

# ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN UNA CUENCA CON UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. EL SISTEMA CUBILLAS-COLOMERA.

Carvajal Ramírez, F.<sup>1</sup> y Giráldez Cervera, J.V.<sup>2</sup>

## Resumen

En este trabajo se analiza la producción de sedimentos en las cuencas de los ríos Cubillas y Colomera, afluentes del río Genil, que tienen los embalses conectados. Para ello se ha aplicado la ecuación universal de pérdida de suelo sobre las celdillas de una gran retícula en la que se han dividido las cuencas, abordando el estudio en un sistema de información geográfica. La circulación de sedimentos se basa en los coeficientes de entrega definidos en función del tiempo de viaje por la superficie de la cuenca, propuesta por Dickinson y Rudra (1990) en el modelo GAMES, adaptándola en algunos aspectos al método propuesto.

Una vez validado el modelo, mediante la comparación de los resultados obtenidos con los recogidos en la bibliografía, y ante la imposibilidad de realizar una correcta calibración del mismo al no existir datos experimentales suficientes, se ha realizado un análisis de sensibilidad con el propósito de estimar el nivel de error introducido en los resultados del modelo, ante variaciones de su parámetro principal.

Finalmente, se han simulado diferentes situaciones para localizar las zonas más susceptibles de mejora con diferentes prácticas de conservación, concluyéndose que el método estima bien los niveles erosivos de las cuencas, y las cantidades de sedimento aportadas a sus respectivos embalses. Además se ha determinado el valor umbral del llamado factor de cubierta por encima del cual es preferible un cambio de manejo del suelo frente a la protección directa de cauces fluviales, para disminuir el sedimento recibido por los embalses.

**Palabras clave:** sedimentos, Sistemas de Información Geográfica, modelo de gestión, simulación de conservación.

## Introducción

La erosión del suelo es una grave amenaza para el mantenimiento de sistemas agrícolas y ambientales. Sin embargo, por el carácter discontinuo del fenómeno, ligado a la ocurrencia de lluvias intensas a veces esporádicas, su percepción por la sociedad es intermitente, a pesar de que cuando suceden episodios catastróficos se exigen respuestas inmediatas a la Administración. En zonas semiáridas, una consecuencia de gran importancia asociada a la erosión es la pérdida de capacidad de almacenamiento de los embalses.

Un problema frecuente en estudios ambientales de embalses es la escasez de información pasada e incluso presente con la que obtener una buena

estimación de la erosión y del volumen de sedimento aportado al embalse, y así poder planificar el óptimo manejo de los recursos disponibles, manteniendo el equilibrio natural del proceso de degradación y regeneración del suelo.

El IARA (1986) publicó una relación de las cuencas de ríos embalsados de Andalucía, clasificándolos según su nivel de degradación. Las cifras ofrecen un panorama pesimista: 47 de las 76 cuencas estudiadas presentan pérdidas de suelo superiores a 50 toneladas por cada hectárea, al cabo del año. En particular, la cuenca del río Colomera aparece en los primeros lugares, con un ritmo de 132.94 t/ha/año, y la del río Cubillas, con 120.90 t/ha/año. Estas cifras contrastan con las reflejadas en los mapas de estados erosivos confeccionados

1. Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Almería.

2. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Telf.: 957 29 33 33; e-mail: ag1fecae@lucano.uco.es

Artículo recibido el 18 de noviembre de 1998, recibido en formas revisadas el 30 de marzo de 1999 y el 26 de enero de 2000, y aceptado para su publicación el 10 de febrero de 2000.

por ICONA (1987), de un orden de magnitud diez veces inferior, y con las estimaciones de los técnicos encargados de la gestión y control del embalse del Cubillas (Masa, 1996) que cifran la producción de sedimento de la cuenca en 4.77 t/ha/año en función a mediciones indirectas del suelo recibido en el embalse y de los caudales y concentraciones evacuados por el canal de desviación instalado aguas arriba del mismo. La densidad media ha sido estimada con los datos de Lane y Koelzer (e.g. Simons y Sentürk, 1992, Table 4.3) para una granulometría media estimada en la zona, de partes iguales de arena, limo y arcilla, suponiendo un embalse con una extracción normal de agua, sin que el sedimento se seque demasiado.

El objetivo principal de este trabajo es la propuesta de una metodología sencilla para estimar la cantidad de sedimento que aportan las cuencas de ríos a sus embalses. Para ilustrar su aplicación práctica se han realizado simulaciones de escenarios que permiten evaluar las consecuencias de las diferentes opciones de manejo, incluyendo circunstancias tales como una deforestación o una variación de la cantidad y frecuencia de las precipitaciones.

### **Modelos de erosión acoplados a sistemas de información geográfica.**

Los sistemas de información geográfica, como señalan Burrough y McDonnell (1998), constituyen un potente conjunto de programas informáticos, útiles para captar, almacenar y recuperar posteriormente, transformando y visualizando datos espaciales del mundo real para diversos fines.

Su empleo en hidrología requiere el conocimiento de las leyes por las que se rigen los fenómenos estudiados. Existen numerosos modelos hidrológicos y erosivos (e.g. Singh, 1989) que se pueden emplear en condiciones muy diversas.

El proceso de erosión queda caracterizado con la modelización de la rotura de los agregados del suelo, su transporte y posterior depósito a cierta distancia en forma de sedimentos. El modelo de Meyer y Wischmeier (1969), fue quizás el primero que reconoció esto de una forma sencilla, limitando la erosión al mínimo de los procesos característicos mencionados. Los resultados permiten apreciar la influencia que tiene la pendiente y la susceptibilidad del suelo en su erosión.

Posteriormente, Foster y Meyer (1975) propusieron un modelo basado en la misma idea, pero

con una formulación más elaborada, considerando que la intensidad de erosión en una cárcava es linealmente proporcional a la diferencia entre la capacidad de transporte del flujo de escorrentía y el flujo total de sedimentos, y que la capacidad de erosión del flujo de escorrentía es proporcional a su capacidad de transporte.

En la década de los ochenta aparecieron diversos modelos de erosión que trataban al conjunto flujo de agua y partículas sólidas mediante las ecuaciones de transporte de agua conocidas como de Saint-Venant, cuya expresión más general está formada por una ecuación de continuidad y otra de conservación de la cantidad de movimiento. De entre ellos, cabe destacar el modelo de Rose (Rose 1985, Sander y col. 1996), que supone que la intensidad de desprendimiento de sólidos es una función potencial de la intensidad de lluvia, y que la intensidad de depósito es proporcional a la concentración de partículas sólidas en el flujo de escorrentía.

Las simplificaciones aplicadas sobre las ecuaciones de transporte, despreciando los términos de aceleración local y convectiva, dan lugar a la expresión conocida como onda difusiva empleada en el modelo de Govindaraju y Kavvas (Govindaraju, 1995). Si además se desprecia el término de presión, se obtiene la onda cinemática, en la que se basa el modelo propuesto por Singh (Lane y col. 1988).

La solución analítica de los modelos mencionados anteriormente y de los basados en el empleo de las ecuaciones de transporte de Saint-Venant representa generalmente muy bien el fenómeno de erosión, aunque la determinación de las condiciones de borde requeridas para integrarlas, puede ser compleja cuando se aplican a un nivel de escala general.

En cambio existen modelos de solución numérica que se basan en los mismos principios que los anteriores, aunque emplean representaciones simplificadas de las características de las cuencas. Woolhiser y col. (1990) desarrollaron el modelo KINEROS, basado en la descomposición de la cuenca en planos, canales y embalses concatenados en cascada en las que el agua y los sedimentos circulan según la aproximación cinemática a las ecuaciones de transporte. Siendo un modelo de gran versatilidad, exige una gran información sobre la cuenca y sirve para episodios aislados. El modelo EUROSEM (Morgan y col., 1998) es una adaptación de KINEROS con algunas mejoras. Es un modelo distribuido aplicable a parcelas y pequeñas cuencas, que simula bien los fenómenos de rotura

de agregados, transporte y sedimentación de sedimento y predice la escorrentía y la pérdida de suelo, ofreciendo como resultado hidrogramas y sedimentogramas de eventos de lluvia aislados.

En este trabajo se ha usado un sistema de información geográfica en formato teselar para simular la pérdida de suelo anual por erosión hídrica, basándose en la ecuación universal de pérdida de suelo revisada y en el concepto de coeficiente de entrega.

### Adaptación del modelo de erosión

Entre los modelos específicos de pérdida de suelo destaca la ecuación universal de pérdida de suelo, EUPS, (Wischmeier y Smith, 1958b, 1978), basada en medidas efectuadas realizadas durante más de cuarenta años por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Aunque de carácter eminentemente práctico y simplificador, resume la amplia información adquirida durante esos años y a pesar de la difícil extrapolación de algunos de sus parámetros (e.g. Stocking y col, 1988.) ha sido usado con éxito en numerosas partes del mundo (e.g. Jansson 1982, § 16.3). Al mismo tiempo el modelo ha ido actualizándose, mejorando la definición de muchos parámetros y adaptando nuevas tecnologías como el laboreo de conservación. En la actualidad el propio Departamento de Agricultura de Estados Unidos patrocina una nueva versión de la ecuación, denominada la ecuación revisada RUSLE (Renard y col., 1997) en sus iniciales inglesas, y otro más complejo conocido por WEPP (e.g. Lane y Nearing 1989, Chaves y Nearing 1991, Ascough y col., 1997).

La filosofía de la ecuación de pérdida de suelo es muy sencilla. En ella, la pérdida media de suelo A, ( $ML^{-2}T^{-1}$ ), se estima como producto de seis factores que reflejan las influencias del clima R, ( $MLT^{-3}$ ), de las características resistentes del suelo K, ( $L^{-3}T^2$ ), del relieve LS, de la cubierta de la superficie, C, y de las prácticas de protección, P:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

La pérdida media de suelo por unidad de tiempo A, suele expresarse en t/ha/año.

El factor climático R, fue determinado originalmente por Wischmeier y Smith (1958a), como la suma anual para cada episodio de lluvia i, del producto de la energía cinética con la que las gotas de lluvia llegan al suelo  $E_{ci}$ , por la intensidad máxi-

ma de precipitación registrada en períodos de 30 minutos,  $I_{30}$ ,

$$R = \sum_{\forall i} E_{ci} I_{30} \quad (2)$$

Posteriormente Williams (1975a, 1977), observó que la estimación de la producción de sedimentos en pequeñas cuencas agrícolas basándose en la ecuación universal de pérdida de suelo podía llevar a conclusiones completamente falsas, ya que existe una fracción del sedimento producido en cada parcela que se deposita en la misma y que depende de la relación entre el flujo de sedimento de entrada y su capacidad de transporte. Algunos de los sistemas de manejo del suelo podían hacer variar en el tiempo esta relación, aunque en el caso de existir deposición, se encontró una alta correlación entre la producción de sedimento de cada parcela y las características del flujo de escorrentía. Para representar esta variación temporal, propuso la sustitución del factor de erosión por lluvia y escorrentía R, por el siguiente:

$$R = a \cdot (V \cdot Q_p)^b \quad (3)$$

donde V es el volumen de escorrentía,  $Q_p$  es el caudal punta descargado y a y b son parámetros experimentales. La ecuación de pérdida de suelo con este factor R es conocida como MUSLE.

El factor de erodibilidad K, estima la resistencia del suelo frente a los agentes erosivos, recogiendo la influencia de la textura y el contenido de materia orgánica. Sin embargo la relación más aceptada entre estas propiedades del suelo y su erodibilidad no representa bien el comportamiento de muchos tipos de suelos a la erosión hídrica. En la última versión (Renard y col., 1997, § 3) se han agrupado 225 tipos de suelos de todo el mundo en clases texturales, relacionando sus valores medios de erodibilidad con el diámetro medio de partícula de cada clase. Esta fórmula puede aplicarse con buenos resultados para la predicción del factor K en suelos que presenten menos del 10% de partículas con diámetro mayor a 2 mm, siendo especialmente útil cuando la información disponible sea escasa o cuando las composiciones de textura estén dadas en diferentes sistemas de clasificación.

La topografía está expresada como el producto del factor de longitud de ladera L y el factor de pendiente S. En principio se usaron expresiones con parámetros empíricos. Posteriormente han sido propuestas diversas fórmulas alternativas de esti-

mación del factor topográfico mejorando en ciertos aspectos las originales (McCool y col., 1987), aunque Moore y Burch (1986) demostraron con un modelo de erosión la bondad de las primeras.

El factor de cubierta C, resume la influencia de la cubierta vegetal, y de las prácticas de manejo del mismo sobre la erosión y ha sido muy empleado para comparar la repercusión que tienen las diferentes opciones de manejo en los planes de conservación. Indica el modo en que afectará un determinado plan de conservación en la pérdida de suelo media anual o cómo se distribuirá a lo largo del tiempo la pérdida de suelo potencial con determinadas rotaciones de cultivo u otras actividades. Este factor representa el cociente entre la pérdida de suelo que presenta una zona en unas condiciones determinadas respecto a la que experimentaría otra limpia de residuos de cosecha y en barbecho continuo. Sin embargo en la RUSLE, el factor C es estimado como una función de una serie de tres subfactores que resumen el impacto del cultivo previo y su manejo, la reducción de la erosión por la cubierta vegetal y la rugosidad del suelo, y la reducción de la escorrentía en lluvias de poca intensidad cuando la humedad precedente del suelo es baja (Renard y col., 1997, § 5). Cuando no se puede olvidar la variación temporal de factor C, se calcula una media de los diferentes factores C correspondientes a los períodos intermedios, ponderando mediante la fracción de la erosividad asociada a ellos.

El factor de prácticas de conservación P, estima la reducción de pérdida de suelo que se puede conseguir al aplicar alguna medida de protección.

Al cociente entre la pérdida media de suelo y el factor de prácticas de conservación A/P, se le conoce como erosión potencial y representa la cantidad de suelo que puede llegar a erosionarse, independientemente de las técnicas de protección que se utilicen.

Esta ecuación no ha sido aceptada totalmente, en parte por sus propias limitaciones. La primera versión, Wishmeier y Smith (1958), estaba restringida a la región comprendida por las Montañas Rocosas y el Océano Atlántico. Y en parte por la difícil extrapolación de los valores asignables a los parámetros en aquellas regiones en que no existía experiencia previa. Hay algunas alternativas, como la ecuación para estimar la pérdida de suelo en Suráfrica de Stocking y col. (1988) o el método de Morgan y col. (1984), pero adolecen de similares defectos.

La conversión del suelo perdido en sedimento no es inmediata. Una vez que se fragmenta el agregado del suelo, los residuos pueden permanecer en el sitio que ocupaba el agregado o desplazarse arrastrados por la corriente de agua. En el primer caso se dice que el proceso de erosión está limitado por la producción de sedimento, mientras que en el segundo está limitado por el transporte.

Cuando la erosión está limitada por el transporte, los sedimentos van quedando depositados a lo largo de su recorrido aguas abajo, estimándose la cantidad total producida en una cuenca, Y, por un factor que modifica la cantidad inicial, la pérdida de suelo, A, conocido como el coeficiente o cociente de entrega,  $D_R$

$$Y = A \cdot D_R \quad (4)$$

La evaluación del coeficiente de entrega no es fácil pues se debe a la confluencia de numerosos factores (e.g. Singh, 1989, § 11.4.5). Una propuesta simplificada es la de Williams (1975b) quien lo relacionó con el tiempo de viaje del sedimento desde el origen  $T_v$ , y el tamaño representado por el diámetro de la mediana de los sedimentos,  $D_{50}$ ,

$$D_R = \exp(-\alpha \cdot T_v \cdot D_{50}^{1/2}) \quad (5)$$

con  $\alpha$  como coeficiente empírico o de ajuste. Usando esta expresión Hrisanthou (1990) describió el aporte de sedimentos a un embalse de Baviera.

Otra propuesta aceptable es la de Dickinson y Rudra (1990) quienes expresan la dependencia del coeficiente con el tiempo de viaje de forma alternativa,

$$D_R = \beta \cdot \gamma \cdot T_v^{-\delta} \quad (6)$$

en la que los parámetros  $\gamma$  y  $\delta$  dependen de la pendiente, disminuyendo cuando ésta aumenta, y  $\beta$  es un coeficiente de ajuste empírico. Otras expresiones se basan en la superficie de la cuenca,  $S_p$ ,

$$D_R = \varepsilon \cdot S_p^{-\lambda} \quad (7)$$

con  $\varepsilon$  y  $\lambda$  como coeficientes, como la de Roehl (1962, en Singh, 1989), en la que  $\varepsilon=0.36$  y  $\lambda=0.2$  cuando  $S_p$  está expresado en  $\text{km}^2$ .

Jansson (1982, § 10.2) destaca la influencia de la vegetación y la intensidad de la lluvia en el cociente de entrega.

La estimación del tiempo de viaje  $T_v$  se debe realizar en función de la velocidad de movimiento del agua en la cuenca. Se ha propuesto una relación sencilla basada en la ecuación del flujo uniforme, aplicable a cada tramo, obteniéndose el tiempo de viaje total como la suma de los tiempos empleados en los distintos tramos, (e.g. Chow y col., 1988, § 5.7). Sin embargo, el flujo superficial del agua en la cuenca no es siempre bajo régimen uniforme. Por ello Dickinson y Rudra (1990) sugirieron una alternativa en función de la ocurrencia de lluvia. En la fórmula de la velocidad del agua en un flujo uniforme, en este caso la de Manning, se substituye el radio hidráulico por un "factor hidrológico",  $hc_i$ , de modo que el tiempo de viaje en un tramo  $i$  cualquiera de la cuenca,  $T_{v_i}$ , será

$$T_{v_i} = \frac{n_i L_i}{S_i^{1/2} hc_i} \quad (8)$$

en la que  $n_i$  es el coeficiente de Manning para el tramo,  $S_i$  su pendiente,  $L_i$  su longitud, y  $hc_i$  el factor hidrológico. Para cualquier recorrido el tiempo de viaje será la suma de los correspondientes tramos.

De esta forma se ha elaborado un modelo compuesto por una estimación de la pérdida de suelo según la ecuación universal de pérdida de suelo (1) con un coeficiente de entrega del sedimento siguiendo la formulación de Dickinson y Rudra (1990), cuyo esquema aparece en la Figura 1.

### Aplicación del modelo

Se ha segmentado la superficie total de las cuencas en unidades elementales cuadradas denominadas celdas de 0.01 km<sup>2</sup> de superficie, mediante el proceso conocido como teselación. De este modo, la información básica del modelo y los resultados parciales y final que se obtengan, estarán recogidos en matrices de igual número de filas y columnas, denominadas mapas, en cuyos nodos se sitúan las celdas cuyo valor numérico se supone representativo de toda su superficie.

Para la estimación de la producción de sedimento se calculan mapas representativos de los factores de la Ecuación 1, de los que se obtendrá una estimación de la pérdida de suelo que se puede producir en dichas celdas. Al no disponer de información suficiente para calcular el factor de prácticas de protección  $P$ , la pérdida de suelo calculada será en realidad  $A/P$ , también llamada erosión potencial.

Multiplicando este resultado por los coefi-

cientes de entrega calculados mediante la Ecuación 6, se obtendrá la cantidad de sedimento producido en cada una de las celdas de las cuencas.

En ausencia de estaciones meteorológicas provistas de pluviógrafos capaces de medir de forma continua la cantidad de agua de lluvia, en este trabajo se ha recurrido al empleo de los datos registrados durante 22 años por un pluviógrafo instalado en Lanjarón, zona de comportamiento climático similar al de la de estudio, situada a 30 km del embalse Cubillas. La aplicación de la Ecuación 2 sobre los mismos permitió calcular el factor climático para cada uno de los años de la serie. Se ajustó una curva de regresión de tipo potencial que relaciona el factor climático anual  $R$  de Lanjarón con la precipitación media anual  $P$ , en mm, consiguiendo un coeficiente de regresión del 78.4 %:

$$R = 417.25 \cdot 10^{-3} P^{1.297} \quad (9)$$

La aplicación de la Ecuación 9 a los valores de precipitación media anual registrados en 25 estaciones interiores y cercanas a la cuenca, recogidos por De León (1989), permitieron obtener una serie de 25 factores climáticos  $R$ , en (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). La estimación del mismo factor en el resto de celdas se realizó mediante interpolación por el método de medias móviles ponderadas por el cuadrado de la distancia (Bosque, 1992, § XIX.4).

Los mapas de suelos y de cubierta vegetal, a escala 1:200.000, de Pérez y Prieto (1980), informan sobre la clase de suelo que existe en cada localización de la cuenca y del aprovechamiento que el hombre hace de él, permitiendo estimar los factores de resistencia a la erosión del suelo o erodibilidad  $K$ , y de cubierta  $C$ , respectivamente.

Se ha asignado a cada clase de suelo de las cuencas un valor del coeficiente  $K$ , siguiendo el criterio de ICONA (1982), en función a su textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad.

El factor de cubierta  $C$  de cada clase hallada en el mapa de cubierta vegetal ha sido estimado a través del método ya usado por ICONA, 1987, según el que dicho factor es función del tipo de cubierta, del porcentaje de recubrimiento de cubierta vegetal y del porcentaje de cubrimiento por la cubierta que está en contacto con el suelo. En el caso de cultivos en rotación, se han hallado medias de los valores del factor  $C$  para cada uno de los cultivos que se suceden en el tiempo.

La topografía de las cuencas ha sido definida mediante las curvas de nivel interiores a ellas, que se representan en las hojas 1009, 1010, 991, 992, 969, 970 del MGN del Servicio Geográfico del Ejército. El factor topográfico de cada una de las celdas de las cuencas ha sido calculado mediante la expresión propuesta por McCool y col. (1987), que fue obtenida por ajuste de valores de erosión medidos en parcelas experimentales. Dado que las características morfológicas de las mismas no son asimilables a las de las celdas, se ha corregido el factor topográfico, en función de la posición relativa que ocupan dentro de la ladera de escorrentía, según el criterio de Foster y Wischmeier (1974) para laderas de pendiente irregular. La necesidad de corrección del factor topográfico, sobre todo en áreas de topografía muy accidentada, es avalada por el trabajo de Govers y Desmet, 1995.

El mapa que representa el coeficiente de entrega ha sido calculado mediante la aplicación de la

Ecuación 6. En ella se puede apreciar la existencia del parámetro  $\beta$  cuya validación se hará necesaria en cada aplicación del modelo. Sin embargo, en este trabajo se ha optado por la aceptación del valor recomendado por Dickinson y Rudra, 1990, y la realización de un análisis de sensibilidad del mismo McCuen y Snyder, 1986, § 10. De este modo se tendrá una aproximación al error introducido en los resultados del modelo al determinar el valor del parámetro de calibración,  $\beta$ .

Los elementos representados en la Figura 1 mediante rectángulos, constituyen la información básica necesaria para la aplicación del modelo propuesto en este trabajo. Después de recopilada, fue transformada a formato digital, depurando los errores mediante el SIG llamado ARC/INFO (ESRI, 1992), para posteriormente ser tratada en el llamado GRASS (DBA, 1991), siguiendo las fases siguientes.

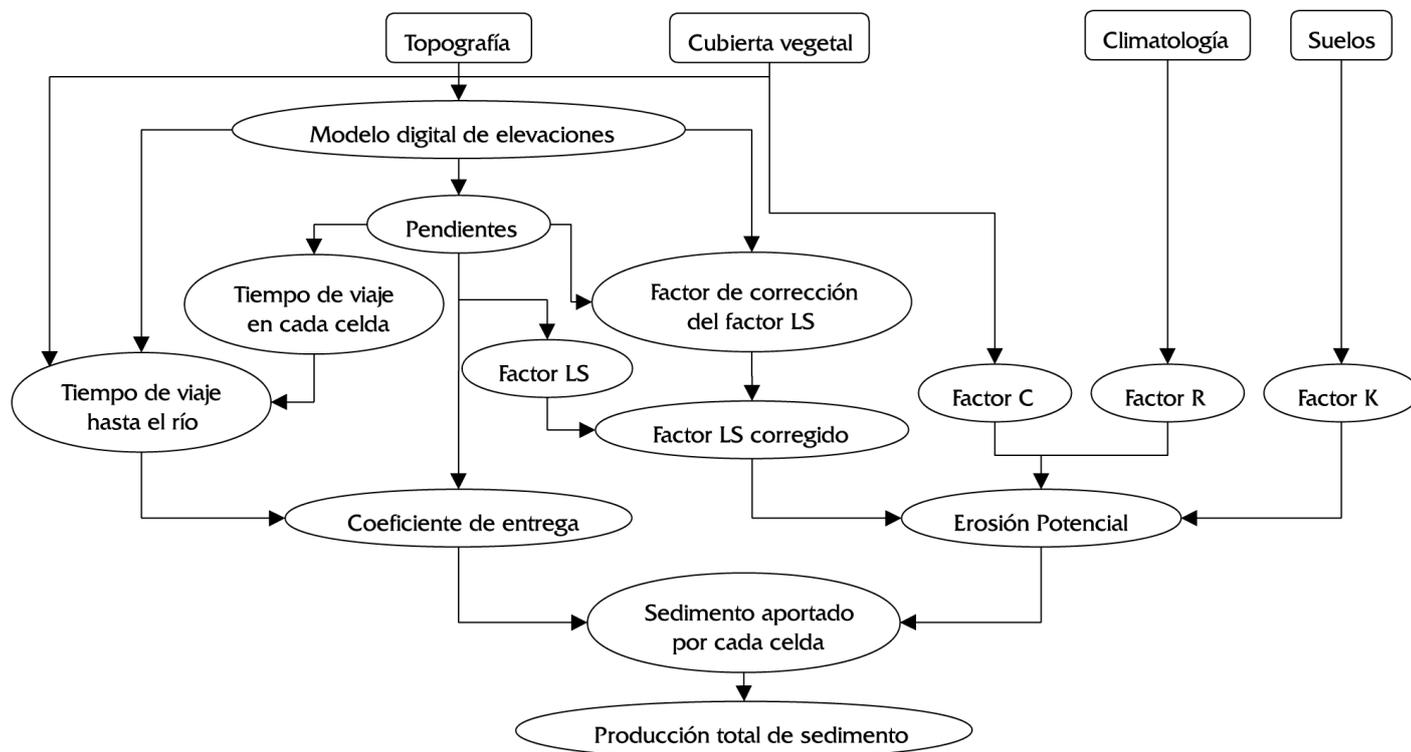


Figura 1. Estructura de aplicación del modelo.

**Resultados y discusión**

Terminado el proceso de introducción y corrección de datos topográficos en GRASS, se generó un modelo de las elevaciones que tienen todas las celdas de las cuencas, en formato digital.

Los factores de la ecuación de pérdida de suelo están representados en los mapas de las Figuras 2, 3, 4 y 5.

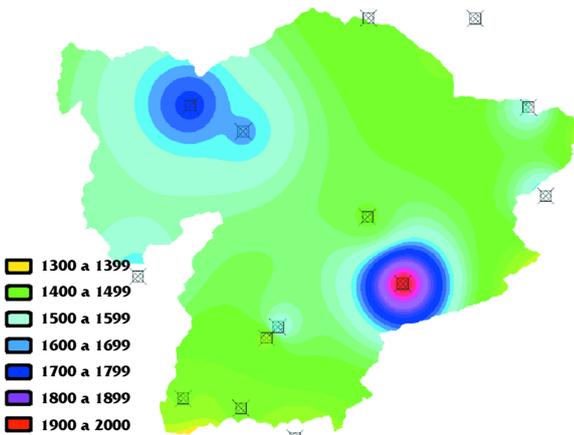


Figura 2. Factor R (MJ mm ha<sub>1</sub> h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)

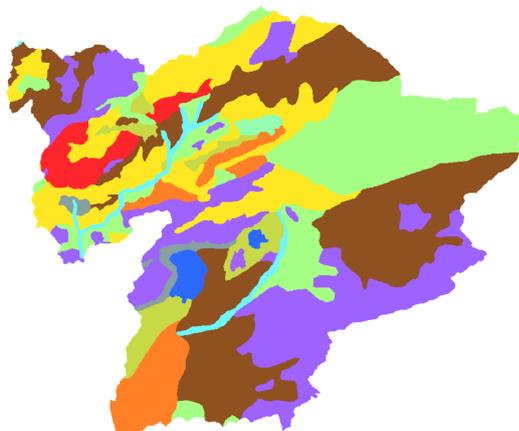


Figura 3. Factor K

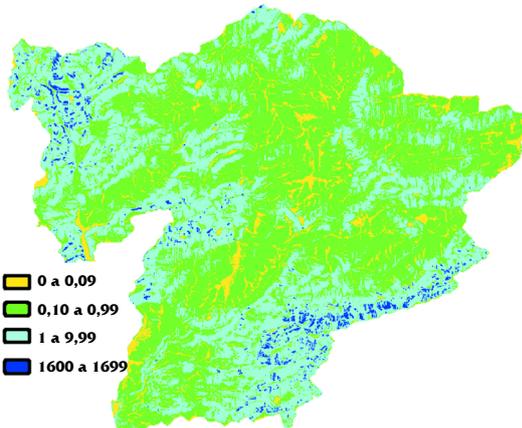


Figura 4. Factor topográfico corregido LS (%)

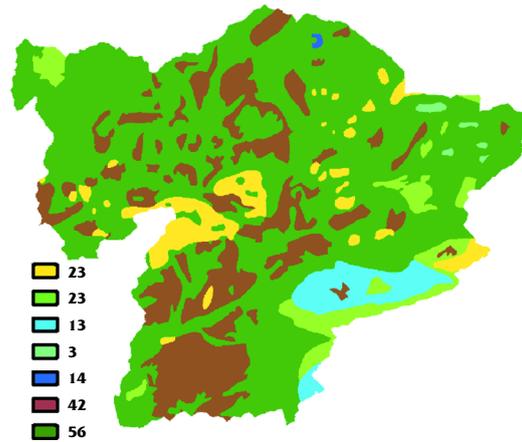


Figura 5. Factor de cubierta C (%).  
Se asigna un valor medio a cada clase.

A partir del modelo de elevaciones se realiza una simulación de los aspectos de la cuenca, Figura 6, para su comparación con fotografía aérea, un estudio de pendientes, Figura 7 y otras operaciones de análisis espacial cuyos resultados parciales son:

- Mapa de erosión potencial en cada celda (Figura 8), que resulta de la aplicación de la Ecuación 1, a los mapas representados en las Figuras 2, 3, 4 y 5.
- Mapa de distribución del coeficiente de entrega dentro de la cuenca, Figura 9.

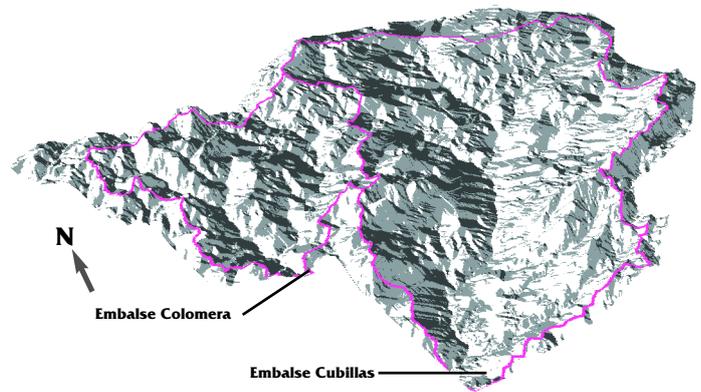


Figura 6. Cuencas aportadoras a los embalse.

Multiplicando los valores de estos dos, se obtiene el mapa de sedimento aportado por cada celda al embalse, Figura 10. Para el cálculo de la producción total de sedimentos (Figura 11) se realizó una simulación de escorrentía, almacenando en cada celda el valor de sedimento que es aportado por todas aquellas situadas aguas arriba, y que se encuentra en el mapa de la Figura 10.

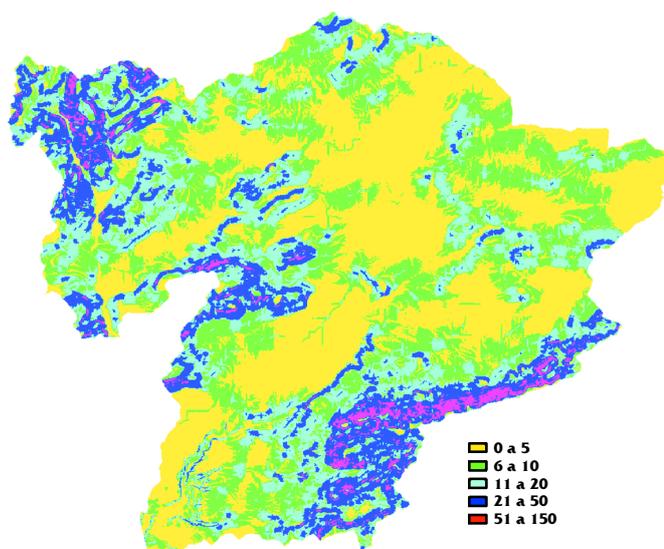


Figura 7. Pendientes (%)

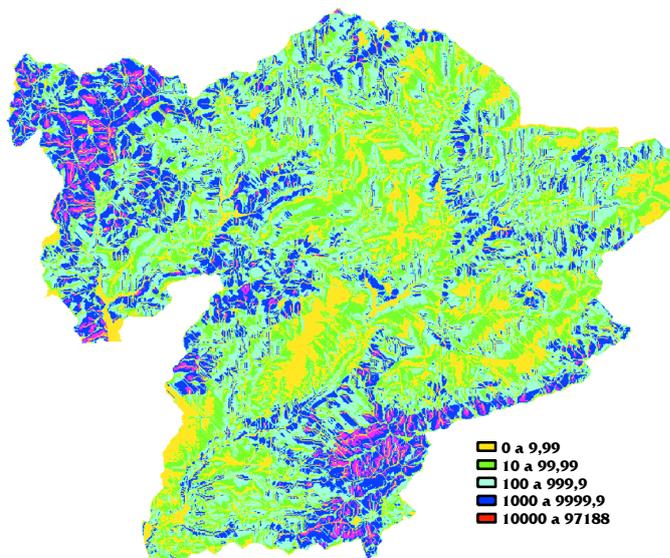


Figura 10. Sedimento aportado por cada celda (t/ha/año).

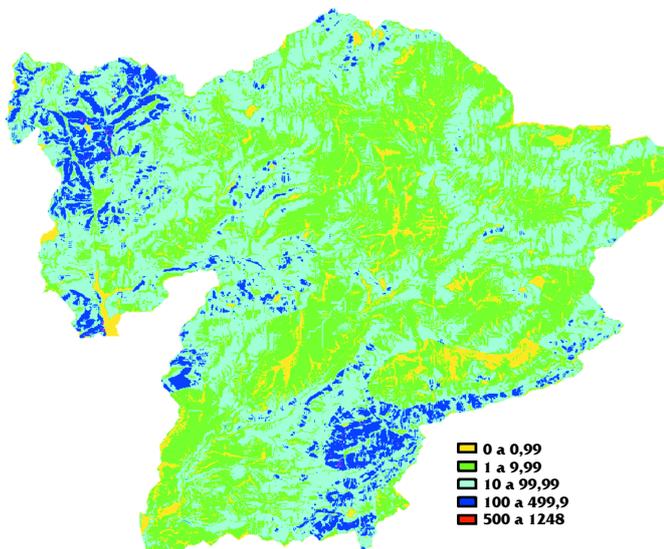


Figura 8. Erosión potencial en cada celda (t/ha/año).

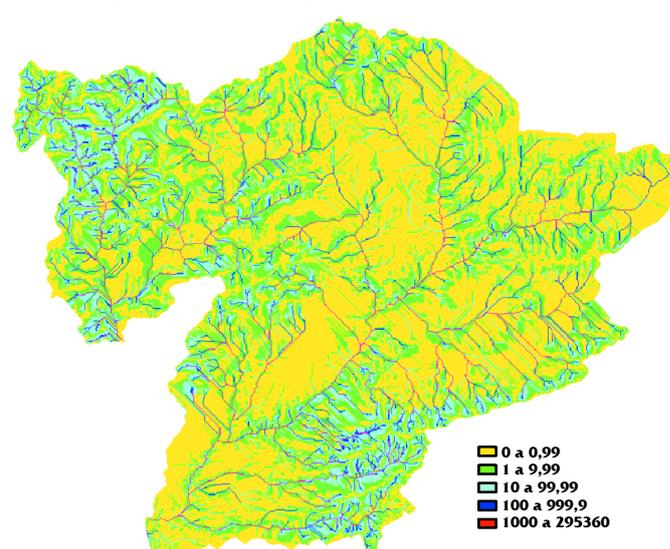


Figura 11. Producción total de sedimentos (t/ha/año).

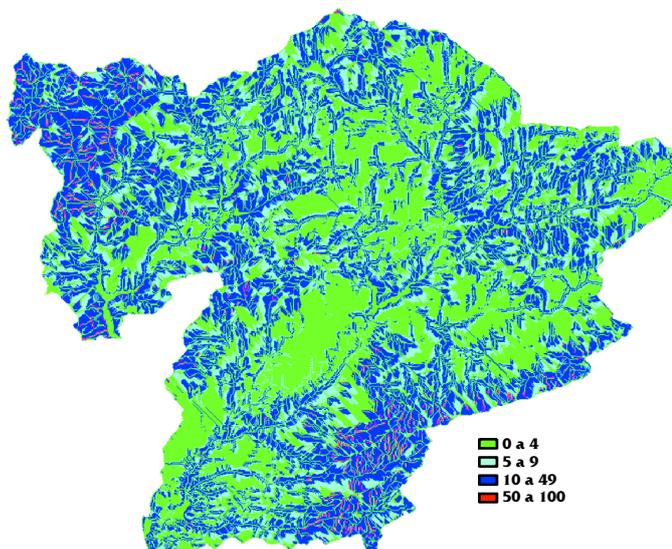


Figura 9. Coeficiente de entrega (%)

Una consulta sobre el valor de las celdas que representan las cerradas de los dos embalses en el mapa de producción total de sedimentos, informa que el río Cubillas recibe 3.35 t/ha/año, y el Colomera, 9.90 t/ha/año.

Masa (1996) estimó por diferencia de curvas batimétricas, la pérdida de capacidad de almacenamiento de Cubillas en 2.26 hm<sup>3</sup>, desde su puesta en funcionamiento en 1954. Desde esta fecha también entró en servicio un túnel de desviación situado aguas arriba del embalse cuya finalidad era evitar ocasionalmente las avenidas con mayores concentraciones de sedimento, que evacuó en 42 años un volumen de sólidos de 6.98 hm<sup>3</sup>. Suponiendo que no existiera el túnel pasaría al embalse un total de 9.24 hm<sup>3</sup>, que disminuido en un 10% por las pérdi-

das de sólidos en suspensión a través del aliviadero, y suponiendo una densidad media de sedimento de 1.3 t/m<sup>3</sup> y una superficie total de la cuenca de 66708 ha, se transforma en una producción de sedimentos media anual de 4.77 t/ha/año, del mismo orden que el calculado.

La diferencia entre el valor estimado a través del modelo y la medida por batimetría puede considerarse despreciable si se compara con los valores que de una manera un poco imprecisa, se citan en IARA (1986). En dicho estudio se usa una ecuación de estimación del aporte de sedimento de una cuenca, o lo que en él se denomina degradación específica  $a_s$ , en t/km<sup>2</sup>/año, en función de las pérdidas de suelo  $A$ , en t/año, y de la superficie de la cuenca  $S_p$ , en km<sup>2</sup>:

$$a_s = 0.36 A S_p^{-0.2} \quad (10)$$

que no es sino la expresión de Roehl (1962, en Singh, 1989) del coeficiente de entrega de sedimentos.

Después de aplicar esta expresión a los datos que aparecen en el informe, se ha determinado en la cuenca del Cubillas una degradación específica de 7.57·10<sup>5</sup> t/año y en la del Colomera de 3.88·10<sup>5</sup> t/año, que confirma el orden de magnitud calculado por el ICONA (1987).

Se ha supuesto un valor único para el parámetro  $\beta$  en la estimación del coeficiente de entrega (6). En la práctica cotidiana será conveniente identificar este parámetro con datos de sedimentación. La dificultad del cálculo del parámetro estriba en la necesidad del conocimiento de series temporales suficientemente largas de sedimento aportado por la cuenca y medido en el punto de vertido al embalse. Para completar la información del modelo se ha efectuado un análisis de sensibilidad con respecto a varios parámetros, representando los cambios que una modificación del valor de cada parámetro produce cuando los otros permanecen constantes. De la relación casi proporcional entre la estimación del sedimento aportado y la variación del parámetro de calibración  $\beta$  (Figura 12), se deduce que para obtener unos buenos resultados será necesario determinar con cierta precisión el parámetro de calibración.

Una disminución del factor de cubierta, producida por regeneración de las parcelas con erosión potencial superior a 100 t/ha/año (Figura 8), cuyo aprovechamiento es susceptible de mejorar desde el punto de vista erosivo, o un aumento de dicho

factor producido por un abandono progresivo de las labores agrarias o por incendios forestales en parcelas con pendientes superiores al 20 % (Figura 7), producen respuestas en la producción total de sedimentos recibidos por los embalses que son representados respectivamente en las Figuras 13 y 14.

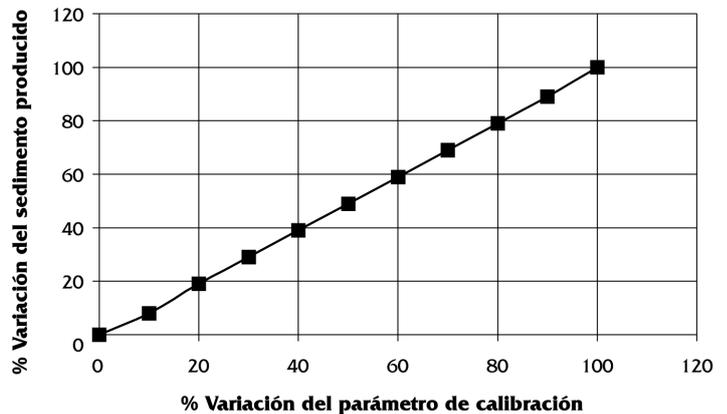


Figura 12. Variación porcentual del aporte de sedimentos respecto a la variación porcentual del parámetro  $\beta$  de calibración del modelo.

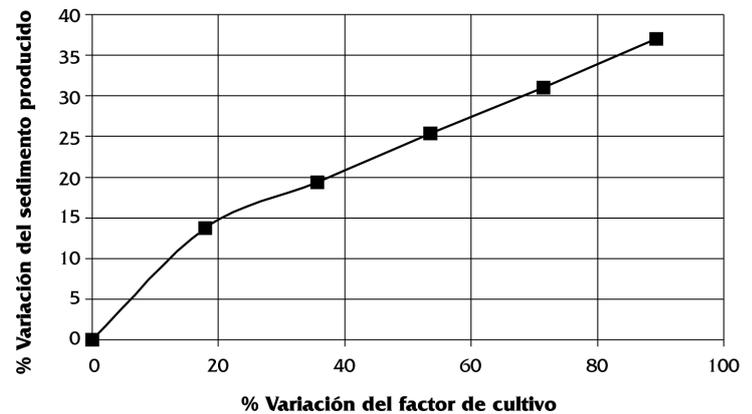


Figura 13. Análisis de sensibilidad de la producción de sedimentos a la variación del factor de cubierta por regeneración de parcelas.

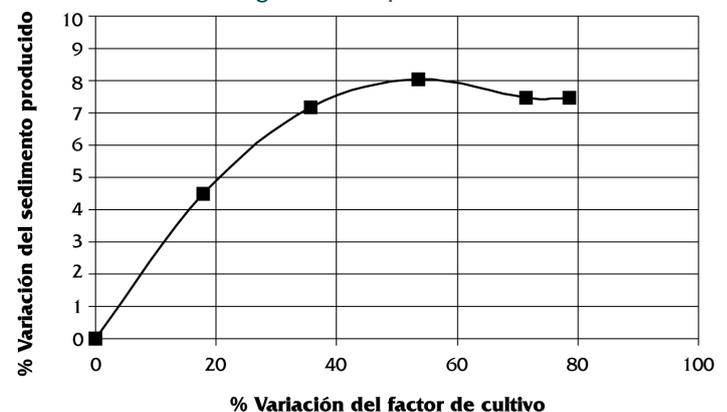


Figura 14. Análisis de sensibilidad de la producción de sedimentos al abandono progresivo de tierras de labor.

Igualmente, una serie de chubascos torrenciales de diversas intensidades, registrados en la estación de Sierra Umbría de Iznalloz al sudeste de la cuenca, harían variar la producción total de sedimentos recibidos por los embalses siguiendo la tendencia representada en la Figura 15.

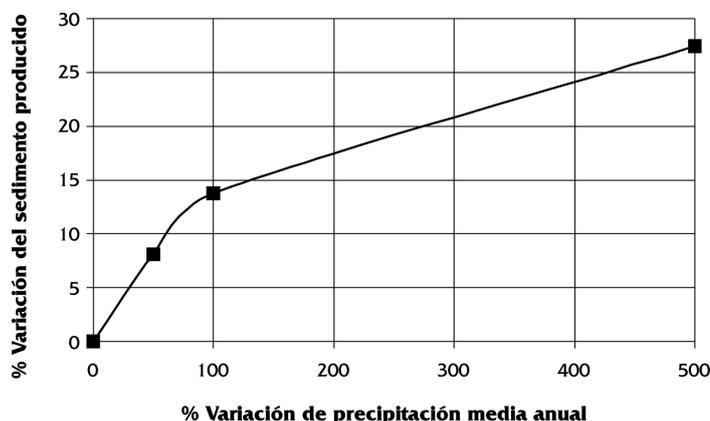


Figura 15. Análisis de sensibilidad de la producción de sedimentos al aumento de la precipitación media anual en Sierra Umbría (Iznalloz)

También se ha establecido un criterio de elección entre la regeneración de las parcelas más susceptibles de mejora en cuanto a protección de cultivos, que puede requerir el uso de unos recursos limitados, o la construcción de sistemas de protección contra la erosión en las zonas adyacentes a los cauces fluviales.

### Uso del modelo en la planificación de la cuenca

La protección del suelo de una cuenca puede ser afrontada desde diferentes puntos de vista. Si se pretende que el embalse no pierda capacidad de almacenamiento por colmatación, podrían emplearse sistemas de protección en las riberas de los cauces fluviales. Por ejemplo el establecimiento de especies vegetales propias de ribera que se autoregeneren, y que por tanto, tengan una larga vida útil simplemente con la precaución de respetar dicho uso. De este modo seguiría produciéndose sedimento, del cual sólo una fracción alcanzaría el río y finalmente el embalse. Quizás sea más efectiva desde el punto de vista ambiental establecer estrategias que protejan las zonas de la cuenca que producen mayor cantidad de sedimento.

Aunque la solución óptima para la protección de los suelos de la cuenca sea una combinación de ambas, se podrían considerar excluyentes si se buscara una medida de urgencia para paliar la posibilidad de colmatación del embalse.

A efectos prácticos puede considerarse que cualquiera de las dos soluciones redundaría en un cambio en alguno de los mapas del modelo y por extensión, en la estimación que ofrece el modelo del sedimento producido. El mapa del factor cubierta (Figura 5) se verá modificado en aquellas zonas de la cuenca donde se instalen los sistemas de protección de suelo, mientras que en las riberas cambia el coeficiente de entrega si se recurre a la protección de los cauces.

Las primeras pueden ser localizadas realizando una consulta en el mapa de la Figura 8 sobre las celdas que presentan mayor nivel de erosión potencial y las segundas estableciendo un corredor alrededor de la red fluvial principal.

Para elegir entre ambas alternativas de protección, se supondrá que la eficiencia de atrape de sedimento de los sistemas de protección de los cauces es del 50%, y que se instalarán en ambas riberas de todos los cauces principales de la red. Por tanto, el mapa del coeficiente de entrega (Figura 9) se ha modificado, imponiendo un valor de 50 en dichas zonas y realizando los dos últimos cálculos expresados en la Figura 1. El nivel de producción de sedimento estimado por el modelo bajo la hipótesis de regeneración de riberas ha disminuido un 14 % respecto al obtenido anteriormente. En cambio, si se localizan las parcelas más susceptibles de protección y en ellas se aumenta el factor de cubierta, habrá que calcular un nuevo mapa de erosión potencial, otro de coeficientes de entrega al haberse modificado el mapa de tiempos de viaje, y finalmente un mapa de sedimento aportado por cada celda, del que se obtiene una nueva estimación del sedimento producido. El cálculo de la sensibilidad del modelo al factor de cubierta C (Figura 13) se ha realizado repitiendo este procedimiento para diferentes niveles de protección de parcelas. La ordena-

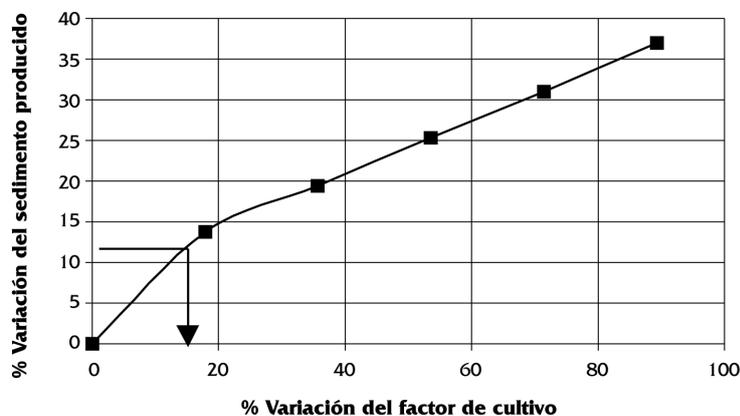


Figura 16. Valor umbral comparativo entre dos alternativas de protección.

da que le corresponde a una disminución del sedimento producido del 14% en esta curva (Figura 16) se puede considerar como el valor umbral comparativo entre ambas alternativas de protección.

Para que una regeneración de parcelas sea más eficiente en la reducción de la producción de sedimento que la protección de riberas supuesta, el factor de cubierta de dichas parcelas debe superar el valor umbral.

## Conclusiones

El uso de modelos sencillos distribuidos en una superficie grande permite explorar las consecuencias de la erosión del suelo. Aunque la información ambiental es aún escasa y de baja calidad, la representación espacial con sistemas de información geográfica permite mejorar su aprovechamiento, lo cual no debe servir como justificación para no ampliar y perfeccionar los bancos de datos ambientales, sino para estimularlos.

Los resultados obtenidos confirman una estimación previa de la sedimentación en los embalses, lo que refuerza las conclusiones extraídas con el modelo de la erosión producida en diferentes situaciones y con varias alternativas de manejo.

## Referencias

- Ascough J.C., Baffaut C., Nearing M.A. y Liu B.Y. 1997. The WEPP Watershed model: I. Hydrology and Erosion. *Trans. ASAE* 40: 921-933.
- Bosque J. 1992. *Sistemas de Información Geográfica*. Rialp. Madrid
- Burrough P.A. y McDonnell R.A. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford. University Press, Oxford.
- Chaves H.M.L. y Nearing M.A. 1991. Uncertainty analysis of the WEPP soil erosion model. *Trans. ASAE* 34:2437-2444.
- Chow V.T., Maidment L.W. y Mays L.W. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw Hill, Nueva York.
- DBA Systems Inc., U.S. Army corps engineers. Construction engineering research laboratory. 1991. GRASS (Geographical Resources Analysis Support System). User manual.
- De León A. 1989. *Caracterización agroclimática de la provincia de Granada*. M.A.P.A., Madrid.
- Dickinson W.T. y Rudra R.P. 1990. *Games: The Guelph model for evaluating effects of agricultural management systems on erosion and sedimentation*. User's manual. Versión 3.01. University of Guelph. School of engineering. Technical Reports 126-86.
- Environmental System Research Institute Inc. 1992. *ARC/INFO Users guide*. Nueva York.
- Foster G.R. y Weissmeier W.H. 1974. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. *Trans. ASAE* 17: 305-309.
- Foster G.R. y Meyer L.D. 1975. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanism. *USDA-ARS-S-40*: 190.
- Govers, G. Y Desmet P.J.J. 1995. A procedure for Calculation of the LS-Factor for USLE-Type Models on Topographically Complex Landscape Units. *Proceedings de Joint European Conference and Exhibition on Geographical Information*. Netherlands, 26-31 de marzo de 1995.
- Govindaraju R.S. 1995. Non-dimensional analysis of a physically based rainfall-runoff-erosion model over steep slopes. *J. Hydrol.* 173: 327-341.
- Hrissanthou, V. 1990. Application of a sediment routing model to a middle european watershed. *Water Resour. Bull.* 26: 801-810.
- IARA. 1986. *Estudio Hidrológico de Andalucía*. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.
- ICONA. 1982. *Mapa de fenómenos de erosión hídrica en España (Península y Baleares)*. E 1/100000. Dirección General de Medio Ambiente e ICONA. Madrid.
- ICONA. 1987. *Mapa de estados erosivos. Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. MAPA Madrid.
- Janson M.B. 1982. *Land erosion by water in different climates*. UNGI Rapport Nr 57. Uppsala University.
- Lane L.J. Nearing M.A. 1989. *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile model documentation*. USDA-Agricultural Research Service.
- Lane L.J., Shirley E.D. y Singh V.P. 1988. Modelling erosion on hillslopes. En: *Modelling Geomorphological Systems*. Anderson M.G. ed. John and Sons.
- Masa M. 1996. Control de la evolución de los sedimentos en el embalse de Cubillas (Granada). *Actas de las V Jornadas Españolas de Presas*. Comité Nacional Español de Grandes Presas. Valencia.
- McCool D.K., Brown L.C., Foster G.R., Mutchler C.K. y Meyer L.D. 1987. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Trans. ASAE* 30: 1387-1396.
- McCuen, R.H. y Snyder, W.M. 1986. *Hydrologic Modeling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Meyer L.D. y Weischmeier W.H. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Trans. ASAE* 12: 754-758.
- Moore, I.D. y Burch, G.J. 1986. Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1294-1298.
- Morgan R.P.C., Morgan D.D.V., y Finney H.J. 1984. A predictive model for the assessment of soil erosion risk. *J. Agric. Engng. Res.* 30: 245-253.
- Morgan, R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poe-

- sen J.W.A., Auerswald K., Chisci G., Torri D., Styczen M.E. y Folly A.J.V. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College. Cranfield University. <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/eurosem/euro3.htm>
- Pérez A. y Prieto P. 1980. Memoria explicativa de los mapas de suelos y vegetación de la provincia de Granada. C.S.I.C. Estación experimental del Zaidín. Granada.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K. y Yoder D.C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Erosion (RUSLE). USDA Agr. Hbk. n° 703.
- Rose C.W. 1985. Develops in soil erosion and deposition models, *Advances in Soil Science*. Vol. 2. Springer-Verlag.
- Sander G.C., Hairsine P.B., Rose C.W., Cassidy D., Parlange J.Y., Hogarth W.L. y Lisle I.G. 1996. Unsteady soil erosion model, analytical solutions and comparison with experimental results. *J. Hydrol.* 178: 351-367.
- Servicio Geográfico del Ejército. 1991. Mapa militar de España escala 1/50000. Hojas n° 1009, 1010, 991, 992, 969, 970. Madrid.
- Singh V.P. 1989. Hydrologic systems. Watershed Modeling. Volumen II. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Simons D.B. y Sentürk F, 1992. Sediment transport technology. Water Resources Publication, Littleton.
- Stocking, M., C. Kalabane, y H. Elwell, 1988. An improved methodology for erosion mapping. *Geogr. Anal.* 70A: 169-180.
- Williams J.R. 1975a. Sediment-yield prediction with Universal Ecuation using runoff energy factor. En: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. ARS-S-40, USDA-Agricultural Research Service: 244-252.
- Williams J.R. 1975b. Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resour.Bull.* 11: 965-974.
- Williams J.R. 1977. Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. *IAHS*, 122: 168-178.
- Wischmeier W.H. y D.D. Smith. 1958a. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains, USDA, Agr. Hbk. 282.
- Wischmeier W.H. y D.D. Smith. 1958b. Rainfall Energy and Its Relation to Soil Loss. *Am. Geophys. Union Trans.* 39:285-291.
- Wischmeier W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses -a guide to conservation planning. USDA, Agric. Hbk. n° 537.
- Woolhiser D.A., R.E. Smith y D.C. Goodrich. 1990. KINEROS, a kinematic runoff and erosion model. USDA-ARS-77.