado por lluvia es directamente proporcional al parámetro EI , que es producto de la energía por la intensidad de la lluvia. Esta relación es lineal y la suma de los valores de EI de las tormentas para un periodo dado, es una medida numérica del potencial erosivo de la lluvia dentro de ese período.

Factor de Erosionabilidad del Suelo (F_K)

Es el valor de la pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad, para un suelo específico, medida sobre una parcela patrón unitaria (72,6 pies de largo, con una pendiente uniforme del 9 %, con surcos mantenidos limpios y labrados por más de dos años, en el sentido de la pendiente). Esto fue concebido de esta manera con el objetivo de mantener los valores de L , S , C y P iguales a 1.0, de manera de calcular $K = E_s/EI$ y además, porque la mayoría de las mediciones en los EEUU, fueron hechas sobre parcelas de esas dimensiones.

Este parámetro es una propiedad característica del suelo, cuando los demás factores que intervienen en el fenómeno de erosión son iguales, ya que cuando estos no son constantes el comportamiento del suelo puede llevar a confusión. Es decir, suelos con bajo valor de K , pero con signos de erosión bastante considerable o suelos con alto valor de K y muy baja proporción de erosión. Es por ello que este factor debe ser evaluado de manera independiente de los efectos de los demás factores. Las unidades son $[tn.ha.h/ha.MJ.mm]$. Se pueden calcular valores

precisos para una condición dada de suelo usando el nomograma de erosionabilidad del suelo de Wischmeier y Smith (1978).

Factor de Topografía (F_L, F_S)

Por un lado S es la proporción de pérdida de suelo desde un campo con un gradiente de pendiente dado, referido a aquel con el 9 % de pendiente, con las demás condiciones idénticas. Y por el otro, L es la proporción de pérdida de suelo desde un campo con una longitud de la pendiente del terreno dada con respecto a aquel de 72,6 pies de longitud, con las demás condiciones idénticas.

Ambos, la pendiente y la longitud de la pendiente del terreno afectan substancialmente la erosión laminar del suelo. Ambos efectos se pueden evaluar separadamente, pero en las aplicaciones de campo, es más conveniente considerar a los dos juntos como un solo factor de topografía.

Por lo tanto, LS es el valor de la pérdida de suelo por unidad de área desde un campo con pendiente referido a uno de 72,6 de longitud de pendiente, con una inclinación uniforme del 9 %, bajo las demás condiciones idénticas. Este factor puede ser obtenido de la aplicación de la siguiente ecuación:

$$LS = (\lambda/72,6)^m \cdot (65,41 \cdot \text{sen}^2\theta + 4,56 \cdot \text{sen}\theta + 0,065) \quad (7)$$

m : 0,5 si $S < 5\%$; 0,4 si $3,5 < S < 4,5$; 0,3 si $1 < \%S < 3$; 0,2 si $\%S < 1$.

Esta ecuación fue derivada de datos obtenidos de cultivos bajo lluvia, sin riego, pendientes del 3 al 18 % y longitudes de pendientes de 30 a 300 pies. Actualmente existen formulaciones más generales para estimar este factor como la de McCool *et al.*, (1993) (Bolton *et al.*, 1995), en la cual no hay limitaciones para L y S

$$LS = \left[\frac{L}{22,13} \right]^{0,5} (10,8 \cdot \text{sen } \theta + 0,03) \quad (8)$$

para $\theta < 5,143^\circ$ o 9 % de pendiente

$$LS = \left[\frac{L}{22,13} \right]^{0,5} (\text{sen } \theta / \text{sen } 5,143)_{0,6} \quad (9)$$

para $\theta \geq 5,143^\circ$

Factor de Cobertura y Manejo (F_C)

Es la proporción de pérdida de suelo desde un área con un manejo y cobertura específico con respecto a un área idéntica con surcos continuos limpios y labrados. Este factor mide el efecto combinado de todas las interrelaciones de las variables de cobertura y manejo.

Para obtener los valores apropiados de C para una localidad dada, se requiere de información sobre la probabilidad de ocurrencia de la lluvia erosiva, de manera de ser distribuida a través de los 12 meses del año y establecer cuanto controla la erosión, el crecimiento de la plantas, residuos de cultivos y prácticas de manejo de cultivo. Estos, a la vez, determinarán cuando las lluvias erosivas son más probable de ocurrir. Los valores de pérdida de suelo para los distintos estados del cultivo deben ser combinados en proporción a los porcentajes aplicables de E para obtener el valor anual de C para un sistema de cultivo y manejo particular.

Por otra parte, valores de C que son adimensionales y varían entre 0 y 1, pueden ser obtenidos directamente de tablas al efecto para diferentes coberturas y uso de la tierra.

Factor de Práctica de Control (P)

Es la proporción de pérdida de suelo para un área con una práctica de mantenimiento, como curvas de nivel, terrazas, fajas, con respecto a aquella con surcos rectos labrados con alta o baja pendiente.

En general, siempre que un suelo inclinado que está cultivado y expuesto a lluvias erosivas, la protección ofrecida por césped o cultivos de crecimiento cerrado necesita ser controlada por prácticas que reducirán la escorrentía y la cantidad de suelo acarreado. Las más importantes de estas prácticas de control son el labrado en curvas de nivel, cultivo superficial en fajas y las terrazas. Al igual que el factor C , los valores del factor F_P son adimensionales (0-1) y se obtienen de tablas para las diferentes tipo de prácticas de siembra.

Producción de Sedimentos Anual (Psa)

Para obtener la producción de sedimentos se afecta al E_s de un factor de entrega F_E dando el resultado en Ton/ha.año. Este factor de entrega está calibrado en función del área de las zonas estudiadas lo que implica desde ya una condición importante en lo que a su extrapolación se refiere. Los valores de F_E se pueden obtener de la Figura 1

$$Psa = E_s \cdot F_E \quad (10)$$

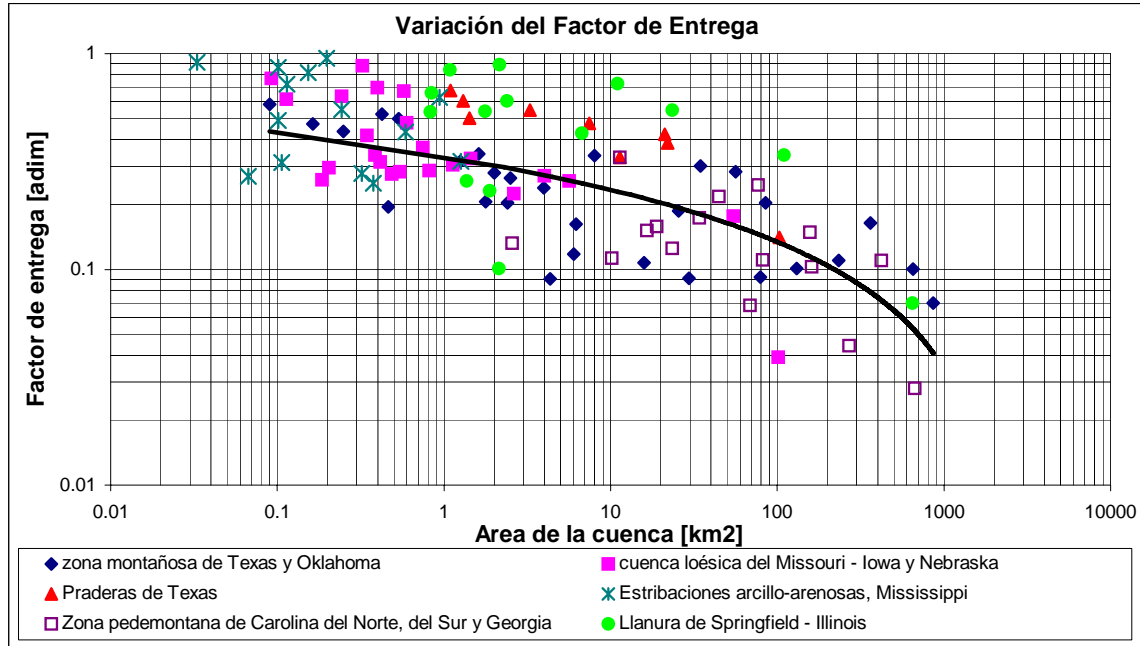


Figura 1. Variación del Factor de Entrega en función del área de la cuenca (Wischmeier y Smith, 1978)

Modelo de Miraki

La metodología propuesta por Miraki (Garde & R. Raju, 1985; p. 263–264) se ha originado como una necesidad de estimar la producción de sedimentos en cuencas para evaluar la posible sedimentación en embalses. Las formulaciones han sido calibradas con datos observados en 32 embalses cuya colmatación progresiva fue monitoreada conjuntamente con las características físicas e hidrológicas de las cuencas que aportaban su esorrentía a los cuerpos de agua. De manera semejante a los demás autores, Miraki presenta una relación funcional general para estimar el volumen total aparente (V_{sa}) en Hm^3 de sólidos producidos por una cuenca en un año de la siguiente manera:

$$V_{sa} = \Psi_{V_a}(A_c, P_a, V_Q, S_c, D_d, F_c) \quad (11)$$

De todos los factores el único cuyos valores están establecidos por el autor son los correspondientes al F_c , el resto son parámetros o variables de definición conocida.

Asimismo, aplicando un análisis de regresión múltiple, Miraki propone las siguientes ecuaciones para la relación funcional en función de los datos disponibles:

$$V_{sa} = 1,182 \times 10^{-6} \cdot A_c^{1,026} \cdot P_a^{1,289} \cdot V_Q^{0,287} \cdot S_c^{0,075} \cdot D_d^{0,398} \cdot F_c^{2,422} \quad (12)$$

$$V_{sa} = 1,067 \times 10^{-6} \cdot A_c^{1,292} \cdot P_a^{1,384} \cdot S_c^{0,129} \cdot D_d^{0,397} \cdot F_c^{2,510} \quad (13)$$

$$V_{sa} = 2,410 \times 10^{-6} \cdot A_c^{1,154} \cdot P_a^{1,071} \cdot S_c^{0,060} \cdot F_c^{1,893} \quad (14)$$

$$V_{sa} = 4,169 \times 10^{-5} \cdot A_c^{0,841} \cdot P_a^{0,139} \cdot V_Q^{0,312} \quad (15)$$

En cuando al comportamiento predictivo de la ecuación anterior, se ha reportado que en más del 85 % de los casos contrastados, 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.

Estas formulaciones fueron concebidas a nivel agregado, por lo que Olmos et al (2003 y 2004) llevaron a cabo una serie de análisis a fin de establecer cual de estas expresiones pueden ser aplicadas de manera distribuida. El resultado de las mismas fue que la fórmula que mejor se adapta para su aplicación en formato distribuido es la de cuatro parámetros (ecuación 14).

AREA DE ESTUDIO

Las cuencas de aporte a los embalses en los que se cuenta con datos históricos de batimetrías, se ubican en la región noroeste de la Argentina. Estos embalses se encuentran insertos dentro de las cuencas altas y medias de los Río

Salí-Dulce (Embalses El Cadillal, Escaba y Río Hondo), Juramento-Salado (Emb. Cabra Corral) y Río Huaco-Los Sauces (Embalse Los Sauces) (Figura 2).



Figura 2. Ubicación geográfica de las cuencas de aporte a embalses en estudio

En lo que se refiere a su ubicación, los embalses El Cadillal y Escaba se localizan en la provincia de Tucumán, sobre los ríos Salí y Marapa, respectivamente. Estos ríos son afluentes del río Dulce, donde se emplaza el embalse de Río Hondo en el límite interprovincial entre las provincias de Tucumán y Santiago del Estero. Las capacidades de almacenamiento son de 300, 140 y 1650 Hm^3 y entraron en funcionamiento en los años 1966, 1950 y 1968 respectivamente.

La cuenca de aporte del río Salí o Dulce, es más húmeda con una pluviometría de aproximadamente 1000 mm anuales y también de régimen estival. El embalse de El Cadillal, de regulación anual, está destinado fundamentalmente al suministro de agua potable para la capital de la provincia de Tucumán y para riego. En cambio, los embalses de Escaba y Río Hondo, se concibieron fundamentalmente para regulación anual con fines de riego. El Cadillal se sitúa en la zona de los cordones subandinos de las cumbres Calchaquíes y la sierra de Medina. En cuanto a Escaba, está dominado por las sierras Pampeanas

constituidas por serranías y planicies interserranas de orientación general norte-sur. Los ríos que nacen en estas sierras corren con rumbo sudeste y desembocan en el Embalse Río Hondo.

Cabra Corral es un embalse de regulación pluri-anual ubicado en la provincia de Salta sobre el río Juramento, nombre que adopta el río Salado en su parte alta. La capacidad original es del orden de los 3100 Hm^3 y funciona desde el año 1972. Las características climáticas ubican a la zona entre las más calurosas, del tipo subtropical. El régimen de lluvias de tipo estival hace que los torrentes de verano produzcan importantes crecidas. La precipitación media anual en la zona del río Juramento es de 600 mm y el embalse tiene como aprovechamientos principales el riego y la energía eléctrica. En lo relativo al relieve, se ubica en la zona de la Cordillera Oriental, caracterizada por valles intermontanos (Valles Calchaquíes, de Lerma y de Siancas), con cordones montañosos N-S de cumbres que superan los 6000 m de altura. En estos valles se localizan las principales zonas agrícolas además de los mayores asentamientos urbanos.

La presa de Los Sauces se encuentra situada sobre el río homónimo, unos 15 Km al Oeste de la ciudad de La Rioja. La misma comenzó a embalsar agua en 1930. A la fecha ha prestado servicios durante más de siete décadas, por lo que ha superado ampliamente su vida útil. La capacidad original del embalse era de 18.6 Hm^3 y en la cuenca de aporte las características hidrometeorológicas predominantes son semi-desérticas. En los sectores montañosos de la cuenca situados por encima de los 3000 m.s.n.m. el clima es "de altura". El régimen pluviométrico del área estudiada es continental subtropical Atlántico, con precipitaciones máximas en verano y mínimas en invierno. El análisis de los valores medios mensuales de los registros disponibles, indica que entre el 80 % y el 90 % de la precipitación anual cae entre los meses de noviembre y marzo. En el primer trimestre (verano) precipita el 55 % del total anual, en el segundo (otoño) el 10 %, en el tercero (invierno) el 4 % y en el cuarto (primavera) el 31 %.

APLICACIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS

Para la aplicación de los modelos se procedió a la generación de las variables en formato ráster que por sus características pueden estar distribuidas espacialmente, utilizándose para ello los programas AutoCAD, ArcView e IDRISI. Por una cuestión de espacio a continuación sólo se presentan las variables básicas a partir de las

cuales se obtienen aquellas que forman parte de la concepción matemática del fenómeno en estudio para la cuenca del embalse de Río Hondo, la cual incluye además a la de Escaba y el Cadillal.

Generación de mapas bases

Precipitación media anual

Se obtuvo a partir del mapa de isoyetas del Atlas Climático del NOA, digitalizadas y rasterizadas, a partir de las cuales se generó el modelo digital de la variable (Figura 3).

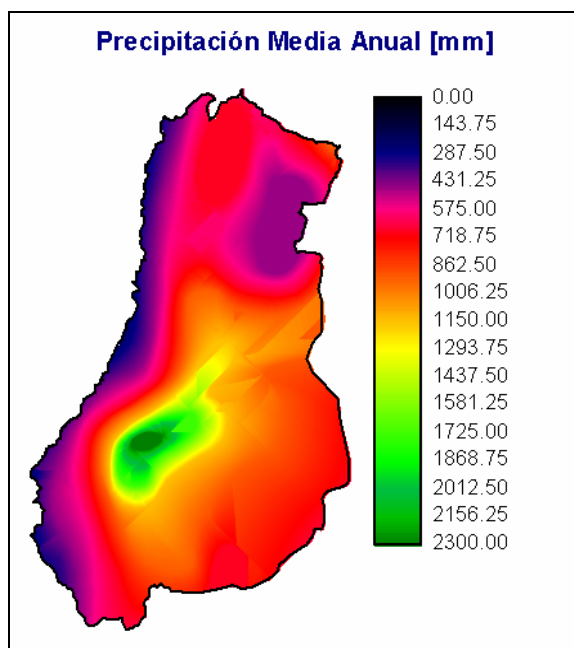


Figura 3. Precipitación media anual

Como la información disponible torna imposible el cálculo del factor F_R de acuerdo a su concepción original, el mismo se estimó en base a fórmulas empíricas que correlacionan este factor con una variable más fácil de disponer como lo es la precipitación media anual.

La expresión utilizada y que fue calibrada para la zona de Filipinas e Indonesia está basada en las investigaciones llevada a cabo por Bols (1978), (Bolton *et al.*, 1995). La fórmula tiene la siguiente forma:

$$F_R = \frac{2,5 * P_a^2}{0,073 * P_a + 0,73} \quad (16)$$

Pendiente

De manera semejante al caso anterior se digitalizaron las curvas de nivel, que en este caso

eran cada 100 metros, y se trabajó con herramientas GIS a fin de obtener el modelo de elevación del terreno. A partir de esta imagen se aplicó un módulo específico de IDRISI, para obtener la distribución espacial de la pendiente en la cuenca. Esta imagen es utilizada directamente en los modelos de Gavrilovic y Miraki y para el cálculo de Factor topográfico LS en la USLE (Figura 4).

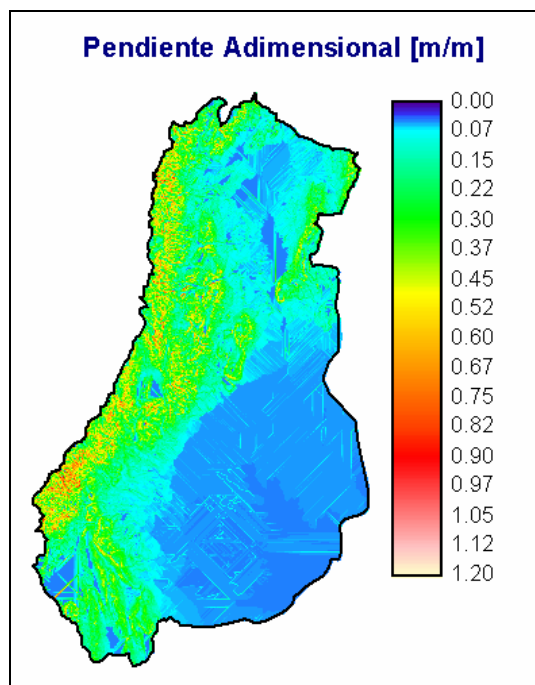


Figura 4. Pendiente generada con DTM

Cobertura, uso y tipo de suelo

Se definieron las imágenes base de la cobertura y del uso del suelo por un lado, y la del tipo de suelo por el otro. En función de las tabulaciones definidas para cada modelo, se estimaron los correspondientes factores de cobertura los que en algunos casos difieren a pesar de tratarse de la misma cobertura debido a la concepción matemática del modelo. Con respecto al factor de erodabilidad del suelo (USLE) o resistencia a la erosión (Gavrilovic) los mismos se estimaron mediante tablas de acuerdo a la estructura y composición estratigráfica del suelo superficial. Se generó una cobertura temática mediante el uso de polígonos para definir las zonas homogéneas. Luego a esto se asignaron los valores respectivos de F_c y F_k . Los mapas base para la determinación de estos parámetros se presentan en las Figuras 5 y 6, y algunos valores representativos del factor de cobertura y uso utilizados se indican en la Tabla 1.

Uso del Suelo	Factor F_c	Factor $F_{c\ USLE}$	Factor X
Embalses, lagunas y bañados	0,00	0,00	0,00
Bosques protegidos reservas	0,20	0,01	0,20
Bosques nativos	0,40	0,10	0,30
Áreas agrícolas	0,60	0,60	0,65
Arbustos	0,65	0,10	0,6
Pastizales	0,80	0,20	0,5
Suelos denudados	1,00	1,00	1,00

Tabla 1. Factor de Cobertura y Uso del Suelo

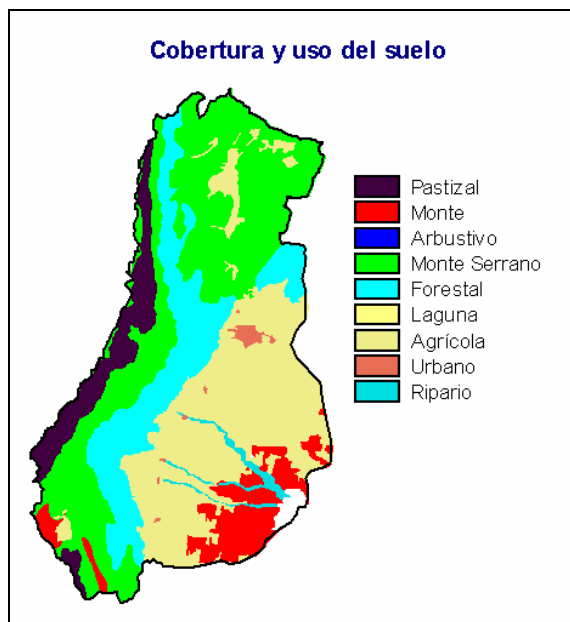


Figura 5. Cobertura y uso del suelo

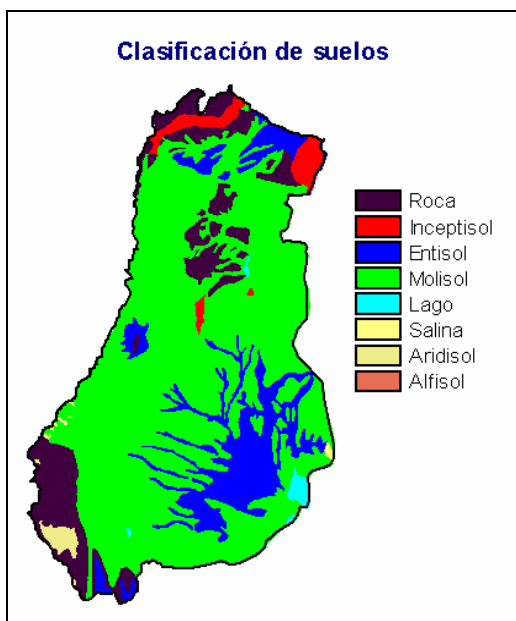


Figura 6. Clasificación de suelos

A manera de ejemplo se muestran las imágenes del modelo de elevación del terreno y del factor asociado a la cobertura y uso del suelo en las Figuras 7 y 8, a partir de las cuales se pueden evaluar y determinar mediante técnicas de análisis espacial asociadas a programas para GIS los valores promedios de las variables. En la Tabla 2 se muestran las variables involucradas en el modelo de Miraki para cada cuenca analizadas.

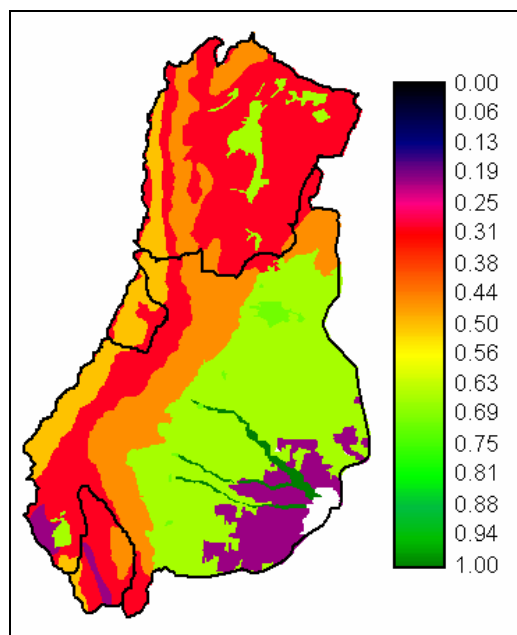


Figura 7. Factor de Cobertura y uso F_C (Cadillal, Escaba y Río Hondo)

Aplicación de los modelos

Una vez obtenidas las imágenes de entrada de cada modelo, se aplicaron las formulaciones correspondientes con las acotaciones siguientes:

- Las formulaciones de Gavrilovic y USLE calculan primero la producción de sedimentos potencial a la cual hay que afectar-la necesariamente de un factor de entrega

Cuencas de Aporte a embalse	Precipitación media anual [mm]	Pendiente media [m/m]	Area de la Cuenca [Km ²]	Factor de Cobertura [adimensional]
Los Sauces	113	0.18	1118.00	0.57
De Escaba	633	0.16	785.00	0.33
El Cadillal	590	0.14	5427.00	0.36
Río Hondo	922	0.08	13157.00	0.50
Cabra Corral	293	0.19	32614.00	0.55

Tabla 2. Comparación de resultados de la red propuesta

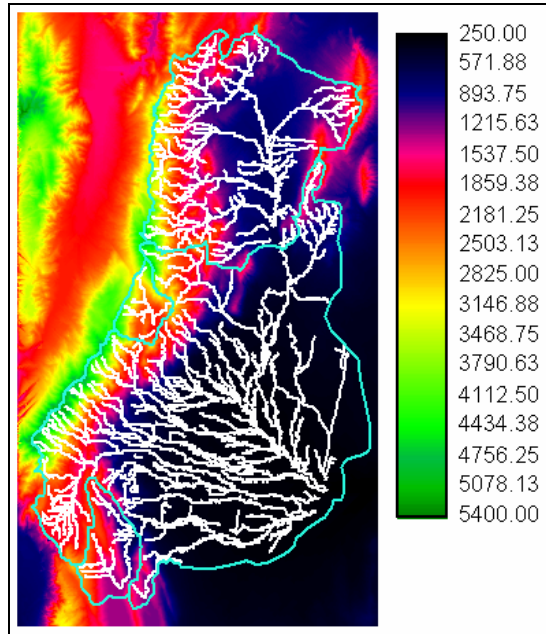


Figura 8. DEM de cuencas de aporte Río Hondo, Cadillal y Escaba

para determinar la producción de sedimentos real. Dicho factor es un parámetro concentrado, definiendo por ende dicha producción a la salida de la cuenca, no pudiéndose visualizar como se redeposita el sedimento en las zonas planas.

- Dicho factor está definido de una manera más racional en el caso de Gavrilovic que en el caso de la USLE donde se lo correlaciona con el área de la cuenca, presentado limitaciones en cuencas de gran superficie ($> 2500 \text{ km}^2$).
- Al aplicar de manera distribuida la formulación de Miraki, existen un cambio de magnitud de la variable área. Esto es debido que en su formulación original la variable hace referencia a la cuenca, mientras que en su aplicación en formato distribuido el área es del píxel adoptado ($100 \text{ m} \times 100 \text{ m} = 0,01 \text{ Km}^2$).

En consecuencia como los valores de producción de sedimento a nivel distribuido por píxel son bajos en la unidad establecida ($\text{Hm}^3/\text{año}$), el modelo es aplicado con un factor multiplicador de 100. Al final del cálculo, la sumatoria total de producción de sedimentos de cada píxel es dividido por dicho factor.

- Como la validación de estos modelos se lleva a cabo con datos de relevamientos batimétricos de embalses, se debe tener en cuenta la variación temporal del peso específico (o volumen) del sedimento retenido. En este caso se utilizó la fórmula de Lane y Koelzer (Aguirre Pe, 1988) expresada como:

$$Y_m = Y_1 + B \left(\frac{T}{T-1} \cdot \log T - 0,434 \right) \quad (17)$$

Análisis de resultados

Los resultados de la aplicación de las diferentes metodologías son indicados en la Tabla 3, cuyos valores se visualizan mejor en la Figura 9. En cuanto al modelo de la USLE se aprecia que tiene un buen comportamiento para cuencas cuyas áreas están comprendidas dentro del gráfico de ajuste del factor de entrega. En los otros casos (Río Hondo y Cabra Corral), los valores obtenidos son sensiblemente menores a los medidos. Por otro lado, los métodos de Gavrilovic y Miraki tienen un comportamiento más estable para todo el rango de superficies de las cuencas analizadas. Haciendo una comparación entre los métodos y los valores medidos, se aprecia que para cuencas con superficies menores a 2500 km^2 los tres métodos están dentro de los errores admisibles en hidráulica fluvial (-43% y $+17\%$). Con respecto a las cuencas de mayor magnitud los modelos de Gavrilovic y Miraki tienen un comportamiento similar con valores menores a los medidos que van desde el 15 al 52 %, lo que se muestra en la Tabla 4.

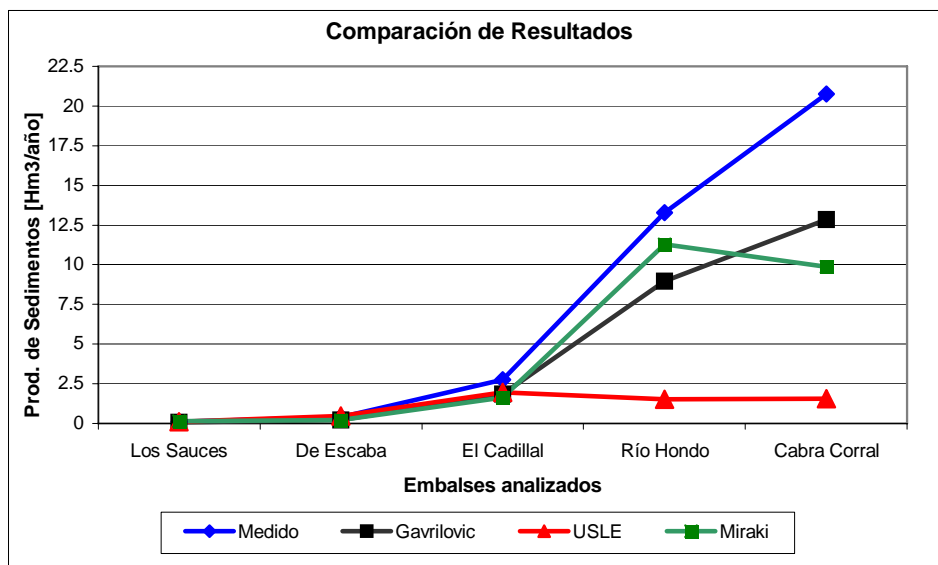


Figura 9. Valores resultantes de la aplicación de los modelos versus los medidos

Embalse	Medido	Gavrilovic	USLE	Miraki
Los Sauces	0.113	0.080	0.103	0.132
De Escaba	0.388	0.225	0.462	0.220
El Cadillal	2.751	1.835	1.950	1.630
Río Hondo	13.286	8.950	1.523	11.280
Cabra Corral	20.741	12.835	1.547	9.870

Tabla 3. Valores de la Producción de Sedimentos Medidos y Calculados

Embalse	Gavrilovic Medido	Miraki (D-3) Medido	USLE Medido
Los Sauces	0.713	1.173	0.911
De Escaba	0.580	0.567	1.191
El Cadillal	0.667	0.593	0.721
Río Hondo	0.674	0.849	0.115
Cabra Corral	0.619	0.476	0.0746

Tabla 4. Producción de sedimentos calculado/medido

En general, se produce una subestimación de los valores de la producción de sedimentos, por lo que la misma puede ser ratificada o rectificada según el siguiente análisis. Por un lado puede ser ratificada si se tiene en cuenta que estas fórmulas estiman la cantidad de material producido sólo por lluvia y escorrentía superficial, y no incluye otros procesos de generación como ser deslizamientos, transporte de sedimentos en cauces, etc.

Por otro lado, puede ser rectificada en cuanto a reducir el error de subestimación si se analiza en profundidad la variación temporal de las dos variables más sensibles de los modelos analizados como lo son la precipitación media anual y el factor de cobertura y resistencia a la erosión

del suelo, cuya información es recolectada de los antecedentes disponibles y se trata de coincidir con el período correspondiente a los relevamientos batimétricos.

En las Figura 10, 11 y 12 se presentan las distribuciones espaciales de la producción de sedimentos y la erosión potencial para los métodos de Miraki y USLE y Gavrilovic respectivamente. La diferencia radica en el hecho de que la erosión potencial es afectada de un factor de entrega que es un parámetro concentrado que se aplica en la salida de la cuenca.

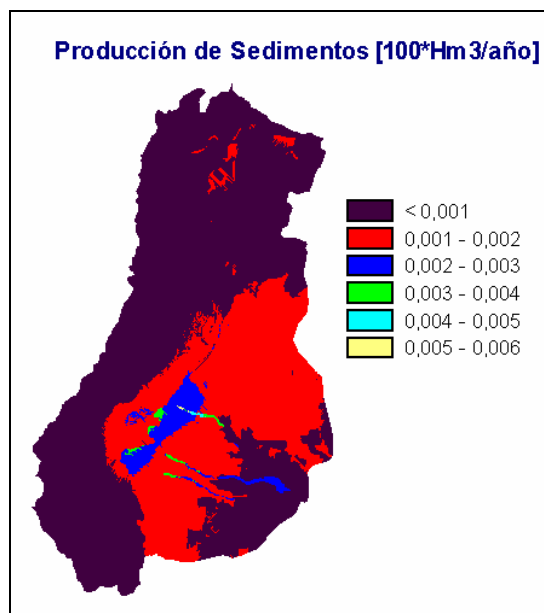


Figura 10. Producción de Sedimentos por Miraki

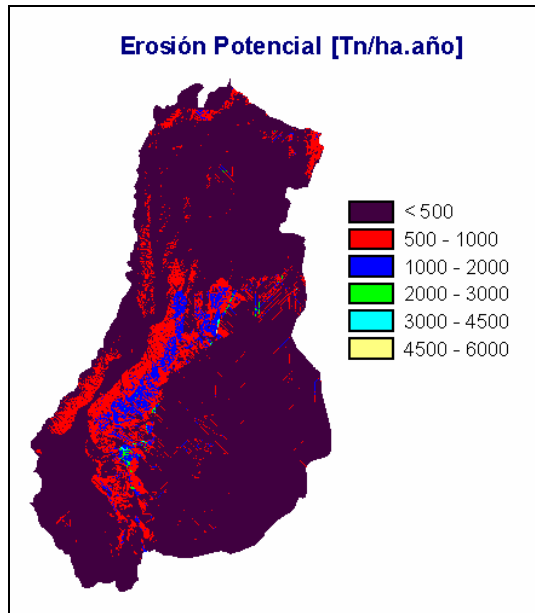


Figura 11. Erosión potencial por USLE

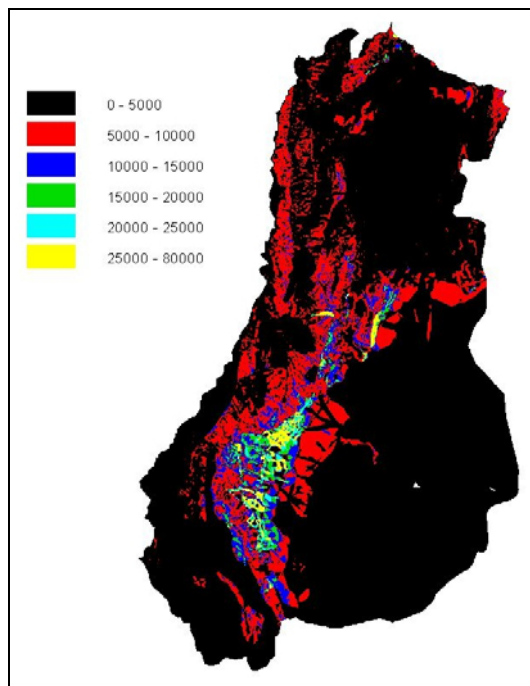


Figura 12. Erosión potencial por Gavrilovic
[m³/km².año]

Por el lado del valor calculado para Cabral Corral, se puede observar que es el más bajo, lo que se puede deber a que para el período de medición ha ocurrido una variación importante del uso del suelo favoreciendo su degradación o los fenómenos de transporte de sedimentos en cauces son tan importantes que los modelos aplicados no pueden englobarlos y requieren de un

análisis independiente.

En el caso del embalse Los Sauces, la sobreestimación se debe a que el volumen de escorrentía es bajo, ya que según datos antes consignados, el rendimiento de la cuenca del río de La Rioja en la sección en donde se ubica la presa de Los Sauces, es de aproximadamente 0.564 m³/seg. ó 17.8 Hm³/año, valor que comparado con el volumen medio anual precipitado sobre la misma (309 Hm³/año), permite inferir que el coeficiente de derrame total de la cuenca es del orden de 0.058 (5.8 %). Se calcula que aproximadamente el 87 % de los ingresos totales de agua al embalse provienen de aportes subterráneos (descarga del acuífero del valle de Sanagasta) y sólo el 13 % restante procede de derrames eventuales de crecientes procedentes del río de Los Sauces y de las quebradas de Chilecito y del Alumbre.

CONCLUSIONES

La revisión conceptual y la metodología de cálculo llevada a cabo en función de los objetivos previstos, dieron una serie de resultados que permiten establecer las siguientes conclusiones:

- Los métodos de Gavrilovic y Miraki tienen una mayor generalidad de aplicación para el rango de cuencas analizadas, subestimando los valores simulados, lo que puede deberse a una información no actualizada de las variables precipitación y cobertura del suelo para el período de mediciones.
- El método de la USLE confirma su validez con respecto a la aplicación en cuencas con superficies menores a 2.500 Km².
- El modelo de Miraki es una metodología empírica conceptualmente semejante a las otras aplicadas, pero tiene la ventaja de ser completamente distribuida y los parámetros requeridos son de fácil generación sobre todo en lugares donde los datos disponibles son escasos.
- La posibilidad de implementación de los modelos en forma distribuida mediante técnicas GIS permite visualizar mejor el fenómeno en estudio, plantear diferentes escenarios virtuales y adoptar medidas preventivas y/o correctivas eficientes.
- Los modelos USLE y Gavrilovic tienen el inconveniente de no poder visualizar directamente la producción de sedimentos a nivel de pixel, sino que la erosión potencial. A la misma se le aplica el factor de entrega

a la salida de la cuenca y no puede distinguirse que cantidad de suelo se redeposita en cada píxel en las zonas planas.

- En el caso de evaluar la producción de sedimentos en lugares donde no se dispone de datos medidos, es recomendable, si la información está disponible, realizar al menos la predicción con dos de las metodologías revisadas, siempre y cuando las superficies de las cuencas sean admisibles.

LISTA DE SIMBOLOS

A_c : área de la cuenca (Km^2)
 B : factor de compactación según el tipo de sedimento [kg/m^3]
 D : altura media de la cuenca
 D_d : densidad de drenaje de la cuenca (Km^{-1})
 F : superficie de la cuenca (km^2)
 F_C : factor de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca
 F_K : factor de estabilidad o erodabilidad del suelo
 F_L : factor de longitud del flujo superficial
 F_P : factor de prácticas de conservación
 F_R : factor de precipitación pluvial.
 F_S : factor de pendiente de la cuenca
 h : precipitación media anual ($mm/año$)
 I : gradiente de la pendiente superficial (en %)
 L : longitud del cauce principal
 Li = longitud total de la red de drenaje
 O = perímetro de la cuenca
 P_a : precipitación media anual (cm)
 S_c : pendiente media de la cuenca (adimensional)
 T : tiempo [años]
 T = coeficiente de temperatura, que se obtiene de:
 t = temperatura promedio anual
 V_Q : derrame medio anual (Hm^3)
 W = volumen promedio anual erosionado de sedimento ($m^3/año$)
 X = coeficiente de uso del suelo
 Y = coeficiente de resistencia del suelo a la erosión
 Y_m : peso específico promedio [kg/m^3]
 Y_m : peso específico inicial [kg/m^3]
 Z = coeficiente de erosión, cuya expresión es:
 φ = coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados
 λ : longitud de la pendiente en pies
 θ : ángulo de la pendiente

REFERENCIAS

Aguirre Pe, J., (1988). Hidráulica de Sedimentos. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Bolton P., Bradbury P.A., Lawrence P. y Atkinson E., (1995). CALSITE V-3.1 - User Manual. HR Wallingford Ltd., Wallingford, United Kingdom.

Clarke, C. y Waldo, P., (1986). Sediment Yield from Small and Medium Watersheds. Proceedings of the Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference, Vol. I, USA.

Emmanouloudis, D., y Filippidis, E., (2000). A quantitative estimation model of mountainous watersheds degradation. Technological University of Kavala, special edition, Greece.

Fernández, R., Dasso C. y López F., (1998). Evaluación de Metodologías para la Estimación de la Erosión Hídrica Superficial en Cuencas Hídricas de la República Argentina. Anales XVII Congreso Nacional de Agua, Santa Fe, Argentina.

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

Olmos, L. y Jegat, H., (2001). Análisis de la erosión hídrica mediante un modelo distribuido (CALSITE) y un modelo agregado (SWRRB). Aplicación a la cuenca del río Grande (Venezuela), Ingeniería del Agua, 8(1), Valencia, España.

Olmos, L., Borsellino, M.J., Mattar, M.T., Pilán, M.T. y Farias H.D., (2003). Estimación de la Tasa de Producción de Sedimentos en la Cuenca del Río Horcones (Prov. de Salta y Santiago del Estero). Nuevas Tendencias en Hidráulica de Rios, J.D. Brea & H.D. Farias (eds.), Buenos Aires, Argentina.

Olmos, L.A., Spalletti, P., Farias, H.D. y Pilán, M.T., (2004) Estudio y verificación del modelo de producción de sedimentos en cuencas de Miraki a escala distribuida. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Paulo, Brasil, Octubre.

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

Wischmeier, W. y Smith, D., (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. USDA & Agricultural Research Service, Agriculture Handbook No.282, USA.