



## LOS MODELOS DE EROSIÓN: UNA REVISIÓN

*A review of erosion models*

L. C. Alatorre(1) y S. Beguería(2)

(1) Instituto Pirenaico de Ecología, Campus de Aula Dei, Apdo. 202, 50080 Zaragoza, España  
lalatorre@ipe.csic.es

(2) Estación Experimental de Aula Dei, Campus de Aula Dei, 1005, 50059, Zaragoza, España

**Resumen:** La investigación aplicada acerca de la erosión y el transporte de sedimento ha conocido un gran avance gracias al desarrollo de los modelos de erosión. Entre las distintas propuestas existentes se dan grandes diferencias en términos de complejidad matemática, procesos que describen, tratamiento espacial y temporal, demanda de parámetros y tipo de resultados, lo que dificulta la elección del modelo más adecuado para cada caso de estudio. El objetivo de este trabajo es proporcionar una revisión de las diferentes aproximaciones existentes para la modelización de la erosión. Tras realizar una clasificación de los modelos de erosión en función de su estructura matemática se discuten algunos aspectos fundamentales como el tratamiento del espacio y el tiempo o el papel de las tecnologías geográficas (SIG y teledetección) en la modelización. Finalmente se presentan algunos de los modelos de erosión más importantes existentes en la bibliografía especializada, detallándose sus características más importantes.

**Palabras clave:** erosión, transporte de sedimento, modelos de erosión, escala espacial, escala temporal, teledetección, SIG.

**Abstract:** Applied research on soil erosion and sediment transport has experienced great advance due to the development of erosion models. Nowadays, there are many models available which differ in their complexity, the processes modelled, the input parameters and the results. This variability makes it difficult to choose the most appropriate model for a given case study. Issues such as the spatial scale and the temporal resolution are fundamental in defining the kind of results that can be obtained from a given model. The objective of this article is to make a review of current erosion models. A classification of erosion models according to their mathematical structure is provided, and some key aspects are discussed in depth. Finally, a set of models are presented and described in detail. This work should be useful to researchers and technicians facing the problem of choosing the most appropriate erosion model.

**Keywords:** erosion, sediment transport, erosion models, spatial scale, temporal scale, remote sensing, GIS.



## 1. Introducción

La erosión puede definirse como un proceso complejo que incluye el desprendimiento, remoción y transporte de partículas de suelo o material rocoso por parte de los agentes erosivos (agua, viento, gravedad). En un sentido geomorfológico, el término erosión (y los términos asociados de remoción y transporte) se utiliza habitualmente en referencia a una unidad paisajística concreta, como por ejemplo una ladera o una cuenca. Cuando el transporte de las partículas erosionadas se produce más allá de la unidad donde ha tenido lugar la erosión, es costumbre no utilizar el término erosión (o transporte) y pasar a hablar de producción de sedimento.

La erosión y la producción de sedimento se cuentan entre los procesos geomorfológicos de mayor riesgo potencial debido a su gran extensión superficial, y se reconocen como una cuestión clave para la conservación del medio ambiente en el siglo XXI. Se estima que una sexta parte del suelo mundial se encuentra afectada por la erosión hídrica (Walling y Fang, 2003). Las modificaciones ambientales inducidas por el hombre a escala global han sido causa de un incremento espectacular de la erosión y la producción de sedimento en muchas partes del mundo. Alrededor de 1094 millones de hectáreas se encuentran amenazadas por la erosión como consecuencia directa de las acciones humanas (Walling y Fang, 2003). Entre éstas se encuentran la deforestación y remoción de la cubierta vegetal (43%), el sobrepastoreo (29%), la gestión inapropiada de la tierra agrícola (24%) y la sobreexplotación de la vegetación natural (4%).

Las consecuencias de la erosión del suelo y la producción de sedimento tienen lugar tanto en el sitio donde se genera como fuera de él. Uno de los efectos negativos más importantes se presenta en los suelos agrícolas, donde la redistribución y pérdida de suelo, así como la ruptura de la estructura y el descenso del contenido de materia orgánica y nutrientes hace que se reduzca la profundidad cultivable y la fertilidad del suelo, promoviendo la dependencia de los fertilizantes e incluso el abandono de terrenos agrícolas. La producción de sedimento y su depósito, a su vez, alteran el funcionamiento de los ríos y la capacidad de retención de las zonas inundables, realizando el riego de inunda-

ciones. Además, la colmatación de los embalses es un grave problema ambiental ya que acorta significativamente la vida útil de los mismos. Los sedimentos también son una fuente importante de contaminación a través de la fijación de agroquímicos, incrementando los niveles de nitrógeno y fósforo en el agua y causando su eutrofización.

La investigación aplicada sobre la erosión ha conocido un importante avance en los últimos años gracias a la incorporación de modelos de simulación numérica por computador. Estos modelos permiten evaluar espacialmente la ocurrencia de los procesos de erosión, analizar su evolución temporal y simular los efectos de cambios en las variables climáticas y paisajísticas como por ejemplo en el uso del suelo. Muestra del interés sobre los modelos de erosión y producción de sedimento es su adopción por parte de las administraciones públicas, las cuales se han encargado del desarrollo y aplicación de este tipo de modelos. Ese es el caso, por ejemplo, de la Agencia de Protección Ambiental (USEPA) y del Departamento de Agricultura (USDA) de los EEUU. Otras agencias similares en la UE también han desarrollado modelos de erosión, como por ejemplo EUROSEM (Morgan et al., 1998), WATEM/SEDEM (Van Oost et al., 2000; Van Rompaey et al., 2001), RHINEFLOW (Asselman et al., 2003) y PESERA (Kirkby et al., 2000). El desarrollo histórico de los modelos de erosión en la UE difiere del que se ha dado en EEUU, existiendo dos vertientes muy claras (Jetten y Favis-Mortlock, 2006): i) la adaptación de modelos existentes que utilizan en esencia el concepto de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, Wischmeier y Smith, 1978); y ii) el desarrollo de nuevos modelos basados en eventos. Las distintas condiciones de usos del suelo, con grandes monocultivos en EEUU en comparación con la diversidad de usos en la UE, explican que en la UE los modelos diseñados tienden a distribuir espacialmente el territorio mientras que los norteamericanos tienden a agregarlo.

A pesar del desarrollo de nuevas herramientas de modelización, existen dificultades para la utilización de los modelos de erosión, debido en parte a la heterogeneidad de las propuestas existentes. Los distintos modelos se diferencian en aspectos importantes de cara a su aplicación como la naturaleza de los procesos que incluyen, su formaliza-

ción matemática, la representación espacial y temporal, los requerimientos de información y de tiempo de computación, etc. También difieren en el tipo de público al que van orientados, o dicho de otro modo el nivel de conocimientos técnicos que requieren del usuario.

El objetivo principal de este trabajo es hacer una revisión de los distintos tipos de modelos de erosión existentes y de sus principales características, para que pueda servir de guía para los posibles usuarios. La estructura del trabajo es: i) clasificación de los modelos de erosión en función de los distintos procesos que consideran y la forma en que abordan su simulación; ii) implicaciones sobre la representación espacial y temporal; iii) integración entre los modelos de erosión y las tecnologías geográficas (sistemas de información geográfica y teledetección); iv) descripción de algunos de los modelos de erosión más importantes; y v) discusión y conclusiones, donde se hace una síntesis de los aspectos más importantes que se deben considerar en la modelización de la erosión.

## 2. Tipología de los modelos de erosión

La modelización de la erosión se basa en el entendimiento de las leyes físicas y químicas que controlan los procesos de arranque y transporte de partículas de suelo y rocas lábiles. Los diferentes componentes deben ser formalizados matemáticamente para constituir un modelo, y éste debe finalmente ser implementado en forma de aplicación informática que permita su aplicación a diferentes casos de estudio.

En la actualidad existe un elevado número de modelos de erosión, existiendo diferencias en su complejidad, escala y resolución espacial del análisis, procesos que consideran, representación del medio físico y cantidad y tipo de datos que se requieren para su calibración. Otros factores de variación entre modelos que conviene tener en cuenta son: i) la resolución temporal y espacial de los datos de entrada que requiere el modelo; ii) la validez de las hipótesis en las que se basa el modelo; iii) los componentes del modelo o capacidades del modelo; iv) los objetivos de los usuarios, incluyendo la facilidad de uso del modelo; y v) los requerimientos de *hardware*. La elección del

modelo más apropiado para un caso de estudio determinado dependerá de los objetivos que se establezcan y de las características propias del área de estudio, por lo que no se puede hablar de modelos óptimos *a priori*.

Dependiendo de la forma matemática que adopta la descripción de los procesos físicos que se simulan, los modelos de erosión pueden ser clasificados dentro de tres categorías (Merritt et al., 2003): i) empíricos, ii) conceptuales, y iii) de base física (véase Tabla 1). Los modelos empíricos son generalmente los más sencillos, basándose en el análisis estadístico de un conjunto de observaciones. Los modelos conceptuales se basan en la representación del sistema de erosión como una serie interna de almacenamientos entre los que se establecen relaciones matemáticas simplificadas. Los modelos de base física, por último, se basan en las leyes físicas que controlan las relaciones entre los diferentes parámetros y procesos observados. La distinción entre los distintos tipos puede no ser muy clara en ocasiones, ya que un mismo modelo puede presentar una combinación de algunas de las categorías anteriormente mencionadas. Por ejemplo, el modelo IHACRES (Jakeman et al. 1990; Jakeman y Hornberger, 1993) es un híbrido entre empírico y conceptual, ya que siendo su estructura de naturaleza conceptual, el número y configuración de las diferentes áreas de almacenamiento es determinado por un procedimiento estadístico. En su mayor parte, los esfuerzos actuales en la modelización de la erosión se centran en los modelos basados en procesos (conceptuales y de base física), discretizados tanto en el espacio como en el tiempo.

### 2.1. Modelos empíricos

Los modelos empíricos se fundamentan en la utilización de procedimientos de inferencia estadística (fundamentalmente de regresión) para su formulación. Para ello se basan en la acumulación de información cuantitativa a partir de instalaciones experimentales y de monitorización en campo. Los modelos empíricos tienen una orientación fundamentalmente predictiva y son en general de tipo métrico-estático, es decir, no ofrecen una visión dinámica del proceso sino que se orientan a la pre-

dicción de valores promedio a largo plazo. Debido a la utilización de técnicas de regresión, los modelos empíricos son matemáticamente sencillos, adquiriendo generalmente la forma de una ecuación paramétrica (suma y multiplicación de factores). Si bien para la formulación de un modelo empírico se necesita una enorme cantidad de datos, posteriormente su aplicación tiene unos requerimientos de datos y computación menores a los de los modelos conceptuales y físicos. Estas características han hecho que los modelos empíricos sean los más utilizados en la práctica como herramienta de planificación.

Los estudios empíricos tratando de relacionar la pérdida de suelo con distintos factores como la precipitación o las formas de manejo se remontan a los años 30 del siglo XX en EE.UU. La gran mayoría de modelos de erosión de tipo empírico que se utilizan en la actualidad se derivan de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*Universal Soil Loss Equation*, USLE; Wischmeier y Smith, 1978). La USLE evalúa la pérdida de suelo promedio producida en un año por la erosión hídrica por el flujo

laminar y en surcos sobre zonas en donde no hay formación de cárcavas, siendo diseñada para parcelas agrícolas con una superficie de hasta 1 hectárea. La ecuación USLE presenta seis factores, entre los que se incluyen la erosividad de la precipitación (R), la erodibilidad del suelo (K), la topografía (L y S) y los métodos de gestión y de protección del suelo (C y P), adquiriendo una forma multiplicativa:  $A = RKLSCP$  (Fig. 1). En su formulación se utilizaron datos provenientes de parcelas de erosión del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USDA), acumulando más de 10.000 parcelas de datos.

A pesar de su popularidad, los modelos empíricos han sido muy criticados. Al basarse exclusivamente en relaciones estadísticas obtenidas a partir de una base de datos, su extrapolación a otras áreas de estudio o a condiciones diferentes resulta difícil de justificar. La aplicación de los modelos empíricos a casos de estudio con condiciones diferentes requiere de una revisión de los mismos basada en datos empíricos, de forma que una gran parte de la literatura especializada sobre este tipo de modelos

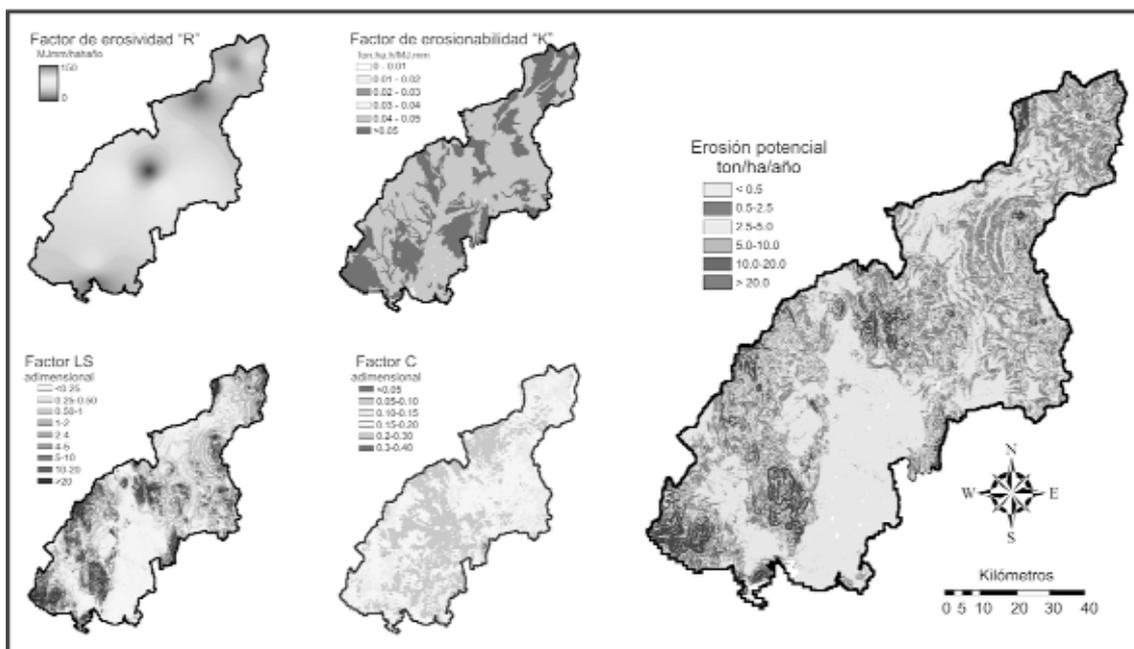


Figura 1. Ejemplo de aplicación de un modelo empírico en un entorno GIS: aplicación del modelo RUSLE a la cuenca del río Mátape (noroeste de México). La figura es adaptada a partir de Sánchez-Andrés et. al., 2007.

Figure 1.

se centra en su adaptación a diferentes áreas geográficas. Asimismo, se les ha criticado por despreciar procesos no lineales dentro del sistema. No obstante, aunque estas observaciones son válidas, la falta de una completa base de datos restringe en muchos casos el uso de modelos más complejos.

Otro aspecto que ha sido criticado de los modelos empíricos es el de emplear suposiciones irreales sobre el medio físico, ya que generalmente se ignora la heterogeneidad espacial y temporal que existe dentro de la unidad de estudio, como por ejemplo la distribución de la precipitación y los tipos de suelo. Tanto la USLE como la mayoría de sus derivados se limitan a la estimación de la erosión bruta, pero no contemplan los procesos de transporte y sedimentación a lo largo de la ladera, o en depresiones, fondos de valle y canales. Además, el hecho de considerar que la erosión puede ocurrir sólo a lo largo de una línea recta de flujo superficial sin la influencia del flujo lateral sobre las laderas por sí mismo restringe la aplicación directa de la USLE y otros modelos empíricos a topografías complejas. Evidencias empíricas demuestran que una gran parte del sedimento producidos en una cuenca de drenaje se deposita dentro de ella, ya sea en laderas cóncavas, en microbarreras producidas por la vegetación, en conos de deyección y en remansos ubicados en el sistema fluvial, hecho que no está presente en la formulación de la USLE. Al estar diseñados para predecir la erosión promedio a largo plazo, los modelos empíricos no son sensibles a los eventos, por lo que no pueden utilizarse para modelar procesos de precipitación-escorrentía.

A pesar de todos los inconvenientes, los modelos empíricos son frecuentemente más usados que los modelos más complejos, ya que pueden ser implementados en situaciones donde el principal limitante es la falta de datos para alimentar al modelo. Además, permiten un primer acercamiento para identificar las causas y las fuentes de los sedimentos erosionados. Lu et al. (2004) advirtieron que particularmente a grandes escalas, los patrones de transferencia de sedimentos y el tiempo de residencia son procesos aún pobremente entendidos, por lo que la predicción de la erosión y la tasa de transferencia de sedimento (ingl. *sediment delivery ratio*, *SDR*) a estas escalas se deben basar en modelos empíricos o conceptuales que son aplicados de forma uniforme en toda la región.

## 2.2. Modelos conceptuales

Los modelos conceptuales tienen como objetivo describir los principales procesos físicos que gobiernan la erosión. Se basan para ello en una conceptualización de los mecanismos subyacentes de arranque y transporte de partículas, y en una representación del sistema de erosión como una serie de almacenamientos temporales de materia interconectados entre sí. Las relaciones de transferencia de masa entre los distintos almacenamientos se establecen mediante ecuaciones matemáticas genéricas (p. ej.: lineal, cuadrática, exponencial), y están controladas por parámetros que deben determinarse mediante calibración a partir de datos observados tales como escorrentía y concentración de sedimento (p. ej. Abbott et al., 1986a y 1986b; Sivapalan et al. 2002). Se puede entender, por tanto, que los modelos conceptuales se sitúan a medio camino entre los modelos de base física y los puramente empíricos.

Los modelos conceptuales se basan en una descripción general de los procesos que ocurren dentro de la cuenca hidrográfica, pero no los detalles específicos que ocurren en las interacciones complejas del proceso de erosión. Debido a la naturaleza de la representación matemática subyacente, los modelos conceptuales son adecuados para describir el comportamiento dinámico del sistema de erosión. Esto les permite proporcionar indicaciones sobre los efectos cualitativos y cuantitativos de los cambios de uso de suelo, sin requerir de grandes bases de datos tanto espacial como temporalmente.

Tradicionalmente, los modelos conceptuales se han basado en una representación espacialmente agregada de la erosión, es decir en la división del espacio en unidades de cálculo irregulares como subcuencas o unidades de características hidrológicas homogéneas (p. ej. Nearing et al., 1994; Arnold, 1996; Marker y Sidorchuk, 2003; Arnold y Fohrer, 2005). Por ello los modelos conceptuales se suelen calificar de *semidistribuidos*. La resolución de la agregación espacial se define de acuerdo con las necesidades de la simulación y con la disponibilidad de datos para la calibración de los parámetros empíricos.

La mayor dificultad asociada a la utilización de modelos conceptuales es la determinación de los valores de los parámetros, ya que estos generalmente no se corresponden con parámetros físicos

mensurables y deben ser ajustados mediante un proceso de calibración. Es necesario establecer un balance entre la complejidad del modelo (número de parámetros) y la mejora que se produce en el grado de ajuste de las predicciones. La utilización de modelos conceptuales complejos, bien sea por la representación de un mayor número de procesos y almacenamientos o por la división del espacio en un número mayor de unidades, resulta en un mayor número de grados de libertad y por tanto puede contribuir a lograr un mejor ajuste a los datos observados durante la fase de calibración. Sin embargo, en numerosas ocasiones en la fase de validación presentan problemas de predicción cuando el número de parámetros es muy elevado en comparación con la información disponible para la calibración. La utilización de modelos conceptuales más simples, en cambio, reduce el número de parámetros a calibrar y resulta en modelos más robustos en los que la incertidumbre asociada a la calibración es menor. Un problema asociado es que en muchas ocasiones se emplean algoritmos de optimización excesivamente simples (p. ej. de gradiente conjugado), capaces de encontrar valores óptimos locales de los parámetros, pero que no permiten explorar exhaustivamente el espacio de parámetros y por lo tanto no permiten evaluar la sensibilidad del modelo ni la incertidumbre asociada a la calibración. Sin embargo, este problema también se da con los modelos de base física, ya que en muchos casos se tiende a sobreajustar los parámetros, mientras que los modelos empíricos tienden a ser mucho más simples en su nivel de parametrización.

No obstante, los modelos conceptuales juegan un papel importante entre los de concepción empírica y física. Aunque los modelos conceptuales tienden a presentar los resultados de forma agregada y proporcionan un escaso nivel de detalle acerca de los procesos internos del sistema, son capaces de describir los procesos fundamentales que gobiernan la erosión. Este es el principal rasgo que distingue los modelos conceptuales de los empíricos, ya que estos últimos se enfocan fundamentalmente a la predicción confiando en las relaciones observadas entre las distintas variables y no proporcionan una descripción dinámica de los procesos.

### 2.3. Modelos de base física

Los modelos de base física se basan en el entendimiento de los procesos físicos de erosión y transporte de sedimento, y su descripción mediante ecuaciones que gobiernan la transferencia de masa, momento y energía. Generalmente, los procesos incorporados en los modelos de erosión de base física incluyen el arranque de partículas por el impacto de las gotas de lluvia y por la tensión de cizalla ejercida por la escorrentía superficial, el transporte por impacto de gotas de lluvia, y el transporte y sedimentación por la escorrentía laminar y concentrada en regueros. Los modelos de base física se desarrollaron a partir de los años 70 del siglo XX, coincidiendo con el aumento de la capacidad de computación numérica. Entre los primeros modelos físicos que se desarrollaron destacan ANSWERS (Aerial Non Point Source Watershed Environment Response Simulation; Beasley et al., 1980), CREAMS (Runoff and Erosion from Agricultural Management System; Knisel, 1980), WEPP (Water Erosion Prediction Project; Nearing et al., 1989), y más recientemente SHETRAN (European Distributed Basin Flow and Transport Modeling System; Bathurst, 2002) y SWAT (Soil and water Assessment Tool; Arnold y Fohrer, 2005).

Debido a que se basan en ecuaciones de validez universal y sus parámetros poseen un significado físico, los modelos de base física pueden en teoría ser aplicados a partir de medidas directas de los valores de los parámetros, sin que sea necesario recurrir a la calibración a partir de registros empíricos. En general, los modelos de base física se basan en una representación espacial distribuida, ya sea en forma de rejilla regular (*grid*) o irregular (*tesseled irregular network*, o TIN), que permite implementar las ecuaciones de conservación de masa y momento mediante diferencias finitas o elementos finitos, respectivamente. Por el mismo motivo, en general requieren de la introducción de una gran cantidad de parámetros, también de forma espacialmente distribuida. Sin embargo, la información utilizada para la calibración de los modelos suele proceder de mediciones puntuales, o en el mejor de los casos de muestreos en rejilla. Los problemas de calibración y sobreajuste del modelo se elevan por tanto en el caso de los modelos de base

física, ya que la incertidumbre en la distribución espacial de los parámetros se propaga al modelo, generalmente amplificando la incertidumbre final de los resultados. Además, debido a la inclusión de relaciones no lineales, los modelos de base física adolecen en ocasiones de problemas de equifinalidad, u obtención de diferentes combinaciones de parámetros que dan lugar a resultados óptimos.

En principio, los modelos de base física no presentan problemas para su extrapolación a áreas geográficas con características diversas, si bien conviene asegurarse al hacerlo de que la descripción de los procesos físicos que se hace en el modelo se adecua a las condiciones de la nueva área de estudio. Debido a que se basan en ecuaciones de validez universal y parámetros con significado físico, permiten la predicción de la erosión bajo diferentes escenarios de clima y de usos de suelo, así como estudiar los efectos de transformaciones en los factores externos tales como el cambio climático.

### 3. Representación espacial y temporal

Los procesos de erosión ocurren en un determinado contexto temporal y espacial. Por ello, uno de los elementos más distintivos de los modelos de erosión se refiere a la representación espacial y temporal de los procesos, frecuentemente referida como *escala* o *resolución*. La utilización del término *escala espacial* puede resultar confusa, puesto que puede referirse tanto a un aspecto cuantitativo (la *escala cartográfica*, o relación entre las dimensiones en el mapa y en la realidad) como cualitativo (la *escala de proceso* o *sistémica*: escala de parcela, ladera, cuenca hidrográfica, región, etc). En cuanto a la representación temporal sucede algo similar, puesto que el término *escala temporal* puede aplicarse tanto a la regularidad del muestro (escala diaria, mensual, anual, etc) como a la manera en que se considera la dimensión temporal (escala de evento, de tiempo continuo, promedio a largo plazo). En este sentido, a lo largo de esta discusión utilizaremos el término *escala* en referencia a las dimensiones del análisis: el tamaño del área de estudio o escala espacial, y la duración del periodo de simulación o escala temporal.

Por otro lado, conviene distinguir la escala de la *resolución*, o grado de detalle en la representación

del espacio y del tiempo. En los modelos más sencillos se hace una representación unitaria o *agregada*, como por ejemplo en el caso de la ecuación USLE que predice una tasa de erosión anual promedio para toda una parcela. Los modelos más complejos subdividen el área de estudio en unidades menores, ya sea en forma de malla regular (formato *raster* o *grid*) o de polígonos irregulares (subcuencas, unidades unitarias, etc). Dado que a escala de cuenca y mayores la topografía es uno de los condicionantes más importantes de la erosión —especialmente para los procesos transporte—, los acercamientos *espacialmente distribuidos* son los más adecuados. Los modelos espacialmente distribuidos plantean sin embargo un número de problemas, debido al incremento dramático de los datos de entrada al requerirse información continua en el espacio. La incertidumbre asociada a la información espacialmente distribuida, generalmente superior a la información puntual o zonal, se propaga a los resultados del modelo. Por otro lado, los resultados del modelo no son independientes de la resolución espacial de la malla o *grid*, como han demostrado diversos autores tanto en la modelización hidrológica (p. ej. Zhang y Montgomery, 1994; Valeo y Moin, 2000) como en la modelización de la erosión (p. ej. Schoorl et al., 2000). Un compromiso entre ambas metodologías son los modelos *semidistribuidos*, los cuales dividen una cuenca en un conjunto de subcuencas o de unidades espaciales.

Los modelos de erosión se caracterizan por operar en un rango de escalas y resoluciones determinadas que en ocasiones no se adecuan a las de los procesos o a las de las observaciones. Resulta entonces preciso realizar operaciones de escalamiento (ingl. *scaling*), es decir, transformar la resolución del análisis para que se adapte a las necesidades de la simulación. Generalmente, al aumentar la escala del análisis (tamaño del área de estudio) es preciso incrementar también la resolución (discretización del área de estudio en unidades individuales), y viceversa. La consideración de la escala y resolución del análisis es un proceso delicado que debe hacerse de forma cuidadosa, puesto que los resultados de la simulación pueden llegar a ser muy sensibles a cambios en las mismas. Además, el proceso de cambio de una escala espacial pequeña (por ejemplo, de parcela) a otra mayor (por ejem-

plo, de ladera) conlleva la aparición de procesos de erosión dominantes que no existían en la escala original. En muchos casos los fracasos en la aplicación de modelos de erosión provienen de incompatibilidades entre la escala del modelo y la escala de los parámetros de entrada, así como de los intentos de escalamiento de los resultados a unidades mayores.

Como es bien conocido, la erosión del suelo presenta una elevada variabilidad entre eventos, lo que dificulta su modelización. Esta variabilidad es consecuencia de la irregularidad espacial y temporal de los factores que controlan la erosión, tales como la intensidad de la precipitación y la infiltración, pero también de la incertidumbre generada por la variabilidad de alta frecuencia de algunos de dichos factores la cual no resulta adecuadamente representada en el modelo, de manera que a la resolución de la simulación tiene el efecto de un elemento estocástico. A largo plazo, la erosión total puede estar dominada por unos pocos eventos extremos.

Ante el problema de la variabilidad temporal los modelos optan por una de dos estrategias: o bien realizar un ejercicio de agregación y ofrecer predicciones globales para un largo plazo de tiempo, o bien optar por una elevada resolución temporal que permita modelizar cada evento. En cualquier caso resulta especialmente importante contar con una base de datos con un largo desarrollo temporal para que la simulación sea capaz de captar estos acontecimientos erosivos. No obstante, los eventos de alta frecuencia también pueden ser significativos para las tasas de erosión a largo plazo. Uno de los desafíos más importantes en la modelización de la erosión es la falta de coincidencia entre las pequeñas escalas espaciales y temporales de las bases de datos y la conceptualización del modelo, los cuales se aplican sobre grandes escalas espaciales y temporales.

Una gran parte de modelos de base física han sido diseñados para trabajar a escala temporal de evento, es decir para la modelización de tormentas erosivas individuales. Para ello se suele utilizar una resolución horaria o incluso mayor. Algunos modelos, sin embargo, recurren a resoluciones menores (como por ejemplo resolución diaria), con las cuales no es posible capturar la variabilidad de la precipitación a lo largo de un evento pero en cambio es posible explorar la estacionalidad y las variacio-

nes de la erosión a largo plazo. Con los avances recientes en la capacidad de cálculo los modelos que originalmente fueron desarrollados para ser aplicados a escala temporal de evento (p. ej. AGNPS, ANSWERS), han sido modificados para ser aplicados de forma continua. Esos modelos se han visto desplazados desde una simulación basada en eventos a una simulación de modo continuo conservando a menudo la capacidad de cambiar de una resolución temporal a otra, por ejemplo, de una resoluciones temporales diarias entre eventos a resoluciones mayores (p. ej. horas, minutos) en el momento en que se produce un evento.

La selección del modelo más adecuado para el estudio de un problema a una determinada escala espacial y temporal implica adoptar una solución de compromiso entre la complejidad del mismo y la calidad de la información disponible. Como regla general, el modelo debe ser lo suficientemente complejo como para incorporar la totalidad de los procesos que controlan el problema a estudiar. Sin embargo, la mayor complejidad del modelo lleva siempre aparejada un elevado número de parámetros, lo que incrementa de manera notable el grado de incertidumbre si la información de partida es de mala calidad o no tiene la resolución espacial y temporal adecuada. Por ello, el mejor modelo será el que permita incluir el mayor número de procesos sin llegar a comprometer el grado de incertidumbre final más allá de un determinado valor aceptable.

#### **4. Modelización de la erosión mediante teledetección y Sistemas de Información Geográfica**

La erosión del suelo se ve influenciada por la heterogeneidad espacial que presentan factores como la topografía, la vegetación, las características del suelo y sus usos, etc. Como se ha discutido en el apartado anterior, los modelos de erosión se distinguen entre otros factores por el tratamiento de la dimensión espacial, existiendo numerosas variantes. Siendo la representación espacial uno de los aspectos más importantes de los modelos de erosión, es inevitable abordar la importancia que han adquirido las tecnologías de adquisición y análisis de información espacial, concretamente la teledetección (TD) y los sistemas de información geográfica (SIG).

Un SIG es un sistema informático diseñado para almacenar y analizar información referenciada geográficamente mediante una proyección y un sistema de coordenadas, y relacionarla con bases de datos no espaciales. Su principal objetivo consiste en apoyar y asistir en la toma de decisiones acerca de problemas complejos de gestión del territorio. En la aplicación de modelos de erosión un SIG puede resultar de ayuda como herramienta auxiliar para el análisis espacial de datos cuantitativos (p. ej., elevación, hidrometeorología) y temáticos (p. ej., litología, tipo de suelo y cobertura). En el caso de modelos que hacen una representación espacial exhaustiva, los SIG se convierten en la plataforma idónea para su implementación. Entre las ventajas de implementar un modelo de erosión en un SIG se encuentran las siguientes: *i)* procesamiento de extensas bases de datos y creación de escenarios; *ii)* capacidad para mostrar la distribución espacial de los resultados; *iii)* visualización de los resultados, tanto de forma estática o cartográfica como dinámica o a lo largo del tiempo, ya sea de toda el área de estudio o de un punto concreto del paisaje.

Hasta este punto, el uso más extenso que se le ha dado a los SIG es el cálculo y predicción de la erosión. La bibliografía contiene numerosos ejemplos de la integración entre herramientas SIG y teledetección y modelos de erosión (p. ej. Dwivedi et al., 1997; Martínez-Casasnovas et al., 2002; Vrieling et al., 2002). Por ejemplo, de Roo et al. (1989) combinaron el modelo ANSWERS con la tecnología de SIG, de Roo (1998) integró los modelos LISEM y LISFLOOD en un entorno SIG, Grunwald y Norton (1999), Bhuyan et al. (2001) y Paringit y Nadaoka (2003) ligaron los modelos AGNPS con un SIG.

Existen diversas estrategias para integrar modelos de erosión y SIG. Pullar y Springer (2000) establecieron tres niveles de integración: *i)* un acoplamiento débil, en el que el SIG se utiliza para la manipulación de la información espacial y ésta debe ser transferida externamente al modelo; *ii)* un acoplamiento estrecho, en el que el SIG proporciona una interfaz para manipular los datos espaciales y para su transferencia directa al modelo; *iii)* y un acoplamiento encajado, en el que modelo se integra completamente como componente del SIG, que actúa de anfitrión. Actualmente la mayor parte de las integraciones de modelos de erosión en entorno SIG corresponden a una de las dos primeras clases.

La integración completa de los modelos de erosión en entornos SIG resulta más problemática, debido a que una gran parte de los paquetes SIG son eminentemente estáticos lo cual dificulta el desarrollo de modelos dinámicos que incorporen la dimensión temporal. Existen sin embargo algunas excepciones, como por ejemplo los sistemas PCRaster (Environmental Modelling Language) y GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), entre otros.

Por su parte, la teledetección es un conjunto de técnicas de observación de la superficie terrestre a partir de sensores aerotransportados o instalados en satélites capaces de ofrecer información en diferentes longitudes de onda (visible, infrarrojo, térmico, microondas, etc). Entre los datos comúnmente extraídos de estas bases de datos, se encuentran los de cobertura del suelo, relieve, suelos, rocas y biomasa, entre otros.

Numerosos estudios han mostrado el potencial de la teledetección como una herramienta para determinar pautas temporales y espaciales de la erosión del suelo (p. ej. Pilesjo, 1992; Haboudane et al., 2002; Metternicht y Gonzalez, 2005). También se han realizado estimaciones del riesgo de la erosión como resultado de la clasificación de los píxeles en porcentaje de suelo desnudo (p. ej. de Jong, 1994; Paringit y Nadaoka, 2003). Por otra parte, la erosión del suelo ha sido estimada de forma empírica utilizando información obtenida mediante teledetección (p. ej. Fargas et al., 1996; Fu et al., 2005). La clasificación de imágenes Landsat se ha utilizado para estimar el factor C de la USLE (p. ej. Millward y Mersey, 1999; Zhang, 1999). La teledetección también se ha utilizado para estudiar los efectos sobre la erosión de la variabilidad espacial y temporal de la vegetación (p. ej. de Jong, 1994; Tateishi et al., 2004). El desarrollo reciente de los SIG y la teledetección han ampliado el número de opciones, como por ejemplo las imágenes hiperespectrales y de alta resolución (Amarsaikhan y Douglas, 2004), o el desarrollo de sistemas de ayuda para la toma de decisiones (MicroLEIS DSS, De la Rosa et al., 2004).

## 5. Descripción de modelos de amplia difusión

A grandes rasgos se pueden identificar dos tipos de modelos: *i)* modelos con una representación

detallada de los procesos de erosión a partir de consideraciones conceptuales y físicas; y *ii*) modelos con una representación simplificada. Con frecuencia este último grupo muestra un elevado grado de empirismo y tiende a operar en un conjunto de resoluciones espacial y temporal amplias. Los modelos conceptuales y de base física son generalmente capaces de operar tanto a resolución de evento como de forma continua, y presentan una representación espacial más detallada. Sin embargo aún son pocos los ejemplos de modelos capaces de simular eventos de tormenta sin minimizar la representación de los procesos que intervienen en la respuesta de una cuenca hidrográfica. Para las agencias encargadas del manejo del suelo y agua, la implementación de modelos complejos se ve limitada por el hecho de que requieren el desarrollo e implementación de tecnología que les permita tener una buena base de datos con una adecuada resolución espacial y temporal, lo cual demanda grandes recursos económicos.

Un gran número de modelos de erosión están basados—al menos parcialmente—en la ecuación USLE (Wischmeier y Smith, 1978). Algunos ejemplos son los modelos AGNPS (Agricultural Non Point Source Pollution, Young et al., 1989), ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulator, Beasley et al., 1989), EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator, Sharpley y Williams, 1990), o SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold, 1996), los cuales pueden clasificarse por ello de modelos semi-empíricos. Entre los modelos que optan por una representación conceptual de la erosión se encuentran KINEROS2 (Kinematic and Runoff Erosion Model, Smith et al., 1995a y b) y EUROSEM (European Soil Erosion Model, Morgan et al., 1998) a escala de pequeña cuenca, o CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems, Knisel, 1995) a escala de gran cuenca. La descripción y comparación de distintos modelos de erosión ha generado abundante bibliografía (p. ej. de Roo, 1996; Jetten et al., 1999 y 2003; Bathurst, 2002; Merritt et al., 2003).

A continuación se describen algunos de los modelos de erosión más importantes, siguiendo aproximadamente el orden cronológico de su desarrollo o primera publicación. En la Tabla 1 se comparan las principales características de los modelos analizados.

### 5.1. USLE

La ecuación USLE (Wischmeier y Smith, 1978) ha sido el modelo de erosión empírico más utilizado. Fue desarrollado para erosión laminar (*inter-rill*) y en regueros (*rill*) basado en un amplio registro (aprox. 10,000 parcelas/año) de datos experimentales en parcelas agrícolas, por lo que su aplicación se limita a superficies de 1 hectárea aproximadamente. Aunque la USLE fue desarrollada en EEUU, ha sido utilizada en todo el mundo (p. ej. Pilesjo, 1992; Bartsch et al., 2002; Sánchez-Andrés et al., 2007). La predicción de la pérdida de suelo anual promedio se obtiene como función de seis factores:

$$A = R K L S C P,$$

donde  $A$  (ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) es la pérdida de suelo promedio;  $R$  (MJ mm ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) es el factor de erosividad de la precipitación;  $K$  (ton ha h ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>) es el factor de erodibilidad del suelo, o la pérdida de suelo por unidad de erosividad de la lluvia y de la escorrentía, medido sobre una parcela de 22.1 m de largo y 1.83 m de ancho, con una pendiente constante del 9%. ;  $LS$  es el factor topográfico que incluye la longitud de la ladera ( $L$ ) y la pendiente ( $S$ ), y representa la razón de pérdida de suelo con respecto a la parcela de 22.1 m y 9% de pendiente;  $C$  es el factor de manejo de suelo y cobertura vegetal, expresado como la razón de pérdida de suelo con respecto a una parcela bajo barbecho continuo;  $P$  es el factor de las medidas de conservación del suelo, expresado como la razón de pérdida de suelo con respecto a un sistema de laboreo en pendiente.

La USLE ha sido modificada y adaptada a muy diversos casos en los últimos 35 años. Algunos ejemplos son la ecuación MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation, Williams, 1975), RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation, Renard et al., 1991 y 1994), ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulator, Beasley et al., 1989), RUSLE-3D (Mitasova et al., 1996; Mitas y Mitasova, 1998) y SLEMSA (Soil Loss Estimation Model for Southern Africa, Elwell, 1981). La historia del desarrollo de la USLE y sus respectivas modificaciones ha sido descrita en Lane et al. (1995).

Tabla 1. Modelos de erosión y transporte de sedimentos (adaptado de Merritt et. al., 2003).

Table 1.

Modelo	Tipo	Escala espacial	Escala temporal	Base de datos	Resultados	Referencia (año)
USLE	Empírico	Ladera	Anual	Alta	Erosión	Wischmeier y Smith, 1978
ANSWERS	Físico	Peq. cuencas	Evento/ continuo	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión, sedimentos, producción de sedimentos	Beasley et. al., 1980
HSPF	Conceptual	Cuenca	Continuo	Alta	Escorrentía, tasa de escorrentía, carga de sedimentos	Johanson et. al., 1980
CREAMS	Físico	Parcela	Evento/ continuo	Alta	Erosión, depositación	Knisel, 1980; Knisel, 1995
KINEROS/ KINEROS2	Físico	Ladera/ Cuenca	Peq. Evento	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Smith, 1981; Smith et. al., 1995a y 1995b; Woolhiser et. al., 1990
EPIC	Físico	Ladera/ Cuenca	Peq. Continuo	Alta	Erosión	Williams et. al., 1983
MMF	Empírico/ conceptual	Ladera/ Cuenca	Peq. Anual	Moderada	Escorrentía, erosión	Morgan et. al., 1984; Morgan, 2001
PESERA	Físico	Ladera/ regional	Continuo	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	Kirkby et. al., 2000
AGNPS	Conceptual	Peq. cuencas	Evento/ continuo	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Young et. al., 1989
IHACRES-WQ	Empírico/ conceptual	Cuenca	Continuo	Baja	Escorrentía, carga de sedimentos	Jakeman et. al., 1990; Jakeman y Hornberger, 1993
THORNES	Conceptual/ empírico	Ladera/ Cuenca	Peq. Anual	Moderada	Escorrentía, erosión	Thornes, 1990
TOPOG	Físico	Ladera	Continuo	Alta	Riesgo de erosión, escorrentía, pico máximo, solutos, producción de sedimentos	CSIRO Land and Water, TOPOG Homepage
WEPP	Físico	Ladera/ Cuenca	Peq. Continuo	Alta	Escorrentía, producción de sedientos, pérdida de suelo	Nearing et. al., 1989; Laflen et. al., 1991
RUSLE	Empírico	Ladera	Anual	Alta	Erosión	Renard et. al., 1991 y 1994
PERFECT	Físico	Parcela	Continuo	Alta	Escorrentía, erosión	Littjeboy et. al., 1992
SWAT	Conceptual	Cuenca	Continuo	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Arnold et. al., 1995
IQQM	Conceptual	Cuenca	Continuo	Moderada	Escorrentía, sedimentos, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno	DLWC, 1995
EROSIÓN 3D	2D-Físico	Cuenca	Evento	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	von Werner, 2000; Schmidt et. al., 1997
LISEM	Físico	Peq. cuencas	Evento	Alta	Escorrentía, sedimentos	de Roo et. al., 1996; de Roo y Jatten, 1999
RUSLE-3D	Empírico/ conceptual	Cuenca	Anual	Moderada	Erosión	Mitasova et. al., 1996; Mitas y Mitasova, 1998
USPED	Empírico/ conceptual	Cuenca	Evento/ anual	Moderada	Erosión, depositación	Mitasova et. al., 1996; Mitas y Mitasova, 1998
SHETRAN	Físico	Cuenca	Evento	Alta	Escorrentía, pico máximo, sedimentos, producción de sedimentos	Wicks y Bathurst, 1996
GUEST	Físico	Parcela	Continuo	Alta	Escorrentía, concentración de sedimentos	Rose et. al., 1997
MIKE-11	Físico	Cuenca	Continuo	Alta	Producción de sedimentos, escorrentía	Hanley et. al., 1998
EUROSEM	Físico	Peq. cuencas	Evento	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	Morgan et. al., 1998
SPL	Empírico/ conceptual	Cuenca	Anual	Moderada	Erosión fluvial, incisión en ríos	Stock y Montgomery, 1999
LASCAM	Conceptual	Cuenca	Continuo	Alta	Escorrentía, sedimentos	Viney y Sivapalan, 1999
WATEM	Conceptual	Cuenca	Anual	Moderada	Erosión	Van Oost et. al., 2000; Van Rompaey et. al., 2001
SEDNET	Conceptual/ empírico	Cuenca	Anual/ continuo	Alta	Sedimentos en suspensión, contribución del flujo superficial, procesos de rills y gullies	Wilkinson et. al., 2004
EMSS	Conceptual	Cuenca	Continuo	Baja	Escorrentía, carga de sedimentos	Vertessey et. al., 2001
STREAM	Conceptual	Cuenca	Evento	Moderada	Escorrentía y erosión	Cerdan et. al., 2002
CASC2D-SED	Físico	Peq. cuencas	Evento/ continuo	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión y sedimentación separando las partículas por tamaños	Rojas, 2002
SEAGIS	Empírico/ conceptual	Cuenca	Anual	Alta	Erosión, producción de sedimentos	DHI, 2003
AGWA	Conceptual/ físico	Cuenca	Continuo	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Burns et. al., 2004

### 5.2. ANSWERS

El modelo ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulator, Beasley et al., 1989), es uno de los primeros modelos espacialmente distribuidos a escala de cuenca. La principal característica de este modelo es que integra dentro de su estructura la ecuación de continuidad de sedimento de Foster y Meyer (1977), y las bases conceptuales para el modelo de enrutamiento del agua desde la ladera de Nearing et al. (1994). ANSWERS ambicionaba llegar a ser una herramienta de gestión, capaz de predecir el efecto de distintos escenarios de uso del suelo y prácticas agrícolas, mediante una descripción de la erosión altamente basada en procesos.

### 5.3. CREAMS

CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems model, Knisel, 1980) es un modelo que predice la escorrentía, la erosión y el transporte de contaminantes en parcelas agrícolas de superficie inferior a cinco hectáreas. El modelo fue desarrollado como una herramienta para evaluar los efectos de diferentes prácticas agrícolas sobre agentes contaminantes transportados por la escorrentía superficial y del agua contenida en el suelo por debajo del nivel de las raíces. El modelo puede operar sobre eventos o de forma continua. En el caso de la forma continua, puede operar sobre largos periodos de tiempo que van desde los dos hasta los 50 años. Aunque CREAMS utiliza varios aspectos de la USLE para la simulación de la erosión laminar (*interril*), evalúa también la erosión en regueros y la sedimentación en el cauce y a lo largo de la ladera, utilizando una aproximación de balance de masas. A este respecto, CREAMS representó un esfuerzo pionero en la simulación de la erosión como la combinación de procesos de arranque, transporte y sedimentación de partículas actuando a diferentes escalas temporales y espaciales.

### 5.4. KINEROS2

El Modelo KINEROS2 (Kinematic Runoff and Erosion Model, Smith et al., 1995b) es un modelo

de base física de tipo semi-distribuido, que desagrega una cuenca hidrográfica en una serie de superficies rectilíneas y canales ensamblados en una estructura topológica. Temporalmente es un modelo basado en eventos, que usa el modelo de infiltración de Smith y Parlange (1978) y la ecuación de onda cinemática como aproximación al enrutamiento de la escorrentía superficial y el flujo de sedimentos.

### 5.5. EPIC

El modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator, Williams et al., 1983) tiene como objetivo la cuantificación de la productividad del suelo. Predice los efectos de distintas estrategias de manejo sobre las dinámicas del agua, los sedimentos, los nutrientes y los pesticidas en una cuenca específica. Simula la escorrentía superficial, el flujo de retorno, la percolación y la evapotranspiración. Trabaja con un intervalo temporal de simulación diario y puede abarcar períodos de entre 1 y 4000 años.

### 5.6. MMF

El modelo MMF (Morgan-Morgan-Finney Model, Morgan et al., 1984; Morgan, 2001) es un modelo agregado en el espacio (trata la parcela como una unidad) y en el tiempo (predice tasas de erosión anuales). Simula la erosión debida al impacto de gotas de lluvia y a la tensión de cizalla de la escorrentía superficial. La capacidad de transporte y la erosión debida al flujo superficial son funciones del caudal y la pendiente.

### 5.7. PESERA

El modelo PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment, Kirkby et al., 2000) proporciona una estimación de base física mas detallada del proceso de la erosión a través del territorio Europeo que otros modelos desarrollados anteriormente, y ha sido desarrollado para dar respuesta a la situación actual del riesgo de erosión en toda Europa. El modelo predice la erosión ya teniendo en cuenta el comportamiento fenológico de cada

cultivo, y por tanto tiene el potencial de responder a los cambios de clima y de la utilización del suelo. Las desventajas del modelo PESERA son el requerimiento de una compleja base de datos. Además el modelo considera una serie de simplificaciones acerca de los procesos simulados lo que limita su adaptación a las circunstancias locales donde se pretenda aplicar. Actualmente el modelo PESERA esta en curso de ser calibrado y validado en distintas resoluciones.

### 5.8. AGNPS

AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution, Young et al., 1989) es un modelo de base física para la simulación de pequeñas cuencas a resolución de evento. Su versión a escala de tiempo continuo se denomina AnnAGNPS (Annualized AGNPS). Posteriormente a su formulación inicial, se han integrado otros modelos que simulan procesos adicionales. AGNPS utiliza una representación del paisaje basada en una matriz de celdas que tiene en cuenta la variabilidad espacial de los elementos del paisaje y en la cual es posible identificar la red de drenaje y la divisoria de aguas. Los componentes físicos y químicos son transportados desde su origen, los cuales se depositan ya sea en el sistema de drenaje o a la salida de la cuenca. Es posible identificar las zonas en donde se produce la carga de contaminantes, así como la ruta por la cual se transporta. Los datos que se usan para la modelación continua se integran al modelo por medio de una base de datos relacional que además puede usarse para la versión del modelo que simula eventos individuales.

### 5.9. WEPP

El modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project, Nearing et al., 1989) es un modelo de base física desarrollado en EEUU de manera conjunta entre el servicio de investigación agrícola, el servicio de conservación del suelo, el servicio forestal del y la agencia de suelos, con el objetivo de reemplazar a la ecuación USLE como herramienta de gestión (Lafren et al., 1991). El modelo fue desarrollado para incorporar los mecanismos principa-

les que controlan la erosión hídrica, calculando tanto la erosión laminar (*interrill*) como la erosión en regueros (*rills*), asumiendo que las tasas de arranque y sedimentación están en función de la capacidad de transporte. El modelo se puede aplicar a tiempo de evento o a tiempo continuo, teniendo una resolución espacial de parcela.

### 5.10. SWAT

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold et al., 1995) procede del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basin, Williams et al., 1985). Es un modelo de simulación a escala de evento diseñado para predecir los efectos de cambios en las condiciones ambientales de una cuenca (clima, vegetación, gestión de embalses, utilización de aguas subterráneas, etc.) sobre la producción de escorrentía, la erosión y el transporte de sedimentos y contaminantes químicos en cuencas grandes (hasta 1500 km<sup>2</sup>). La representación espacial es agregada, ya que el área de estudio se subdivide en unidades más pequeñas con características hidrológicas homogéneas. Puede efectuar simulación continua desde un año hasta cien años, con intervalo temporal diario. El módulo hidrológico se basa en una ecuación de balance de masas, teniendo en cuenta la precipitación, la escorrentía superficial, la evapotranspiración, la infiltración y la escorrentía subterránea. A continuación se aplica la ecuación MUSLE para la cuantificación de la erosión, mientras que para el transporte de sedimento utiliza el concepto de potencia de la corriente (Bagnold, 1977).

### 5.11. EROSION-3D

EROSION-3D (von Werner, 2000) es un modelo de base física para simular eventos de tormenta en pequeñas cuencas hidrográficas. El modelo incluye el arranque de partículas de suelo por la energía de la lluvia y por la escorrentía superficial mediante una ecuación empírica dependiente de coeficientes adimensionales. Posteriormente el modelo calcula el transporte del sedimento generado, la sedimentación y finalmente la erosión neta en cada celda que conforma la cuenca.

Adicionalmente, se calcula la cantidad de escorrentía, la concentración de sedimento y la distribución espacial del tamaño de grano (porcentaje de arcillas y limos).

#### 5.12. LISEM

El modelo LISEM (Limburg Soil Erosion Model, de Roo et al., 1996; de Roo y Jetten, 1999) es espacialmente distribuido y está diseñado para simular la erosión neta a escala de parcela, y fue concebido como herramienta de gestión y planificación. LISEM incorpora dentro de su estructura diferentes procesos como la interceptación de la precipitación, el almacenamiento superficial en pequeñas depresiones, la infiltración, el movimiento vertical del agua a través del suelo, la escorrentía superficial, el flujo en el cauce, el arranque de partículas del suelo por la escorrentía superficial y el transporte de partículas por la escorrentía superficial. LISEM no es capaz de simular la erosión concentrada en regueros y cursos de agua (*rills* y *gullies*). La modelización del arranque de partículas de suelo incluye el efecto de la energía de la lluvia y de la escorrentía superficial.

#### 5.13. EUROSEM

EUROSEM (European Soil Erosion Model, Morgan et al., 1998) es un modelo de base física basado en eventos que predice la erosión del suelo en pequeñas cuencas hidrográficas. Primero simula la erosión sobre una simple pendiente plana o segmento. Subsecuentemente, el segmento se relaciona con la modelización del proceso en toda la ladera. La pérdida de suelo se calcula como una descarga de sedimentos definida como el producto de la tasa de escorrentía y la concentración de sedimentos en el flujo, dando el volumen de sedimento que pasa un punto dado por unidad de tiempo, cuyo cálculo se basa en la ecuación de balance de masas (de Roo et al., 1996). El arranque de partículas por impacto de las gotas de lluvia se deriva de mediciones de cohesión del suelo. La representación espacial en cascada de planos y elementos de los cauces de una cuenca hidrográfica, común a los modelos WEPP, KINEROS2 y EUROSEM, hace

que sea necesario considerar de manera uniforme las propiedades de cada uno de los segmentos, lo que es un inconveniente a la hora de representar cuencas de gran extensión.

#### 5.14. LASCAM

LASCAM (Large Scale Catchment Model, Viney y Sivapalan, 1999) es un modelo conceptual que integra los procesos de arranque y transporte de partículas en una cuenca subdividida en una topología de laderas y cauces interconectados. El modelo utiliza la ecuación USLE para predecir la pérdida de suelo puntual, y posteriormente asume que el transporte del sedimento generado se produce en condiciones limitadas por la capacidad de transporte de la escorrentía. LASCAM se diseñó como una herramienta capaz de modelar los efectos de los cambios de uso de suelo y el clima. El modelo incluye seis parámetros adimensionales que requieren de un proceso de calibración, por lo que es necesario contar con un registro de cargas de sedimento observadas en uno o más puntos de la cuenca.

#### 5.15. SHETRAN

SHESSED/SHETRAN (Bathurst, 2002) es un modelo de base física, espacialmente distribuido, basado en el modelo hidrológico SHE (European Hydrological System, Abbott et al., 1986a y 1986b) y en un modelo de erosión previo (SHESSED, Whicks y Bathurst, 1996). A partir de la simulación hidrológica en rejilla de SHE, SHETRAN simula la erosión por impacto de gotas de lluvia, y el transporte del material erosionado por escorrentía superficial a escala de ladera. Una vez en los cauces, SHETRAN simula los componentes del transporte de carga de fondo junto con el material de entrada procedente de la escorrentía superficial en ladera. En el cauce, el proceso de enrutamiento de los sedimentos parte de la consideración de que cualquier carga de material fino (menor a 0.062 mm de diámetro) puede ser transportada por el flujo, pero para sedimentos gruesos la carga está limitada por el cálculo de la capacidad de transporte.

### 5.16. SEDNET

SEDNET (Sediment River Network model, Wilkinson et al., 2004) es un modelo espacialmente distribuido para estimar el aporte de sedimento desde las laderas, regueros y taludes conectados con cada tramo de la red fluvial. El modelo incluye módulos para la predicción de la erosión laminar, por arroyada concentrada en regueros y la erosión lateral en los taludes del propio río. Para la erosión laminar se utiliza la ecuación USLE, asumiéndose que las laderas sólo aportan sedimento en suspensión. El modelo calcula la razón de aportación de sedimento (ingl. *Hillslope Sediment Delivery Ratio*), o ratio entre la erosión total en la ladera y la cantidad de sedimento en suspensión finalmente aportado a la red fluvial. Para la erosión en regueros el modelo considera el área de contribución, la resistencia del suelo y la densidad, tamaño (sección) y edad de los regueros. La erosión lateral se estima a partir de la altura del talud, la erodibilidad del material, el caudal de 1.58 años de recurrencia y el grado de cubrimiento vegetal de la ribera. El resultado del modelo es una tasa de erosión anual promedio.

El transporte y sedimentación de la carga en suspensión y de fondo se modelizan de forma independiente dentro de la red fluvial. La capacidad de transporte se deriva a partir de la pendiente, las dimensiones del cauce y la velocidad crítica de las partículas. La cantidad de sedimento que no puede ser transportada se deposita en el propio tramo. El sedimento se enruta a lo largo de los distintos tramos de la red fluvial hasta que sale del área de estudio. En embalses y lagos se emplea un submodelo de capacidad de retención (ingl. *trap efficiency*), basado en el trabajo de Brune (1953), que se utiliza para estimar la sedimentación en el vaso del embalse. Se considera que toda la carga de fondo se deposita dentro del embalse, mientras que un porcentaje del sedimento en suspensión puede viajar aguas abajo de la presa. El porcentaje de sedimento en suspensión que queda atrapado dentro del embalse se relaciona estrechamente con el tamaño del mismo y con la entrada media anual de agua.

### 5.17. STREAM

El modelo STREAM (Sealing Transfer Runoff Erosion Agricultural Modification, Cerdan et al.,

2002) es distribuido en el espacio pero agregado en el tiempo. Está considerado como un sistema experto en el cual se definen categorías de acuerdo con las características de diferentes regiones dentro de la cuenca objeto de estudio, definidas por los suelos y los usos del suelo. Cada región se clasifica, y de acuerdo con tablas preestablecidas se determina la interceptación, la infiltración y el almacenamiento superficial. Posteriormente se calcula la escorrentía y la erosión para cada región. La escorrentía y los sedimentos se acumulan para cada evento de acuerdo con una red de drenaje generada a partir de la topografía y los surcos de labranza.

### 5.18. CASC2D-SED

CASC2D-SED es un modelo de base física y espacialmente distribuido desarrollado en la Universidad Estatal de Colorado, EEUU (Julien y Saghafian, 1991 y 1995). El modelo simula la respuesta hidrológica de una cuenca durante un evento de tormenta, y la erosión y sedimentación a lo largo de la ladera separando las partículas por tamaños. El sedimento es transportado de celda a otra mediante la ecuación de difusión en dos dimensiones. Una descripción de este modelo puede encontrarse en Rojas (2002).

## 6. Discusión y conclusiones

Puede decirse que los modelos de erosión son adecuados o no en función del nivel de adaptación a los objetivos que motivaron su diseño y a las limitaciones (de datos, etc.) existentes. La aplicación de un modelo determinado a un caso de estudio concreto, sin embargo, se ve limitada por la disponibilidad de datos, de manera que no siempre es posible utilizar el modelo más adecuado en función de sus características (procesos, escalas espacial y temporal, resolución, etc). Por ejemplo, los modelos de base física son más apropiados para escala pequeñas, siendo sin embargo difíciles de aplicar regionalmente debido a que exigen una alta disponibilidad de datos que a menudo no existen o son costosos de generar para zonas de estudio extensas. A modo de regla general puede decirse que los tres grandes tipos de modelos (empíricos, conceptuales y de base física) representan una escala creciente

en cuanto a complejidad y requerimiento de datos, por lo que los dos primeros tipos han sido utilizados con preferencia para estudios de tipo regional.

La tendencia actual en la modelización de la erosión parece ser hacia el desarrollo de modelos físicos de creciente complejidad. En relación con esto, muchos trabajos concluyen resaltando la necesidad de bases de datos más complejas para poder resolver los problemas de calibración que los modelos plantean. Curiosamente, en este sentido poco ha cambiado la situación desde los inicios de la modelización de la erosión hace varias décadas, lo que nos lleva a preguntarnos si esta evolución nos conduce realmente a responder las cuestiones que plantea el estudio y la predicción de la erosión. No cabe duda de que la investigación puramente modelizadora es altamente interesante para el conocimiento de la erosión. Sin embargo, desde un punto de vista aplicado parece necesario recomendar que se abandonen planteamientos del tipo “hasta dónde podemos llegar con el modelo” en favor de otros del tipo “qué es realmente lo que necesitamos”. En general, las preferencias de los investigadores reflejan dos puntos de vista: énfasis en los procesos que son

simulados o en los resultados finales (predicción de la erosión). En este sentido, el tipo de resultados que se espera obtener del uso de un modelo de erosión es el factor determinante a la hora de decidirse por un tipo de modelo u otro (Fig. 2). Si el objetivo se inclina por comprender los procesos y su interacción temporal y espacial, será necesario recurrir a un modelo de base física. En cambio, si el propósito es únicamente obtener una estimación de la erosión, se podrá optar por recurrir a modelos conceptuales o empíricos. En este caso, la disponibilidad o no de datos de calibración (en forma de tasas de erosión, series temporales de exportación de sedimento, etc) condicionará la elección hacia los modelos empíricos o los conceptuales. Finalmente, el tipo de modelo condicionará aspectos como la resolución espacial y temporal, o el tamaño del área de estudio.

El desarrollo de un modelo de erosión para cumplir unos objetivos concretos no es fácil, pero la elección de un modelo para su aplicación a un caso de estudio particular tampoco resulta tarea sencilla. El número de factores a tener en cuenta es muy elevado, al igual que el número de modelos existentes, y resulta difícil conseguir una visión de

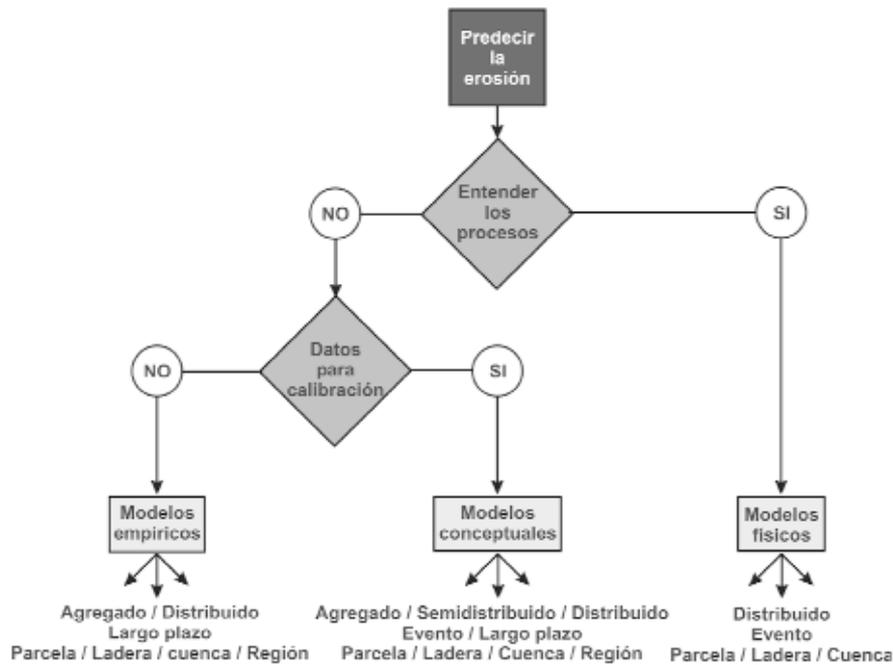


Figura 2. Diagrama de decisión para seleccionar un modelo.

Figure 2.

conjunto de las distintas opciones. En este trabajo hemos revisado un conjunto de modelos de erosión de amplia difusión y representativos de las distintas aproximaciones existentes, y se han discutido varios aspectos fundamentales de los mismos como son el tratamiento de las dimensiones espacial y temporal, sus requerimientos de datos y los principales problemas para su aplicación. Sin pretender ser una guía para la elección del modelo más adecuado para cada caso concreto, esta información debe servir para establecer elementos de comparación entre los distintos modelos de erosión, y se espera contribuya a fomentar la discusión y la comparación entre distintas aproximaciones.

### Agradecimientos

A la financiación del proyecto PROBASE (CGL2006-11619/HID). Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), México, por la beca otorgada a L.A.C.

### Referencias bibliográficas

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. & Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, SHE, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87, 45–59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. & Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, SHE, 2: structure of a physically-based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87, 61–77.
- Amarsaikhan, D. & Douglas, T. (2004). Data fusion and multi-source image classification. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3529–3539.
- Arnold, J.G. (1996). SWAT: Soil and Water Assessment Tool / User's Manual. USDA–ARS.
- Arnold, J.G. & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19 (3), 563–572.
- Arnold, J.M., Williams, J.R. & Maidment, D.R. (1995). Continuous-time water and sediment routing model of large basins. *J. Hydraulic. Eng.*, 121 (2), 171–183.
- Asselman, N.E.M., Middelkoop, H. & Van Dijk, P.M. (2003). The impact of change in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine. *Hydrological Processes*, 17, 3225–3244.
- Bagnold, R.A. (1977). Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, 13, 303–312.
- Bartsch, K.P., Van Miegroet, H., Boettinger, J. & Bobrowolski, J.P. (2002). Using empirical erosion models and GIS to determine erosion risk at Camp Williams, Utah. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57 (1), 29–36.
- Bathurst J.C. (2002). Physically-based erosion and sediment yield modelling: the SHETRAN concept. In: *Modelling erosion, sediment transport and sediment yield, IHP-VI Technical Documents in Hydrology* (W. Summer & D.E. Walling, eds.). UNESCO, Paris, 60.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F. & Monke, E.J. (1980). ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of ASAE*, 23 (4), 938–944.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F. & Monke, E.J. (1989). ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of ASAE*, 23 (4), 938–944.
- Bhuyan, S.J., Marzen, L.J., Koelliker, J.A., Harrington, J.A. & Barnes, P.L. (2001). Assessment of runoff and sediment yield using remote sensing, GIS and AGNPS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57 (6), 351–363.
- Brune, G.M. (1953). Trap efficiency of reservoirs. *American Geophysical Union Transactions*, 22, 649–655.
- Burns, I.S., Scott, S., Levick, L., Hernandez, M., Goodrich, D.C., Miller, S.N., Semmens, D.J. & Kepner, W.G. (2004). *Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) – A GIS-Based Hydrologic Modeling Tool: Documentation and User Manual Version 1.4*. <http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/>.
- Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A. & Le Bissonnais, Y. (2002). Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff and erosion model stream (sealing transfer runoff erosion agricultural modification). *Catena*, 46, 189–205.
- CSIRO TOPOG Home page, <http://www.clw.csiro.au/topog/intro/intro.html>.
- de Jong, S.M. (1994). *Applications of Reflective Remote Sensing for Land Degradation Studies in a Mediterranean environment*. PhD Dissertation Thesis, Nederlands Geografische Studies 177, Utrecht (Netherlands), 179 pp.
- De la Rosa, R., Mayol, F., Diaz-Pereira, E., Fernandez, M. & de la Rosa, D. (2004). A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection with special reference to the Mediterranean region. *Environmental Modelling & Software*, 19, 929–942.
- de Roo, A.P.J. (1996). Soil erosion assessment using GIS. In: *Geographical Information Systems in Hydrology* (V.P. Singh & M. Fiorentino, eds.). Kluwer (Netherlands), 339–356.
- de Roo, A.P.J. (1998). Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS. *Hydrological Processes*, 12 (6), 905–922.
- de Roo, A.P.J. & Jetten, V.G. (1999). Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. *Catena*, 37, 477–493.
- de Roo, A.P.J., Hazelhoff, L. & Burrough, P.A. (1989). Soil erosion modelling using “ANSWERS” and geographical information systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14, 517–532.
- de Roo, A.P.J., Wasseling, C.G., Cremers, N.H.D.T., Verzaandvoort, M.A., Ritsema, C.J. & Oostinde, K. (1996).

- LISEM – A physically based model to simulated runoff and soil erosion in catchments: model structure. In: *Geomorphic hazards* (O. Slaymaker, ed.). John Wiley, New York.
- DHI, (1999). *Soil Erosion Assessment Using GIS Version 1.0*. Documentation and using guide, February 1999.
- DLWC (1995). *Integrated Quantity–Quality Model (IQQM), Reference Manual*. DLWC Report No. TS94.048, NSW, Parramatta (Australia).
- Dwivedi, R.S., Kumar, A.B. & Tewari, K.N. (1997). The utility of multi–sensor data for mapping eroded lands. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (11), 2303–2318.
- Elwell, H.A. (1981). A soil loss estimation technique for southern Africa. In: *Soil Conservation: Problems and Prospects* (R.P.C. Morgan, ed.). John Wiley, Chichester (UK), 281–292.
- Fargas, D., Martínez, J.A. & Poch, R.M. (1996). Identification of critical sediment sources areas at regional level. *Phys. Chem. Earth*, 22, 355–359.
- Foster, G.R. & Meyer, L.D. (1977). Soil erosion and sedimentation by water: an overview. In: *Proceedings of the National Symposium on Soil Erosion and Sedimentation by Water* (ASAE, ed.). CSA, Illinois, Chicago (USA), 1–13.
- Fu, B.J., Zhao, W. W., Chen, L. D., Zhang, Q. J., Lü, Y. H., Gulinck, H. & Poesen, J. (2005). Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: a case study in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 16 (1), 73–85.
- Grunwald, S. & Norton, L.D. (1999). An AGNPS–based runoff and sediment yield model for two small watersheds in Germany. *Transactions of ASAE*, 42 (6), 1723–1731.
- Haboudane, D., Bonn, F., Royer, A., Sommer, S. & Mehl, W. (2002). Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally based information and digital geomorphometric attributes. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3795–3820.
- Hanley, N., Faichney, R., Munro, A. & Shortle, J.S. (1998). Economic and environmental modelling for pollution control in an estuary. *Journal of Environmental Management*, 52, 211–225.
- Harmon, R.S. & Doe, W.W. (2001). *Landscape Erosion and Evolution Modelling*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York (USA), 540 pp.
- Jakeman, A.J. & Hornberger, G.M. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall–runoff model?. *Water Resources Research*, 29 (8), 2637–2649.
- Jakeman, A., Littlewood, I. & Whitehead, P. (1990). Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology*, 117, 275–300.
- Jetten, V. & Favis–Mortlock, D. (2006). Erosion modelling in Europe. In: *Soil Erosion in Europe* (J. B. & Jean Poesen, eds.). Wiley & Sons, Chichester (UK), 695–716.
- Jetten, V., de Roo, A. & Favis–Mortlock, D. (1999). Evaluation of field–scale and catchment–scale soil erosion models. *Catena*, 37, 521–541.
- Jetten, V., Govers, G. & Hessel, R. (2003). Erosion models: quality and spatial predictions. *Hydrological Processes*, 17, 887–900.
- Johanson, R.C., Imhoff, J.C. & Davis, H.H. (1980). *User's Manual for the Hydrologic Simulation Program - FORTRAN (HSPF)*. Version No. 5.0. EPA-600/9-80-105. U.S. EPA Environmental Research Laboratory, Athens, GA.
- Julien, P.Y. & Saghaian, B.L. (1991). *CASC2D Users Manual – A Two Dimensional Watershed Rainfall–Runoff Model*. Colorado State University, Fort Collins, Colorado (USA), 66 pp.
- Julien, P.Y. & Saghaian, Y. (1995). Raster based hydrologic modelling of spatial varied surface runoff. *Water Resource Bulletin*, 31 (3), 523–536.
- Kirkby, M.J., Le Bissonais, Y., Coulthard, T.J., Daroussin, J. & McMahon, M.D. (2000). The development of Land Quality Indicators for Soil Degradation by Water Erosion. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81, 125–136.
- Knisel, W.G. (1980). *CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*. USDA Conservation Research Report no. 26., U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 640pp.
- Knisel, W.G. (1995). *CREAMS: A Field–Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*. In: *Mathematical and statistical methods* (Knisel & G. Walter, eds.). USDA, Washington (USA), 600 pp.
- Lafren, J.M., Lane, L.J. & Foster, G.R. (1991). WEPP: A new generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 34–38.
- Lane, L.J., Nichols, M.H. & Paige, G.B. (1995). Modeling erosion on hillslopes: concepts, theory and data. In: *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'95)* (P. Binning, H. Bridgman & B. Williams, eds.). University of Newcastle, Newcastle, Perth (Australia), 1–7.
- Littleboy, M., Silburn, D.M., Freebairn, D.M., Woodruff, D.R., Hammer, G.L. & Leslie, J.K. (1992). Impact of soil erosion on production in cropping systems. I. Development and validation of a simulation model. *Aust. J. Soil Res.*, 30, 757–774.
- Lu, H., Moran, C., Prosser, I. & Sivapalan, M. (2004). Modelling sediment delivery ratio based on physical principles. In: *IEMSS 2004 International Congress: "Complexity and Integrated Resources Management"* (C. Pahl–Wostl, S. Schmidt & T. Jakeman, eds.). International Environmental Modelling and Software Society, Osnabrueck (Germany), 600 pp.
- Marker, M. & Sidorchuk, A. (2003). Assessment of gully erosion process dynamics for water resources management in a semiarid catchment of Swaziland (Southern Africa). In: *Erosion Prediction in Ungauged Basins (PUBs): Integrating Methods and Techniques* (D.H. de Boer, W. Froehlich, T. Mizuyama & A. Pietroniro, eds.). IAHS, Sapporo (Japan), 188–198.
- Martínez–Casasnovas, J.A., Ramos, M.C. & Ribes–Dasi, M. (2002). Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. *Geoderma*, 105 (1–2), 125–140.

- Merritt, W.S., Letcher, R.A. & Jakeman, A.J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18, 761–799.
- Metternicht, G.I. & Gonzalez, S. (2005). FUERO: foundations of a fuzzy exploratory model for soil erosion hazard prediction. *Environmental Modelling & Software*, 20, 715–728.
- Millward, A.A. & Mersey, J.E. (1999). Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena*, 38 (2), 109–129.
- Mitas, L. & Mitasova, H. (1998). Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resource Research*, 34, 505–516.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M. & Iverson, L.R. (1996). Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10 (5), 629–641.
- Morgan, R.P.C. (2001). A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan–Finney model. *Catena*, 44, 305–322.
- Morgan, R.P.C., Morgan, D.D.V. & Finney, H.J. (1984). A predictive model for the assessment of erosion risk. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 30, 245–253.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D. & Styczen, M.E. (1998). The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 527–544.
- Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J. & Finkner, S.C. (1989). A process-based soil erosion model for USDA: water erosion prediction project technology. *Transactions of ASAE*, 32, 1587–1593.
- Nearing, M.A., Lane, L.J. & Lopez, J.L. (1994). Modelling soil erosion. In: *Soil Erosion: Research Methods* (R. Lad, ed.). CRC Press, New York (USA), 127–156.
- Paringit, E. & Nadaoka, K. (2003). Sediment yield modelling for small agricultural catchments: Landcover parameterization based on remote sensing data analysis. *Hydrological Processes*, 17, 1845–1866.
- Pilesjo, P. (1992). *GIS and Remote Sensing for Soil Erosion Studies in Semi-arid Environments*. PhD thesis, Institutioner, Avhandlingar CXIV, Meddelanden fran Lunds Universitets Geografiska, Lunds, Sweeden, 203 pp.
- Pullar, D. & Springer, D. (2000). Towards integrating GIS and catchment models. *Environmental Modelling & Software*, 15, 451–459.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. & Porter, J.P. (1991). RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, January–February, 30–33.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Yoder, D.C. & McCool, D.K. (1994). RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future. *Journal of Soil and Water Conservation*, (May–June), 213–220.
- Rojas, R.S. (2002). *GIS-based Upland Erosion Modelling, Geovisualization and Grid Size Effects on Erosion Simulations with CASC2D–SED*. Ph.D. Dissertation Thesis, Colorado State University, Colorado (USA), 124 pp.
- Rose, C.W., Coughlan, K.J., Ciesiolka, L.A.A. & Fentie, B. (1997). Program GUEST (Griffith University Erosion System Template), a new soil conservation methodology and application to cropping systems in tropical steeplands. *ACIAR Technical Reports*, 40, 34–58.
- Sánchez-Andrés, R., Sánchez-Carrillo, S., Garatuza-Payán, J. & Alatorre, L.C. (2007). *Biofísica, socioeconomía y degradación del suelo en la cuenca del Río Mátape*. Ed. Publison, Cd. Obregón (México), 265 pp.
- Schmidt, J., Werner, M.v. & Michael, A. (1997). Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands. *Catena*, 37, 449–456.
- Schoorl, J.M., Sonneveld, M.P.W. & Veldkamp, A. (2000). Three dimensional landscape process modelling: the effect of DEM resolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 1025–1034.
- Sharpely, A.N. & Williams, J.R. (1990). EPIC: Erosion/Productivity Impact Calculator: Model Documentation. Model Documentation, USDA–ARS Technical Bulletin No. 1768.
- Sivapalan, M., Jothityangkoon, C. & Menabde, M. (2002). Linearity and non linearity of basin response as a function of scale: discussion of alternative definitions. *Water Resources Research*, 38 (2), 4.1–4.5.
- Smith, R. E. & Parlange, J.Y. (1978). A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resources Research*, 3, 533–538.
- Smith, R.E. (1981). A kinematic model for surface mine sediment yield. *Transactions of the ASAE*, 1508–1514.
- Smith, R.E., Goodrich, D.C. & Quinton, J.N. (1995a). Dynamic, distributed simulation of watershed erosion: the KINEROS2 and EUROSEM models. *Journal of Soil and Water Conservation*, 50 (5), 517–520.
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A. & Unkrich, C.L. (1995b). KINEROS: a kinematic runoff and erosion model. In: *Computer Models of Watershed Hydrology* (V.P. Singh, ed.). Water Resources Publications, Littleton (USA), 697–732.
- Stock, J. & Montgomery, D.R. (1999). Geologic constraints on bedrock river incision using the stream power law. *Journal of Geophysical Research*, 104, 4983–4993.
- Tateishi, R., Shimazaki, Y. & Gunin, P.D. (2004). Spectral and temporal linear mixing model for vegetation classification. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (20), 4203–4218.
- Thornes, J.B. (1990). *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*. Wiley, Chichester, London, UK.
- Valeo, C. & Moin, S.M.A. (2000). Grid-resolution effects on a model for integrating urban and rural areas. *Hydrological Processes*, 14 (14), 2505–2525.
- Van Oost, K., Govers, G. & Desmet, P.J.J. (2000). Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*, 15 (6), 579–591.
- Van Rompaey, A., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G. & Poesen, J. (2001). Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26 (11), 1221–1236.
- Vertessey, R.A., Watson, F.G.R., Rahman, J.M., Cuddy, S.D., Seaton, S.P., Chiew, F.H., Scanlon, P.J., Marston, F.M., Lymbuner, L., Jeanelle, S. & Verbunt, M. (2001). New software to aid water quality management in the catchments and waterways of the south-east Queensland region. In:

- Proceedings of the Third Australian Stream Management Conference*, August 27–29, pp. 611–616.
- Viney, N.R. & Sivapalan, M. (1999). A conceptual model of sediment transport: application to the Avon river basin in Western Australia. *Hydrological Processes*, 13, 727–743.
- von Werner, M. (2000). *EROSION-3D Technical User Manual*, Department of Soil Science and Water Protection. TU Bergakademie Freiberg, Berlin, Germany.
- Vrieling, A., Sterk, G. & Beaulieu, A. (2002). Erosion risk mapping: a methodological case study in the Colombian Eastern Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57 (3), 158–162.
- Walling, D.E. & Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39, 111–126.
- Wicks, J.M. & Bathurst, J.C. (1996). SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. *Journal of Hydrology*, 175, 213–238.
- Wilkinson, S., Henderson, A. & Chen, Y. (2004). *SEDNET: User Guide*, CSIRO Land and Water Client Report for the Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. CSIRO Land and Water Client Report, CSIRO Land and Water, Canberra (Australia).
- Williams, J.R. (1975). *Sediment Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor*, U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service (A.R.S.), U.S.A. Department of Agriculture, 244-252.
- Williams, J.R., Dyke, P.T. & Jones, C.A. (1983). EPIC: a model for assessing the effects of erosion on soil productivity. In *Analysis of Ecological Systems: state-of-the-art* (W.K. Laurenroth, ed.). Elsevier, Amsterdam (Netherland), 552–572.
- Williams, J., Nicks, A. & Arnold, J. (1985). Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydrological Engineering, American Society of Civil Engineers*, 111, 970–976.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning, Agriculture Handbook*. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C. (USA), 537 pp.
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E. & Goodrich, D.C. (1990). *KINEROS, a kinematic runoff and erosion model*. Documentation and User Manual, USDA, Agricultural Research Service, ARS-77. 130 pp.
- Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D. & Anderson, J.P. (1989). AGNPS: a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44 (2), 4522–4561.
- Zhang, W.H. & Montgomery, D.R. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*, 30 (4), 1019–1028.
- Zhang, X. (1999). *Remote Sensing and GIS for Modelling Soil Erosion at the Global Scale*. PhD Dissertation Thesis, Kings College London, London (UK).