

ANÁLISIS DE LA EROSIÓN HÍDRICA MEDIANTE UN MODELO DISTRIBUIDO (CALSITE) Y UN MODELO AGREGADO (SWRRB)

Aplicación a la Cuenca del Río Grande (Venezuela)

Luis A. Olmos¹ y Hervé Jégat²

Resumen:

El presente trabajo se refiere a la aplicación de los modelos de simulación de erosión laminar y producción de sedimentos. Los modelos que se emplean son el SWRRB (Simulation of Water Resources in Rural Basins) y el CALSITE (Calibrated Simulation of Transported Erosion), que son los modelos agregado y distribuido respectivamente, y los mismos se aplican a la cuenca del río Grande (Estado Miranda, Venezuela). Para la obtención de los distintos parámetros y variables que intervienen se aplican tecnologías nuevas, como los Sistemas de Información Geográfica y las técnicas geoestadísticas.

Los respectivos modelos se operan y calibran de acuerdo a las mediciones de campo, de manera de proceder al análisis y comparación de los resultados obtenidos. Esto permite establecer sus potencialidades y limitaciones, en lo concerniente a la utilización de los mismos, así como lo referente al proceso de simulación propiamente dicho.

Para finalizar, se enuncian una serie de conclusiones de acuerdo a los objetivos previstos y se dan unas recomendaciones orientadas a las condiciones que se deben tener en cuenta para una aplicación eficiente de los modelos agregados y distribuidos.

Palabras clave: Sedimentos, Calidad del agua, Modelos hidrológicos, Sistema de información geográfica.

INTRODUCCIÓN

La planificación científica para la conservación del agua y del suelo requiere del conocimiento de las relaciones entre aquellos factores que causan las pérdidas del suelo y aquellos que ayudan a reducirlas. Estas pérdidas, además de la acción directa de la precipitación y su consecuente escorrentía, pueden ser agravadas, por lo general, por la acción antrópica, a través de las explotaciones forestales desordenadas, de las obras civiles, de la explotación minera descontrolada y de las actividades agrícolas sin criterio conservacionista.

Los límites de pérdida de suelo y producción de sedimentos son algunas veces establecidos principalmente para el control de la calidad de las aguas, ya que una excesiva cantidad de sedimentos

puede afectar sensiblemente el funcionamiento de obras de captación, presas de embalse y regulación, centrales hidroeléctricas, obras de arte en sistemas de riego, plantas de tratamiento de agua potable, etc.

Además, la degradación del medio ambiente, en términos de erosión, puede ser calificada y al mismo tiempo cuantificada, conociéndose temporalmente la evolución de las cantidades y las características de los sólidos finos (arcilla, limos y arenas finas) transportados por la red de drenaje fluvial hacia la salida de la cuenca.

Por ello, es necesario el establecimiento de medidas de control o la toma de decisiones. Para llevar a cabo esto, se necesita disponer de información de la situación actual, como así también de si-

1. Ing. Hidráulico, Instituto de Recursos Hídricos, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Belgrano (S) 1912 - Fax: 0054385-4222595, CP:4200 - Santiago del Estero - Argentina, e-mail: lolmos@unse.edu.ar - tpilan@teletel.com.ar

2. Dr. Ing. Hidráulico, Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de los Andes - Pque. La Isla - Edificio CIDIAT, Fax: 005874-441461 - Apdo. 219 - Mérida, Venezuela., e-mail: hjegat@cidiat.ing.ula.ve

Artículo recibido el 14 de junio de 1999, recibido en forma rebisada el 4 de octubre de 1999 y aceptado para su publicación el 19 de noviembre de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

tuciones posibles generadas por las diferentes alternativas simuladas. Es así, que los modelos de simulación, con el avance de la informática, juegan hoy en día un papel muy importante en la planificación y toma de decisiones. Dentro de los modelos más difundidos universalmente y que pueden ser aplicados a nivel de cuencas rurales, se pueden citar aquellos basados en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y su modificación MUSLE, quienes permiten estimar la producción de sedimentos anuales promedio y establecer medidas que limiten su cantidad.

Estos modelos matemáticos están presentes en los modelos de simulación que se emplean. Por un lado se tiene el modelo de simulación distribuido CALSITE que hace uso de la USLE. Este se caracteriza porque los valores de las variables se distribuyen espacialmente de forma puntual por unidad de área que es el pixel. Por otro lado, el modelo de simulación agregado SWRRB que emplea la MUSLE, el cual se caracteriza porque los datos de la variables son de tipo uniforme o se asume un valor promedio, dentro de zonas o áreas de la cuenca, que se discretizan de acuerdo a criterios de cálculo.

Tomando como base el enfoque anterior, surge la necesidad de investigar las capacidades de los modelos de simulación. En este trabajo se usan el SWRRB (Simulation of Water Resources in Rural Basins) que es de los clásicos o agregados y el CALSITE (Calibrated Simulator of Transported Erosion) que es el distribuido, que se aplican a una cuenca particular. De allí, surge el objetivo fundamental que es evaluar el funcionamiento de un modelo de simulación de erosión laminar y producción de sedimentos distribuido (CALSITE) y compararlo con un agregado (SWRRB). Para llevar cabo esto se evalúa el fenómeno en la cuenca del río Grande (estado Miranda, Venezuela), el cual es un afluente del sistema hídrico del río Tuy que desemboca en el mar Caribe.

Modelo de Simulación y Calibración CALSITE

CAL SITE 3.10 es un software creado por HR Wallingford Ltd. y está basado en operaciones de Sistemas de Información Geográfica para ser usado en la simulación y calibración de la erosión y transporte de sedimentos, desarrollado por Bolton, Bradbury, Lawrence y Atkinson (1995). Es creado como una herramienta de planificación de cuencas para ser usado en países en vías de desarrollo, en donde

es probable que los datos sean escasos o falten, por lo que el paquete ha sido desarrollado usando relaciones semiempíricas. El programa hace uso de un software de gestión de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de bajo costo, IDRISI, para la preparación y el procesamiento de las imágenes de entrada, así como también para la visualización de los resultados. CAL SITE requiere el uso de datos espaciales en un formato raster o grilla y los procesos de cálculo son tres : 1) Determinación de la erosión de suelos. 2) Cálculo del índice de entrega, calibración y determinación del factor de entrega. 3) Determinación de la producción de sedimentos.

Determinación de la Erosión de los Suelos

El programa hace uso de la USLE de Wischmeier y Smith (1978) para el cálculo sobre cada celda o pixel y cuya expresión es:

$$SE = R.K.CP.LS \quad (1)$$

Los mapas digitales de cada uno de los cuatro factores, así como todos los parámetros y variables que intervienen en las etapas de cálculo, son producidos a partir de mapas digitalizados o por procesamiento de datos existentes, ya sea usando IDRISI u otro paquete para SIG, ya que la mayoría de las imágenes de entrada son producidas independientemente, respetando los formatos requeridos por CAL SITE.

Cálculo de LS

Es importante acotar que este parámetro se calcula usando las ecuaciones de Mc Cool et al (1993), citado por Bolton et al (1995), en función de L, longitud de la pendiente, y θ , pendiente en grados.

$$LS = \left[\frac{L}{22,13} \right]^{0,5} (10,8 \operatorname{sen} \theta + 0,03) \quad (2)$$

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

$$LS = \left[\frac{L}{22,13} \right]^{0,5} (10,8 \operatorname{sen} \theta + 0,03) \quad (3)$$

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

Antes de calcular LS, el programa tiene la posibilidad de usar una L constante o variable. El caso de utilizar una L variable es una de las potencialidades más notables. El método se basa en el tamaño del área contribuyente que está definida por

F. Así, un valor de 50 indica que el tamaño del área contribuyente es de 50 pixeles. Al asumir una forma uniforme del área contribuyente, se puede estimar la longitud del área contribuyente como la longitud del pixel contribuyente más lejano al pixel bajo estudio. La fórmula para el cálculo de la longitud de pendiente es :

$$L = (FXY / \pi)^{0,5} \quad (4)$$

Cálculo del Índice de Entrega, Calibración y Determinación del Factor de Entrega

Aunque los procesos físicos durante el tránsito del flujo superficial son complejos, en CALSITE son tratados de una manera simple. El término índice de entrega es usado para referirse a un valor arbitrario desde 0 a 255. Es un estimado de la capacidad de transporte límite desde el punto en cuestión aguas abajo siguiendo el camino de flujo y está relacionado con el factor de entrega (DR). Se lo determina para cada pixel como una parte del procedimiento de calibración.

El cálculo del índice se basa en consideraciones teóricas de la capacidad de transporte del flujo, apoyado en los resultados empíricos de Govers (1990), citado por Bolton et al (1995).

El índice de entrega (DI) está definido como la relación entre la concentración límite y la concentración en la fuente. Si en un cierto pixel la concentración limitante excede la concentración de la fuente, entonces todo el material erosionado será transportado al cauce y el DR para el pixel será la unidad. El valor de DI para este caso será alto. Por otro lado, cuando DI es bajo, la concentración de la fuente excede la concentración límite, por lo que ésta determina la cantidad de material que pasa al cauce. En este ultimo caso el DR es proporcional a DI.

La ecuación usada para determinar el índice de entrega está definida por :

$$DI = \frac{P_a^{2,3} \min[F^{0,6} S^{1,4}]}{SE} \quad (5)$$

Este factor representa la proporción de suelo erosionado que alcanza una salida. Así, un valor del índice de 0,5 significa que solamente el 50 % del suelo erosionado desde el pixel alcanza un embalse, reservorio u otro destino o salida. El resto es redepositado a lo largo del camino del flujo.

La calibración de la producción de sedimentos está basada en la ecuación :

$$SY = SE \cdot DR \quad (6)$$

La rutina de calibración manipula los valores de DR sobre el área de estudio hasta obtener un buen ajuste entre los valores de producción de sedimentos observados y predecidos. El índice de entrega es calculado y convertido a valores de DR por el proceso de calibración.

Secuencia de las Operaciones

El proceso de calibración involucra un número de ecuaciones de manera de aplicar la curva básica y tomar en cuenta la escala logarítmica de DI. El valor de DR para DI en 100 es repetidamente fijado en valores variando de 0 a 1 en etapas de 0,01. El valor de DR en DI=100, conocido como el crítico (DRc), que da la mejor correspondencia entre producción de sedimentos observados y predecidos, se usa para determinar la función de entrega final que convierte los DI en DR. Las etapas de la calibración son :

1) Elige un valor de DR para un valor de DI(byte) de 100, llamado DRc.

2) Encuentra el valor de X de referencia, Xc, desde DRc usando la ecuación

$$Xc = DRc/26 \quad \text{si } DRc < 0,0822 \quad (7)$$

$$Xc = 10^{(DRc-0,5822)/0,2} \quad \text{si } DRc \geq 0,0822 \quad (8)$$

3) Encuentra el valor de DI real para el DI byte de 100 usando la ecuación :

$$DI_{R10} = 10^{(10 - Offs)/Scal} \quad (9)$$

$$\text{Scale} = \frac{255}{DI_{Rma} - DI_{Rmi}} \quad (10)$$

$$\text{Offset} = -\text{Scale} \cdot DI_{Rmi} \quad (11)$$

4) Para valores de DI byte variables de 0 a 255 calcula X y luego el DR:

$$X = 10^{(D_{Byte} - Offs)/Scal} \frac{Xc}{DI_{R10}} \quad (12)$$

$$DR = 26 \cdot X \quad \text{si } X < 0,00316 \quad (13)$$

$$DR = 0,2 \cdot \log X + 0,5822 \quad (14)$$

$$\text{si } 0,00316 < X < 122,7$$

$$DR = 1,0 \quad \text{si } X > 122,7 \quad (15)$$

- 5) Mide la varianza entre los valores observados y los predecidos de prod. de sedimentos
- 6) Repite las etapas 1 a 5 para diferentes valores de DRc, y graba el que dà mejor ajuste.
- 7) Graba la función de entrega que da el mejor ajuste en un archivo de salida .lut.

Determinación de la Producción de Sedimentos

En esta etapa simplemente aplica la ecuación (6) para obtener la producción de sedimentos promedio para la cuenca en Tn/ha.año. Lo que hace es multiplicar las imágenes obtenidas de erosión de los suelos y la del factor de entrega. La imagen resultante se puede procesar mediante el software IDRISI de manera de obtener el valor promedio y la carga total de sedimentos.

MODELO DE SIMULACIÓN SWRRB

Los conceptos desarrollados sobre el modelo se extraen del manual del usuario desarrollado por Arnold y Williams (1994). SWRRB (Simulation of Water Resources in Rural Basins) incluye cinco componentes fundamentales : hidrología, clima, sedimentación, nutrientes y pesticidas. La producción de sedimentos está basada en la ecuación universal de pérdida de suelo modificada (MUSLE).

El modelo SWRRB opera sobre un intervalo de tiempo diario y el clima diario puede ser ingresado o generado. SWRRB no está limitado por el área de drenaje, aunque sus autores validaron el modelo en cuencas de hasta 500 km². Las subcuenca pueden estar divididas para tener en cuenta las diferencias en los suelos, uso de la tierra, cultivos, topografía, lluvia y temperatura. SWRRB puede manejar un máximo de 10 subcuenca.

Hidrología

El modelo hidrológico se basa en la ecuación de balance de agua.

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (PR_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (16)$$

En el cálculo de P (percolación) se utiliza una técnica de tránsito en embalses, combinado con un modelo que predice el flujo a través de diferentes horizontes de la zona radicular y el QR (flujo sub-superficial lateral) se define simultáneamente con la percolación.

Como el modelo mantiene un balance de agua continuo, las cuencas complejas se dividen en subcuenca o subáreas para así reflejar las diferencias en la evapotranspiración en varios tipos de cultivos y terrenos. Por eso, para cada subárea se predice la escorrentía y luego se transita aguas abajo para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto incrementa la precisión y da una mejor descripción física del balance del agua.

Producción de Sedimentos

La producción de sedimentos se calcula para cada subcuenca con la ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE) de Williams y Berndt (1977), citado por Barrios A. ,1995.

$$Y_s = 11,8 \cdot (Vq_p)^{0,56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot PE \quad (17)$$

El factor LS se calcula con la ecuación de Wischmeier y Smith (1978):

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^{\varepsilon} \cdot (65,41S^2 + 4,565 \cdot S + 0,065) \quad (18)$$

El exponente ε es calculado en el modelo mediante la expresión :

$$\varepsilon = 0,6 [1 - \exp(-35,835 S)] \quad (19)$$

El factor manejo y cultivo C, se evalúa todos los días que se produce escorrentía por:

$$LS = \left[\frac{L}{22,13} \right]^{0,5} (10,8 \sin \theta + 0,03) \quad (20)$$

Tránsito de sedimentos en cauce

El modelo de tránsito de sedimentos, en el cauce, consiste de dos componentes que operan simultáneamente: deposición y degradación. El primero basado en la velocidad de deposición de una partícula y el segundo en el concepto de la potencia de un cauce, Bagnold (1977), citado por Barrios A., (1995).

El modelo estima una distribución del tamaño de las partículas de sedimento, una vez desprendidas del suelo, a partir de valores típicos de las fracciones primarias de suelo. A través de una técnica de coeficiente de tránsito, se determina la distribución de partículas para el sedimento que sale de la subcuenca.

La deposición en el tramo del cauce, DEP, desde la salida de la subcuenca hasta la salida de la cuenca total, se calcula en base a la velocidad con

ANALISIS DE LA EROSION HIDRICA MEDIANTE UN MODELO DISTRIBUIDO (CALSITE) Y UN MODELO AGREGADO (SWRRB)

que sedimenta cada partícula, según la Ley de Stokes, y el tiempo de viaje que debe recorrer el flujo.

$$V_f = 411 d^2 \quad (21a)$$

$$Y_f = V_f T \quad (21b)$$

Para el cálculo de DEP, usa otro parámetro basado en Y_f y en la profundidad del flujo d_q que es el factor de entrega DR :

$$DR = \frac{1 - 0,5 Y_f}{d_q} \quad \text{si } Y_f < d_q \quad (22)$$

$$DR = \frac{0,5 d_q}{Y_f} \quad (23)$$

$$DEP = SEDi(1 - DR) \quad (24)$$

La potencia del cauce, es el concepto usado para calcular el poder degradante del flujo, DEG_R .

$$DEG_R = \alpha_{SP} \cdot \gamma^{1,5} \cdot \text{dur.w.} (d_q S_w V_c)^{1,5} \quad (25)$$

Toda la potencia del cauce se usa para la recaptura de material depositado, hasta que todo se haya agotado. Cuando esto ocurre, comienza la degradación del material del lecho, DEG_B , que se calcula por la siguiente expresión:

$$DEG_B = K.C.DEG_R \quad (26)$$

La cantidad de sedimento que pasa por la salida de la cuenca total, $SEDs$, es:

$$SEDs = SEDi - DEP + ((DEG_R + DEG_B) \cdot (1 - DR)) \quad (27)$$

DESCRIPCION GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Grande se halla ubicada íntegramente dentro del estado Miranda, el cual está situado en la zona Centro-Norte de Venezuela y está comprendido entre los meridianos $65^{\circ}26'$ y $67^{\circ}13'$ de longitud Oeste y entre los paralelos $9^{\circ}56'$ y $10^{\circ}39'$ de latitud Norte.

La superficie cubierta por la cuenca es de aproximadamente 785 Km^2 y constituye uno de los afluentes más importantes del sistema hidrográfico del río Tuy, el cual pertenece a las hoyas de las vertientes del mar Caribe. En la Figura 1 se aprecia un croquis de ubicación de la cuenca.

La cuenca presenta un escalonamiento en sus

tierras, definido por los semiplanos del valle de Caracas (zona oriental) y de los valles del Tuy y la magnifica planicie o llanada de Barlovento, a lo que se le agregan los sectores montañosos de los Teques y el de Guarenas-Guatire. La vertiente interior se caracteriza por lo empinado de sus laderas. Hay numerosos picos con altitudes por encima de los 2.000 metros. La serranía del Interior es más baja que la de la Costa (límite norte) y se presenta limitando la zona sur del estado Miranda.

La topografía es muy variada, ya que cuenta con cadenas montañosas que nacen en la cordillera de la costa, las cuales se extienden sobre un gran porcentaje de la cuenca (65 %). Por ende, la misma presenta una gran cantidad de quebradas y ríos que aportan su aguas al río Grande y luego al principal río Tuy. Por otro lado, se encuentran dos grandes planicies que son la confluencia del río Guarenas y Guatire y la más extensa que se integra desde Caucaagua a los valles de Tuy en la salida de la cuenca. Ésta presenta una pendiente promedio del 30%, lo cual está indicando el predominio de pendientes fuertes. El uso de la tierra se muestra en la Figura 2.

La temperatura diaria promedio de la cuenca no presenta una gran amplitud térmica, estimándose la máxima en 9°C . Las temperaturas máximas son de aproximadamente 32°C y las mínimas de 18°C .

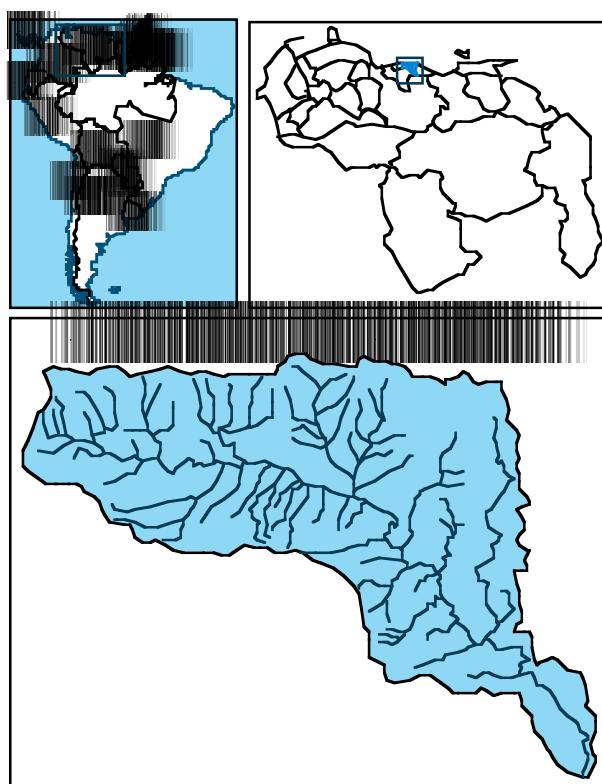


Figura 1 - Ubicación geográfica de la cuenca

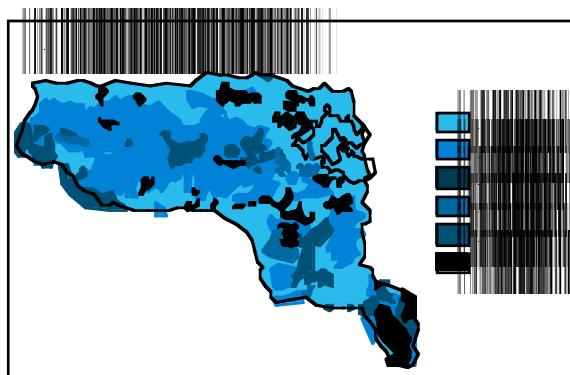


Figura 2 - Uso actual de la tierra

La radiación solar anualmente varía entre los 400 cal/cm².día en el mes de Noviembre a unos 480 cal/cm².día en el mes de Julio.

El régimen de lluvia es húmedo con una variación desde los 800 en la zona noroeste hasta los 2300 en los valles de Tuy. El promedio estimado de lluvia para la cuenca es de 1245 mm al año.

La cuenca del río Grande se caracteriza por una predominancia de zonas boscosas, forestales y matorrales. Las zonas destinadas a la actividad agrícola no son considerables, debido a que la gran mayoría de las tierras son de categoría VI a VIII, lo cual hace que su uso sea de limitado a prohibido desde el punto de vista agropecuario. A esto hay que sumarle lo accidentado de la topografía, lo cual implicaría prácticas costosas, de manera de evitar la erosión y lavado de los suelos.

La distribución porcentual de cada uno de los usos de la tierra se detalla a continuación: Bosque (330,27 km² - 42,08 %), Matorral (270,74 km² - 34,50 %), Sabana (24,28 km² - 3,10 %), Herbazal (16,52 km² - 2,10 %), Urbano (42,58 km² - 5,42 %), Agrícola (100,50 km² - 12,80 %).

Los suelos, desde el punto de vista agrícola, son moderadamente fértils, de ahí que su clasificación según su capacidad para este uso, en su mayoría, sea entre las categorías VI a VIII. Por lo tanto, esta actividad, tal cual lo demuestra los datos de uso de la tierra, es reducida en la cuenca. En cuanto a su textura, la mayoría de los suelos son de textura franco arcillosa, poco profundos y con presencia de gravas.

Esta información básica que fue utilizada para la definición de los distintos parámetros y variables de los modelos, fue extraída de: "Sistema de Información Ambiental del Río Tuy" (1996) "Proyectos de Sistemas Ambientales Venezolanos"

(1983), "Capacidad de Uso de las Tierras del Estado Miranda" (1980) y "Procesos de Producción de Sedimentos e Inventario de Problemas de Erosión en Cauce en la Cuenca de Río Tuy" (1987).

PARÁMETROS Y VARIABLES DE LOS MODELOS

Modelo CALSITE

El modelo de simulación distribuido CALSITE requiere del ingreso de las siguientes imágenes para llevar a cabo las distintas fases de la determinación de la erosión y calibración de la producción de sedimentos: lluvia anual Pa (usado en el proceso de calibración)-Figura 3-, índice de erosividad R- Figura 4-, factor de erosionabilidad del suelo K- Figura 5-, modelo de elevación digital (usado para el cálculo del factor topográfico LS-Figura 6), factor de cobertura y manejo CP, división de subcuencas con mediciones de sedimentos para la calibración.

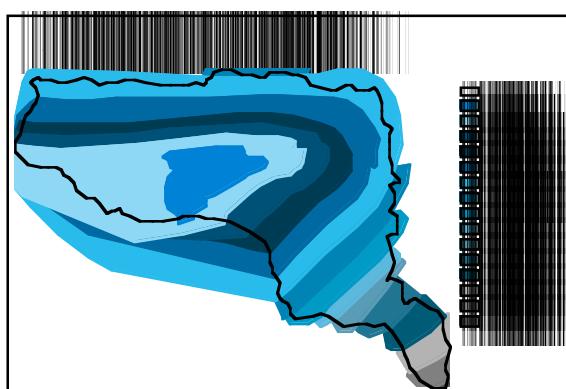


Figura 3 - Precipitación Anual [mm]

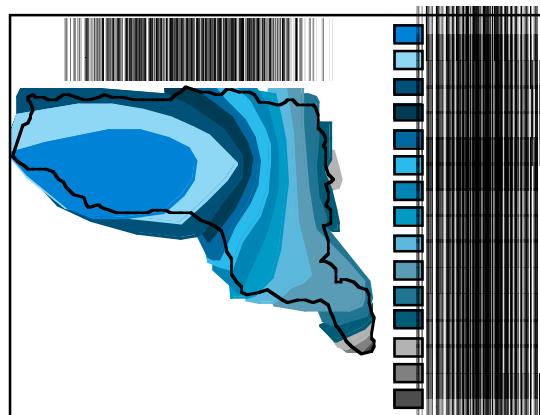


Figura 4 - Erosividad de la lluvia R [MJ.mm/ha.h.año]

El factor de cobertura se obtiene con el mapa de vegetación y uso actual de la tierra presentado

ANALISIS DE LA EROSION HIDRICA MEDIANTE UN MODELO DISTRIBUIDO (CALSITE) Y UN MODELO AGREGADO (SWRRB)

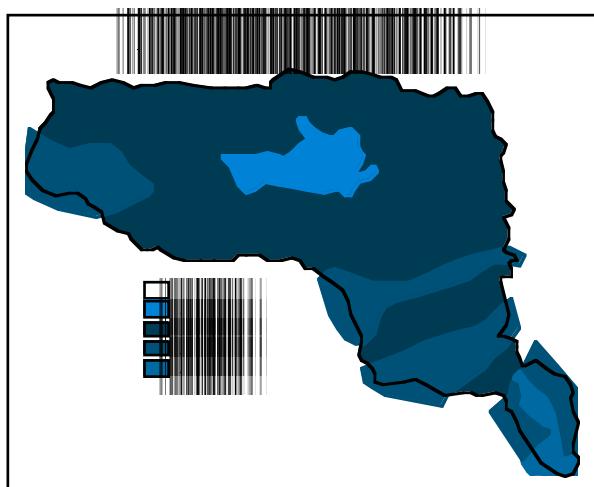


Figura 5 - Erosionabilidad del suelo K

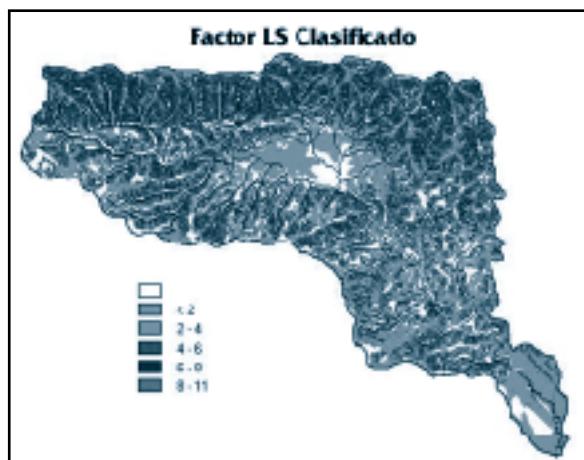


Figura 6 - Factor LS calculado por CALSITE

Tipo de uso	Formación vegetal	Altura dozel	Densidad	Intervención	Factor C
Veg. Perenne	Bosque	<15 m	25 a 50%	10 a 30%	0,0230
Veg. Perenne	Bosque	<15 m	25 a 50%	>30%	0,0550
Veg. Perenne	Bosque	<15 m	50 a 75%	10 a 30%	0,0225
Veg. Perenne	Bosque	<15 m	50 a 75%	>30%	0,0536
Veg. Perenne	Bosque	<15 m	>75%	10 a 30%	0,0220
Veg. Perenne	Bosque	15 a 25 m	25 a 50%	>30%	0,0561
Veg. Perenne	Bosque	15 a 25 m	50 a 75%	10 a 30%	0,0234
Veg. Perenne	Bosque	15 a 25 m	50 a 75%	>30%	0,0556
Veg. Perenne	Sabana Abta. c/Bosque			Sin intervención	0,0100
Veg. Perenne	Sabana Abta. c/Chaparro			Sin intervención	0,0080
Veg. Perenne	Matorral		25 a 50%	Sin intervención	0,0070
Veg. Perenne	Matorral		25 a 50%	10 a 30%	0,0280
Veg. Perenne	Matorral		25 a 50%	>30%	0,0650
Veg. Perenne	Matorral		50 a 75%	10 a 30%	0,0260
Veg. Perenne	Matorral		50 a 75%	>30%	0,0600
Veg. Perenne	Matorral		>75%	10 a 30%	0,0210
Veg. Perenne	Matorral		>75%	>30%	0,0570
Agrícola	Café				0,0900
Agrícola	Conuco Ladera				0,5400
Agrícola	Cacao				0,1500
Agrícola	Fruto comercial				0,3000
Agrícola	Ganadería extensiva				0,0800
Agrícola	Sistema agrícola				0,2500
Agrícola	Conuco mejorado				0,4500
Veg. Perenne	Herbazal			Sin intervención	0,0110
Veg. Perenne	Herbazal			10 a 30%	0,0380
Veg. Perenne	Herbazal			>30%	0,0680
Urbano					0,0050

Tabla 1. Factor C adoptado para las coberturas

anteriormente y usando las tablas del factor C elaboradas por diferentes autores como Wischmeier y Smith (1978), Velázquez (1988) y Delgado y Vasquez (1997), (citados por Barrios, 1995), cuyo resultado se muestra en la Tabla 1.

Modelo SWRRB

La versión utilizada del modelo funciona en el entorno MS windows, y la simulación se realizó dividiendo la cuenca en diez subcuenca, que es lo

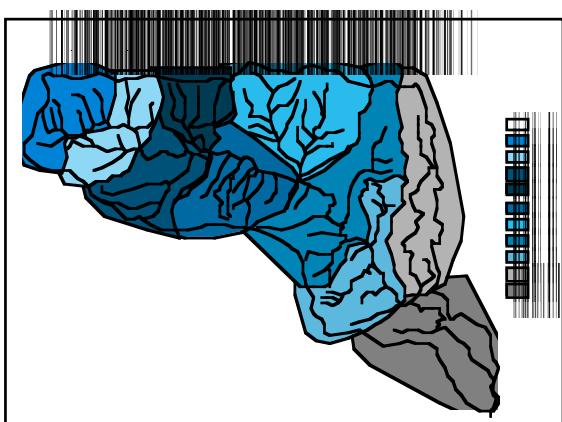


Figura 7 - Subcuenca aplicadas en SWRRB

máximo permisible. Los datos climáticos como precipitación, temperatura y radiación solar, fueron promediados para la cuenca, en base los datos de estaciones y publicaciones. La división de subcuenca usada se muestra en la Figura 7.

En cuanto a los demás datos, topografía, parámetros hidrológicos e hidráulicos que intervienen en el proceso lluvia-escorrentía, características físicas

cas y químicas del suelo y datos de la vegetación y/o cultivos, se estiman para cada una de las subcuenca consideradas, en base a la información básica disponible. En la Tabla 2, 3 y 4 se presentan un resumen de los datos de entrada necesarios para el modelo por tópico.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

CALSITE

El valor de la longitud de la pendiente que se presenta con mayor frecuencia está en el rango de 40 a 50 m. Cuando se hace un cálculo estadístico para la cuenca y subcuenca, el resultado que se obtiene es de una longitud de la pendiente promedio de 105 m.

Por el lado de la erosión total de suelos, los valores encontrados muestran que la erosión potencial no es elevada, siendo su valor de 29,334 tn/ha.año, lo que significa una erosión moderada

mes	TMX [°C]	TMN [°C]	CTV [°C]	R.S. [cal/cm.d]	Precip. max. 0,5h [mm]	P(H/S)	P(H/H)	Precip. media [mm]	Precip. des. std. [mm]	Precip. asimetría [mm]
Enero	27,8	19,0	0,05	410	21,3	0,30	0,68	3,7	9,6	7,0
Febrero	27,9	19,0	0,05	465	23,6	0,24	0,62	3,3	5,5	3,1
Marzo	27,9	20,6	0,04	475	15,6	0,15	0,56	3,6	6,5	3,2
Abril	30,8	20,6	0,05	450	30,2	0,15	0,48	4,8	11,7	4,6
Mayo	31,5	22,5	0,04	440	28,9	0,25	0,58	8,1	15,2	3,4
Junio	30,8	22,5	0,04	460	32,6	0,50	0,78	8,7	12,3	2,7
Julio	31,0	22,5	0,04	480	37,7	0,56	0,80	9,6	17,3	4,0
Agosto	32,2	22,1	0,05	465	39,5	0,48	0,76	9,0	13,1	3,0
Sept.	32,7	22,0	0,05	475	40,0	0,50	0,68	7,9	13,1	3,3
Oct.	32,8	21,6	0,05	440	40,7	0,35	0,61	8,4	12,6	2,9
Nov.	30,4	21,3	0,05	400	26,9	0,45	0,72	9,3	12,9	2,3
Dic.	29,6	19,8	0,05	415	31,9	0,31	0,72	8,1	17,2	5,2

Tabla 2, Datos climáticos

Subcuenca	Área [Km ²]	Pendiente Promedio [m/m]	Longitud de la pendiente media [m]	Longitud del cauce principal [Km]	Pendiente del cauce principal [m/m]
1	56,13	0,3826	98,47	5,052	0,1613
2	60,38	0,3236	96,98	6,397	0,1424
3	67,40	0,2608	95,08	10,115	0,1132
4	43,02	0,4192	99,53	7,500	0,2247
5	85,29	0,2032	99,24	11,400	0,0977
6	118,06	0,2994	104,82	10,750	0,1340
7	122,76	0,2820	98,84	12,970	0,0633
8	81,20	0,1944	99,80	11,900	0,0746
9	78,32	0,2510	97,90	11,600	0,0806
10	70,78	0,1489	101,09	10,650	0,0733
Cuenca	785,00	0,2684	99,57	73,53	0,1065

Tabla 3. Características Topográficas

ANALISIS DE LA EROSION HIDRICA MEDIANTE UN MODELO DISTRIBUIDO (CALSITE) Y UN MODELO AGREGADO (SWRRB)

Subcuenca	Número de curvas	Ancho cauce [m]	Conduct. hidráulica [mm/h]	N de Manning cauce	N de Manning vertiente	Factor de correc. precipit.	Factor K del suelo
1	67	1,00	40,0	0,05	0,30	0,85	0,2444
2	65	2,00	40,0	0,05	0,35	0,80	0,2460
3	65	3,00	38,5	0,05	0,33	0,68	0,2429
4	65	2,50	35,0	0,05	0,36	0,87	0,2422
5	70	3,50	30,8	0,05	0,32	0,64	0,2414
6	67	3,00	34,0	0,05	0,33	0,83	0,2414
7	67	4,50	32,0	0,055	0,34	0,84	0,2437
8	66	5,00	30,0	0,055	0,35	1,02	0,2460
9	61	4,50	35,0	0,055	0,36	1,01	0,2422
10	65	6,00	25,0	0,060	0,35	1,37	0,2999
Cuenca				0,055	0,33		

Tabla 4. Variables estimadas para el proceso lluvia-escorrentía

Uso de la tierra	Agrícola	Bosque	Herbazal	Matorral	Sabanas	Urbano
Erosión media	132,35	17,22	15,48	13,30	6,07	0,72

Tabla 5. Valores promedios de erosión [Tn/ha.año]

según la clasificación de la FAO (CIDIAT, 1987). Esto puede ser debido a las zonas agrícolas que están dispersas, sólo abarcan un 12 % de la cuenca y son las que tienen un valor más alto del factor C. El resto lo conforman zonas boscosas, urbanas, matarrales, sabanas y herbazales cuyos valores de C son menores, lo cual se muestra en la Tabla 5.

En cuanto al factor de entrega, cuyo promedio para la cuenca es de 0,101, se observa que la mayor parte de la cuenca tiene un valor menor a 0,20 y que zonas con coeficiente de entrega de 0,60 a 1,0 se encuentran cercanos los cauces, lo que implica que las medidas de protección contra la producción de sedimentos debe centrarse en esas zonas, de manera de proteger los recursos agua y suelo. Dentro de las medidas, se pueden citar :

- Restringir la actividad agrícola cerca de los cauces.
- Si las zonas agrícolas están establecidas, implementar prácticas conservacionistas, tales como mínima labranza, siembra directa, rotaciones etc.
- Hacer un estudio de ordenamiento territorial, tomando en cuenta el proceso erosivo y de producción de sedimentos.

Por último, la producción de sedimentos a la salida de la cuenca corresponde a la suma de la producción de sedimentos de cada pixel, ya que su transporte total o parcial es evaluado en el índice de entrega DI. La cantidad es del orden de 233.657 tn/año, que suponiendo una densidad del sedimento no consolidado de 1,5 tn/m³, se traduce en volumen de aproximadamente 156.000 m³/año, lo que

equivale a una lámina de suelo erosionable del orden de 0,2 mm, que demuestra una degradación de los suelos insignificante. Las zonas con un valor menor a 10 tn/ha.año abarcan un 95%, lo que es conveniente que se mantenga, sobre todo por la baja calidad de los suelos desde el punto de vista agrícola. Una posible intervención o explotación irracional de los bosques implicaría una pérdida total de la capacidad de los suelos y estructuras de captación de agua superficial más costosas.

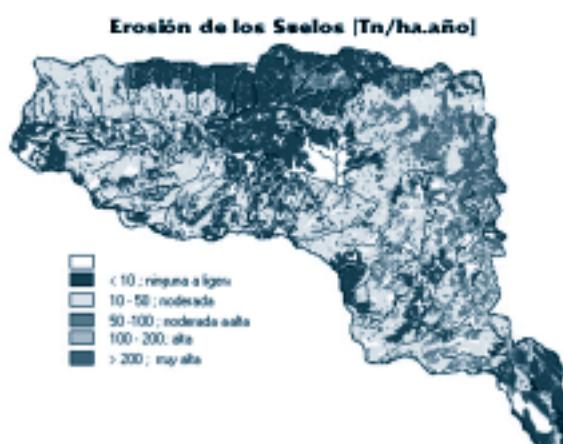


Figura 8 - Erosión de los suelos según FAO (1980)

En la Figura 8 se muestran la distribución espacial de la erosión, con su clasificación de acuerdo a la FAO y en la Figura 9 la producción de sedimentos respectiva, basada en los resultados de la quinta corrida que fue considerada como la de mejor ajuste según se demuestra en la Tabla 6.

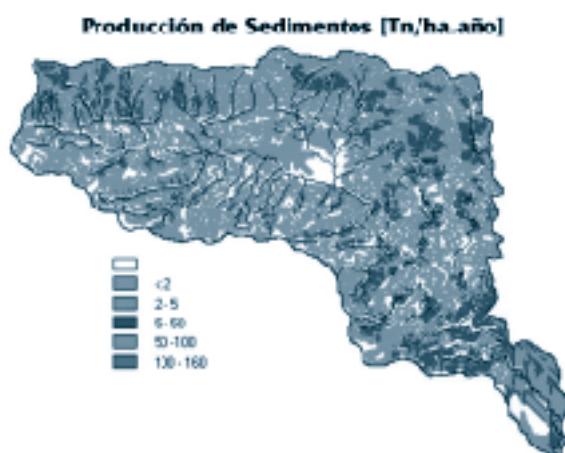


Figura 9 - Distribución espacial de la producción de sedimentos

SWRRB

En el caso particular de este trabajo, se utilizaron datos de precipitación y de caudal medio máximo anual a la salida de la cuenca, como elementos de ajuste del modelo. Estos fueron obtenidos de la imagen de lluvias anuales del modelo CALSITE, mediante el uso del comando Extract, de IDRISI, usando como referencia la imagen de subcuenca y los datos de caudales del SIA-TUY respectivamente. La cantidad de años simulada fue de 20 y como las tierras forestales o matorrales son las predominantes por subcuenca, no se utilizaron datos de pesticidas, fertilizantes, etc. es decir todo lo que esté relacionado con cultivos y calidad de agua derivada por la aplicación de los mismos. Los valores usados en el ajuste son los que se presentan en la Tabla 7.

La decisión de usar estas variables está basada en el hecho de que ambas tenían un período de mediciones de por lo menos 10 años, lo cual es importante a la hora de simular.

Según se aprecia en la Tabla 8, la precipitación se simula con bastante eficiencia, produciendo errores máximos del 1,5%, lo cual es bastante preciso, así como el caudal medio cuyo valor simulado es de 90,3 m³/s.

En la misma tabla se observa que para el valor del factor LS, calculado por el modelo en base a la fórmula de Wischmeier y Smith (1978), se obtienen valores sensiblemente más grandes, hasta 7,5 veces los valores obtenidos aplicando las expresiones de McCool (1993), citado por Bolton et al (1995), en el modelo CALSITE. Esto se debe a que las formulaciones del año 1978, fueron obtenidas sobre terrenos cuyo rango de la pendiente está entre 3 y 18 por ciento.

A raíz de esto, los valores de producción promedio anual de sedimentos son más grandes que los simulados por CALSITE. Los resultados obtenidos son: a nivel de subcuenca $Y_s = 7,207$ tn/ha.año y a nivel de cuenca $Y_s = 8,489$. Esta diferencia no constituye un problema, ya que el cálculo de la producción de sedimentos a la salida de la cuenca tiene en cuenta no sólo la producción de sedimentos en subcuenca, sino también el sedimento depositado y degradado o erosionado en los cauces, durante el proceso de tránsito, de manera que lo que interesa en la comparación es a nivel de subcuenca, como se ve en la Tabla 9.

De la tabla se puede inferir que la diferencia de valores del factor LS calculado por ambos modelos, hasta 7,5 veces, se ve reducida por el hecho de que el factor de producción de sedimentos debido a la escorrentía “ $11,8(V.qp)^{0,56}$ ” en la MUSLE, utilizado por SWRRB, es menor al factor de “ $R.DR$ ” de la USLE, usado por CALSITE.

En consecuencia se puede afirmar que el mo-

Nº de corrida	Longitud máxima [m]	Prod. sedimento media modelada [tn/ha.año]	Prod. sedimento media observada [tn/ha.año]	Prod. sedimento máxima modelada [tn/ha.año]	Bondad ajuste CHI^2
1	200	2,94	2,983	222,55	0,0010
2	210	2,96	2,983	155,75	0,0005
3	220	2,99	2,983	159,41	0,0005
4	230	3,02	2,983	163,00	0,0010
5	215	2,98	2,983	157,64	0,0000

Tabla 6. Resultados de la calibración

Subcuenca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precipitación [mm]	1198	1123	961	1220	896	1178	1172	1424	1406	1915
Caudal a la salida de la cuenca en la estación el Carpintero: 85 m³/s										

Tabla 7. Valores usados para ajustar el modelo SWRRB

ANALISIS DE LA EROSION HIDRICA MEDIANTE UN MODELO DISTRIBUIDO (CALSITE) Y UN MODELO AGREGADO (SWRRB)

Cuenca	Área [%]	Tc [hs]	LS	γ_s [Tn/ha.año]	Precipitación simulada [mm]	Precipitación observada [mm]
1	7,2	0,96	27,88	5,4	1189,1	1198
2	7,7	1,17	20,36	5,9	1119,1	1123
3	8,6	1,53	13,68	2,7	951,3	961
4	5,5	1,12	33,21	3,9	1217,0	1220
5	10,9	1,74	9,08	2,1	895,3	896
6	15,1	1,49	18,55	4,6	1161,1	1178
7	15,6	2,13	16,08	9,9	1175,1	1172
8	10,3	2,05	8,45	5,7	1426,9	1424
9	10	1,93	13,01	17,3	1412,9	1406
10	9,1	2,09	5,44	12,4	1916,5	1915

Tabla 8. Valores obtenidos de la simulación

Subcuenca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores calibrados	2,90	3,49	2,05	2,30	1,06	2,69	3,53	3,25	4,64	3,53
Valores modelados	5,40	5,90	2,70	3,90	2,10	4,60	9,90	5,70	17,30	12,40
$\gamma_s(\text{SWRRB})/\gamma_s(\text{CALSITE})$	1,80	1,69	1,31	1,70	1,98	1,71	2,80	1,75	3,73	3,51

Tabla 9. Comparación entre los valores calibrados en CALSITE y los modelados por SWRRB

delo SWRRB sobreestima los valores de producción de sedimentos con respecto a los calibrados por CALSITE. Por ende, cuando se utilice el modelo agregado, sería conveniente realizar mediciones mensuales de sedimentos a nivel de subcuencas de manera continua o disponer de batimetrías si existen embalses, para poder validar el modelo en zonas de montaña, con pendientes mayores al 18 por ciento y sobre cuencas mayores a los 500 km², que fueron las usadas por los autores para su validación. Con esto se podría llegar a obtener un factor de corrección final que tenga en cuenta los dos aspectos analizados. De todas maneras, la diferencia obtenida en algunas subcuencas no es sustancial, por lo que se puede afirmar que el modelo es una herramienta importante a la hora de proyectar o planificar, sobre todo si se tiene en cuenta el carácter predictivo del mismo.

Comparación entre CALSITE y SWRRB

Se puede decir que entre estos dos modelos, distribuido y agregado respectivamente, existe una complementación, ya que el primero tiene la virtud de mostrar espacialmente lo que sucede con el fenómeno en sí y, por otro lado, el segundo tiene la capacidad de observar con más detalles los fenómenos involucrados en el proceso lluvia-escorrentía, y así como también en lo que tiene que ver con el comportamiento de los cultivos, cuando las zonas agrícolas son las predominantes. Como una manera de especificar las virtudes y limitaciones de cada uno de los modelos, se hace la siguiente comparación.

Modelo CALSITE

Ventajas

En la simulación :

- Permite observar el fenómeno de erosión y producción de sedimentos espacialmente.
- Calibra y define las zonas productoras de sedimentos, a través del factor de entrega.
- Tiene la posibilidad de calcular una longitud de la pendiente variable.
- Permite calibrar hasta 8 subcuencas, para las cuales debe haber datos medidos a la salida.
- Cuando se trabaja con carácter predictivo puede usarse valores estimativos para calibrar.
- Tiene la posibilidad de calcular el factor R a partir de la lluvia anual.

En el uso :

- Permite obtener los parámetros promedios de otros modelos rápidamente, usando como base las imágenes del modelo y las funciones para SIG del programa IDRISI.
- La información requerida es factible de conseguir o producir en un tiempo aceptable y a bajo costo.
- Se puede simular y evaluar espacialmente distintos escenarios en poco tiempo y a costo reducido.

Desventajas

En la simulación :

- No evalúa el tránsito de los sedimentos.
- La mayoría de sus fórmulas han sido calibradas para climas tropicales.

En el uso :

- Funciona solamente bajo el sistema operativo DOS y requiere de un alto porcentaje de memoria disponible para su funcionamiento.
- Tiene límites en la cantidad de filas y columnas de las imágenes. En el caso particular se usaron imágenes de 500c x 370f, con un pixel de 100 x 100metros, para cubrir una cuenca de 785 km².
- Es imprescindible tener conocimientos de sistemas de información geográfica.
- Se necesita estar familiarizado con el programa IDRISI, ya que el modelo trabaja en su ambiente versión 4.0 o 4.1 y por ende sus formatos son específicos del mismo.

Modelo SWRRB

Ventajas

En la simulación :

- Permite el análisis de los fenómenos que forman parte del proceso lluvia-escorrentía.
- Simula calidad de agua y contaminación por aplicación de nutrientes y pesticidas.
- Simula de manera detallada los fenómenos de crecimiento de los cultivos.
- Tiene la ventaja de simular algunos datos cuando estos no son conocidos.
- Transita el agua y los sedimentos desde la salida de las subcuencas a la salida de la cuenca.
- Puede simular hasta 10 subcuencas y no tiene límite de aplicación en cuanto a la superficie.
- Es adecuado para realizar cálculos predictivos y estimativos.

En el uso :

- No necesita de conocimientos y recursos específicos de informática, para la carga de datos y la ejecución de procedimientos.

Desventajas

En la simulación :

- No tiene la posibilidad de analizar los fenómenos espacialmente en detalle.
- No simula procesos de erosión de suelos, solamente producción de sedimentos.
- No permite obtener mapas temáticos clasificados.

En el uso :

- Requiere de un volumen de información importante.
- Los datos requeridos no están disponibles en la mayoría de los casos, por lo que su operación es más costosa y la obtención de datos requiere de más tiempo.
- El módulo de visualización de gráficos es muy limitado.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los procedimientos llevados a cabo en la operación de los modelos y a los resultados obtenidos, que conllevaron a cumplir con los objetivos previstos, se concluye lo siguiente:

- Los modelos distribuido (CALSITE) y agregado (SWRRB) analizados no son excluyentes, si no complementarios, de acuerdo al estudio comparativo realizado, en el que se aprecian las cualidades y limitaciones de ambos.
- Los modelos de simulación distribuidos, cuya difusión está comenzando, son una herramienta poderosa a la hora de simular y analizar espacialmente el comportamiento de los fenómenos en estudio. Esto se debe a que permiten trabajar con unidades de superficies pequeñas, los pixeles, que permiten una mayor precisión en los cálculos, sin generalizar las variables y parámetros.
- Los Sistemas de Información Geográfica constituyen una herramienta de suma utilidad en la evaluación de parámetros y variables de modelos de simulación de recursos naturales.
- El grado de erosión de la cuenca del río Grande es moderada, menor a 30 tn/ha.año, según la clasificación de la FAO, con una producción de sedimentos promedio de 2,98 tn/ha.año y con un factor de entrega de 0,101.
- La longitud de la pendiente a adoptar en modelos agregados, sin pérdida de precisión, es de 100 metros, lo cual es ratificado por la rutina de cálculo de CALSITE para cuencas con diferentes topografía y por la mayoría de los ejemplos encontrados en la literatura.
- De acuerdo a los valores del factor de entrega calculados por CALSITE, las medidas de protección contra la producción de sedimentos debe centrarse en zonas cercanas a los cauces, de manera de proteger los recursos agua y suelo.

LISTA DE SÍMBOLOS

- CP factor de cobertura y práctica de manejo del suelo.
CV es la cubierta del suelo (biomasa arriba del terreno + residuo sobre el terreno) en Kg/ha. Este valor se calcula día a día.
CVM es el mínimo valor de C. Se estima a partir

ANALISIS DE LA EROSION HIDRICA MEDIANTE UN MODELO DISTRIBUIDO (CALSITE) Y UN MODELO AGREGADO (SWRRB)

CVT	del valor anual promedio del factor C.
d	coeficiente de variación de temperatura.
dur	diámetro de la partícula en m.
DEG_R	duración del flujo degradante en horas.
DEG_R	es el sedimento recapturado por el flujo, según el concepto de potencia del cauce.
DR	factor de la entrega
ET	es la evapotranspiración diaria en (mm). Modelo de Ritchie (1972). (Arnold y Williams, 1994)
F	caminos de flujos [m]
K	factor de erosibilidad del suelo [ha.h/joule.mm.ha]
LS	factor topográfico debido a la longitud y gradiente del terreno
P	es la percolación diaria (mm).
Pa	lluvia anual [mm]
PR	es la precipitación diaria en (mm).
P(H/H)	probabilidad de un día húmedo después de otro húmedo.
P(H/S)	probabilidad de un día húmedo después de un seco.
R	índice de erosividad por lluvia y escorrentía [joule.mm.ha/h].
S	pendiente [%]
SEDi	sedimento que ingresa al tramo.
SE	erosión promedio anual [Tn/ha.año]
S_w	pendiente de la superficie del agua.
SW	es el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15 atmósferas.
SY	producción de sedimentos [tn/ha/año]
q_p	caudal pico para la subcuenca en m ³ /s.
Q	es la escorrentía diaria en (mm). Usa el modelo del S.C.S. (número de curvas).
QR	es el flujo de retorno diario (mm).
RS	radiación solar.
t	es el tiempo en días.
TT	tiempo de viaje.
TMN	temperatura mínima mensual media.
TMX	temperatura máxima mensual media.
V	escorrentía superf. para la subcuenca en m ³ .
V_c	velocidad en el canal.
V_f	velocidad de caída en m/h.
w	ancho promedio del canal en m.
X	dimensión Este-Oeste del área abarcada por los pixeles en metros.
Y	dimensión Norte-Sur del área abarcada por los pixeles en metros.
Y_s	producción de sedimentos de la subcuenca en tn.
Y_f	profundidad de caída en m.
α_{SP}	parámetro de potencia máxima del cauce...
γ	densidad del agua.

REFERENCIAS

- Arnold, J.G. y Williams, J.R. - (1994) - "SWRRB - A Watershed Scale Model for Soil and Water Resources Management.", U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service Grassland, Soil and Water Research Laboratory. - Temple, USA.
- Barrios, A. - (1995) - "Erosión y Producción de Sedimentos en Cuencas Hidrográficas" - Fac. De Ciencias Forestales - 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
- C.I.D.I.A.T - (1987) - "Procesos de Producción de Sedimentos e Inventario de Problemas de Erosión en Cauce en la Cuenca de Río Tuy" - M.A.R.N.R. - Caracas, Venezuela.
- Englund, E. y Sparks, A. (1991) - "Geostatistical Environmental Assessment Software, User's Guide" - U.S. Environmental Protection Agency - Las Vegas, USA.
- M.A.R.N.R. - (1980) - "Capacidad de Uso de las Tierras del Estado Miranda" - Caracas, Venezuela.
- M.A.R.N.R. - (1983) - "Proyectos de Sistemas Ambientales Venezolanos" - Caracas, Venezuela.
- M.A.R.N.R. - (1996) - Sistema de Información Ambiental del Río Tuy" - Caracas, Venezuela.
- Olmos, L. - (1996) - "Implementación de un Sistema de Información Geográfica para el Manejo de los Recursos Hídricos " CICyT-UNSE - Santiago del Estero, Argentina.
- Pla Sentis, I., López, R. y Lobo, D. - (1993) - "Memorias de la Reunión Internacional sobre Procesos de Erosión en Tierras de Altas Pendientes, Evaluación y Modelaje" - MARNR, CIDIAT - Mérida, Venezuela.
- Saborio, J. y Aylward, B. (1997) - "Análisis Espacial de Erosión y el Transporte de Sedimentos en Tres Micro-Cuencas del Arenal, Costa Rica" - CREED, Notas Técnicas - San José, Costa Rica.
- Saborio, J. - (1997) - "Sistemas de Información Geográfica Aplicados a Recursos naturales en la Gestión de Manejo de Cuencas" - Curso Regional - CIDIAT - Mérida, Venezuela.
- Samper, J. y Cabrera, J. - (1990) - "Geostadística : Aplicaciones a la Hidrología Subterránea" - Centro International de Métodos Numéricos en Ingeniería - U. Politécnica de Catalunya - Barcelona, España.
- Strebin, S. y Pérez, J. - (1980) - "Capacidad de Uso de las Tierras del Estado Miranda" - MARNR - Caracas, Venezuela.
- Wischmeier, W. y Smith, D. - (1978) - "Predicting Rainfall Erosion Losses" - USDA & Agricultural Research Service - Agriculture Handbook Nº 282 - USA.

