
DESCRIPCIÓN GENERAL DE ALGUNOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE EROSIÓN

General description of several erosion prediction models

Oscar Silva Escobar *

* FONAIAP. CIAE, El Tigre, Apartado Postal 212. Estado Anzoátegui.

Resumen

La necesidad de evaluar los efectos que causan los cambios de uso y manejo de la tierra, sobre el suelo y el agua, ha llevado a recurrir, cada vez con más frecuencia, al uso de modelos de simulación. Por tal motivo, en este trabajo se presenta información recabada en la literatura especializada acerca de la descripción general y aplicación de los modelos de simulación de erosión: EPIC, CREAMS, SWRRB, WEPP y WEPS. Se indican sus principales componentes o submodelos, así como las principales ecuaciones en que se basan los componentes de sedimentación. La principal función de EPIC, CREAMS, SWRRB y WEPP es predecir la producción de sedimentos de un área de drenaje según tipos de uso de la tierra, reales o hipotéticos. WEPS predice erosión eólica, EPIC relaciona la erosión con la productividad en campos de cultivo, CREAMS pre-

dice el contenido de nutrientes y plaguicidas en el agua de escurrimiento y sedimentos, SWRRB calcula la cantidad de agua y sedimentos producidos en cuencas agrícolas complejas y WEPP simula la erosión en parcelas de ladera y la producción de sedimentos en campos de cultivo. EPIC, CREAMS y SWRRB basan sus componentes de escurrimiento en el número de curva y, el de sedimentación, en distintas modificaciones de la USLE. Para WEPP se desarrollaron ecuaciones sobre los procesos de erosión que ocurren en las áreas de surco e inter-surco.

Palabras clave: Erosión, producción de sedimentos, modelos de simulación y matemáticos, EPIC, CREAMS, SWRRB,

Abstract

The need of evaluating the effects of land use and management changes on soil and water conservation, has led to an in-

crease of simulation models development and applying. In this paper, a review about general description and purpose of erosion models EPIC, CREAMS, SWRRB, WEPP and WEPS is presented. Main models components (or submodels) and main sediment yield equations are described. EPIC, CREAMS, SWRRB and WEPP purpose is to predict sediment yield under current or hypothetical land uses. WEPS predicts wind erosion, EPIC relates erosion with cropland productivity, CREAMS predicts nutrients and pesticides contents in runoff and sediment, SWRRB predicts water and sediment yield in complex

rural basins and WEPP predicts erosion from hillslopes and field drainage areas. EPIC, CREAM and SWRRB runoff components are based on SCS-Curve Number, and sediment yield components are based on several USLE modifications. WEPP erosion equations are based on erosion process that occur in rill and interrill areas.

Key words: erosion, sediment yield, simulation models, mathematics models, EPIC, SWRRB.

INTRODUCCIÓN

En la evaluación de cuencas hidrográficas, así como en la planificación conservacionista del uso de la tierra, la producción de sedimentos por parte de la lluvia y la escorrentía cobra mucha importancia, ya que de ello depende, en gran parte, la calidad del agua producida, la sostenibilidad de los sistemas de producción y la vida útil de la infraestructura hidráulica.

La necesidad de evaluar los efectos que causan cambios de uso y manejo de la tierra sobre la conservación del suelo y la calidad del agua, ha llevado a recurrir, cada vez con más frecuencia, al uso de modelos de simulación, ya que es más económico y racional que realizar mediciones reales, que generalmente deben ser de larga duración. Además, se evita modificar el ambiente (cambios o intervenciones en las condiciones naturales o uso de la tierra) con fines experimentales.

En este trabajo, producto de una revisión de literatura, se hace referencia a los modelos de simulación de erosión más frecuentes, indicando su finalidad, estructura y los componentes de sedimentación y escurrimiento con que cuentan. Con ello, se espera facilitar al lector futuros acercamientos más detallados al uso de modelos de simulación en la evaluación y planificación conservacionista de la tierra.

Modelos de simulación de erosión

Los modelos de simulación de erosión son un tipo de modelo de simulación hidrológica. Estos últimos se componen de una serie de ecuaciones que calculan e interrelacionan, de manera computarizada, los diversos procesos relacionados con el agua que ocurren en una unidad de tierra y como resultados estiman características del escurrimiento. En general, resuelven el balance hídrico del área mediante ecuaciones que resuelven a su vez los componentes de dicho balance, es decir, funciones matemáticas que relacionan, generan o resuelven los términos de precipitación, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración, percolación, almacenamiento y flujo de base. Los modelos de simulación de erosión, según los componentes de escurrimiento generados, calculan la producción de sedimentos. Varios de los modelos de este tipo generan información adicional a la relativa a erosión, como productividad de los cultivos y concentraciones de pesticidas y nutrientes en el suelo, el agua y el sedimento.

EPIC

El EPIC, Erosion Productivity Impact Calculator (Williams *et al.*, 1984) fue desarrollado para determinar la relación entre la erosión del suelo y su productividad.

Este modelo puede ser usado por los planificadores para establecer las metas de control de la erosión en función de las técnicas de conservación y productividad actuales de los cultivos. Los estimados de costos y la relación entre costos y productividad pueden orientar a las inversiones en preservación del suelo (Benson *et al.*, 1989). Este modelo toma en cuenta la erosión eólica. Sus principales componentes son hidrología, clima, erosión, nutrientes, crecimiento de las plantas, temperatura del suelo, labranza, factores económicos y manejo del cultivo.

El componente climático es capaz de generar precipitación, temperatura y radiación diaria para largas series de tiempo (100 años, por ejemplo), lo cual se hace necesario ya que muchas veces el efecto que la erosión causa sobre la productividad del suelo es un proceso lento. En caso de existir registros diarios de precipitación éstos pueden ser introducidos directamente, en caso contrario, el modelo los simula mediante una cadena de Markov, según las probabilidades de obtener días húmedos luego de secos o días húmedos luego de húmedos. La temperatura y la radiación solar se generan a partir de la distribución normal.

Considera un área de drenaje correspondiente a un campo de cultivo o parcela, entre una a cien hectáreas, ya que debe asumirse homogeneidad espacial en manejo y suelos. Verticalmente, el modelo es capaz de trabajar con variaciones de las propiedades del suelo, ya que el perfil del mismo puede ser dividido en un máximo de diez horizontes.

En este modelo, la erosión hídrica se calcula con una modificación de la USLE, donde al componente de erosividad de las lluvias se agrega el de la escorrentía, la cual es estimada mediante la metodología de número de curva.

$$Y = (0,646 EI + 0,45 Q q_p^{0,33}) K LS C P, Q > 0$$

$$Y = 0, Q < 0. \quad (\text{Citada por Williams } et al, 1984)$$

donde:

Y: producción de sedimentos en Mg.ha⁻¹.

EI: energía erosiva de la lluvia en unidades métricas.

Q: volumen de escorrentía en mm.

q_p : caudal pico en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

LS: factor de topografía.

C: factor manejo del cultivo, evaluado para los días cuando ocurra escorrentía.

P: factor de prácticas de conservación.

La erosión que ocasiona el riego se estima a través de la mUSLE, utilizando un factor de cultivo constante de 0,5 y Q se calcula con el producto de la cantidad de agua aplicada con el riego (mm) por la tasa de escorrentía.

La erosión eólica se estima con la ecuación Manhattan-Kansas, modificada para aportar datos diarios. El componente de nutrientes se basa en los procesos que sufre el nitrógeno y el fósforo. Del nitrógeno simula pérdidas en la escorrentía, lavado y transporte de NO_3^- , transporte de N orgánico por sedimentos, desnitrificación, mineralización, inmovilización, extracción por el cultivo, fijación y aportes por la lluvia. Para el fósforo simula pérdidas en la escorrentía, transporte en los sedimentos, mineralización y ciclo mineral.

El componente de temperatura del suelo, es simulado en el medio de cada horizonte de suelo para ser usado en el ciclo de nutrientes e hidrología. El componente crecimiento del cultivo simula las especies maíz, sorgo granero, trigo, cebada, avena, girasol, soya, alfalfa, algodón, frijol y pastos. Cada cultivo tiene valores únicos para los parámetros del modelo. Este componente se divide en crecimiento potencial y restricciones al crecimiento. Se basa, en modo general, en la estimación de la biomasa producida según la intercepción de energía radiante (unidades de calor) y en ajustes según los impedimentos o presiones a que el cultivo sea sometido.

El componente de labranza fue diseñado para "mezclar" nutrientes y restos de cultivo dentro de la profundidad de arado, simulando los cambios en densidad aparente y convirtiendo los residuos en pie en residuos caídos. El componente económico se simula mediante la diferencia entre el ingreso bruto y el costo total. El costo variable se calcula por la sumatoria del precio de los insumos por la cantidad utilizada por hectárea. El costo fijo incluye depreciación, intereses, seguro e impuestos. El modelo cuenta con un archivo donde se hallan datos suficientes sobre la maquinaria que se piensa usar en la simulación. El componente de manejo incluye drenaje, riego, fertilización, enclado y uso de pesticidas.

Los autores del modelo, sostienen que éste ha demostrado sensibilidad ante la reducción de los rendimientos causada por la erosión del suelo. Por otro lado, indican que los componentes que más necesitan pruebas son el de crecimiento del cultivo y el de nutrientes, ya que son de reciente desarrollo y de mucha importancia para el éxito del EPIC.

CREAMS

El Modelo CREAMS, Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems (Knisel, 1980), fue diseñado para evaluar la contaminación de origen no puntual en unidades hidrológicas del tamaño de campos de cultivo (Bingner, 1990), y se aplica en la simulación de la calidad del agua

en esa escala (1 a 100 ha). Los componentes que lo integran son hidrológico, erosión y producción de sedimentos y químico (nutrientes y pesticidas) (Knisel, 1980).

El componente hidrológico contiene modelos para estimar la escorrentía, humedad del suelo, percolación a través de la zona radical y evaporación dentro del sector hidrológico seleccionado. Se basa en un método modificado del número de curva (Smith y Williams, 1980).

El componente erosión/sedimentos, estima erosión, producción de sedimentos y composición de partículas del sedimento para cada tormenta. El modelo opera en tres tipos de flujo desde reservorios (Foster *et al.*, 1980).

CREAMS describe la separación de suelo por flujo laminar usando la modificación de la USLE desarrollada por Foster *et al.*, (1980).

$$D_{ii} = 0,00457 EI (s + 0,014) K C P (q_p \cdot V_u^{-1}).$$

donde:

D_{ii} : tasa de suelo separado en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

EI: factor erosividad de la lluvia de la USLE, en $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}$

s: seno del ángulo de la pendiente.

K: factor erosionabilidad del suelo de la USLE ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot(\text{EI})^{-1}$).

C,P: factores de cobertura y cultivo, y laboreo en contorno de la USLE.

q_p : caudal pico de escorrentía, en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

V_u : volumen de escorrentía, en mm.

La separación por flujo en surcos es descrita por la siguiente ecuación:

$$D_{Fr} = 6860 m V q_p^{1/3} [x \cdot (22.1)^{-1}]^{m-1} s^2 KCP (q_p \cdot V_u^{-1})$$

donde:

D_{Fr} : tasa de suelo separado en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

m: exponente para la longitud de la pendiente (L de la USLE).

x: distancia longitud de la pendiente, en metros.

q_p : caudal pico de escorrentía, en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

V_u : volumen de escorrentía, en mm.

El componente químico contiene modelos que predicen la pérdida de nutrientes y pesticidas desde la cuenca o sector hidrológico en cada tormenta. Cada subcomponente corre independientemente.

El componente de nutrientes (Frere *et al.*, 1980) simula procesos del nitrógeno y del fósforo. Los procesos del fósforo son aplicaciones de campo y pérdidas por escorrentía o en los sedimentos. Los procesos de nitrógeno son extracción por la planta, mineralización, desnitrificación, pérdidas en escorrentía y sedimentos, lavado, aplicación en fertilizantes y contenido en la lluvia.

El subcomponente de pesticidas (Leonard y Wauchope, 1980), considera múltiples aplicaciones de pesticidas, incluyendo cualquier combinación de los incorporados al suelo, aplicados a la superficie o de aplicación foliar. Predice el movimiento de los pesticidas para tormentas individuales.

SWRRB

El objetivo del desarrollo del modelo SWRRB, Simulator of Water Resources in Rural Basins (Williams *et al.*, 1985), fue predecir el efecto de las decisiones de manejo sobre la producción de agua y sedimentos en cuencas sin registros. No se requiere calibración ya que las entradas del modelo están basadas en procesos físicos (Arnold y Williams, 1987). Los tres mayores componentes del SWRRB son clima, hidrología y sedimentación. Los procesos considerados incluyen escorrentía, flujo de retorno, percolación, evapotranspiración, pérdidas de transmisión, almacenamiento en lagunas y represas, sedimentación y crecimiento del cultivo (Williams *et al.*, 1985)

Este modelo se obtuvo modificando al modelo hidrológico de lluvia diaria CREAMS para su aplicación en cuencas rurales grandes y complejas, por lo que no existe restricción de área. Los cambios principales fueron: a) el modelo fue expandido para permitir cálculos simultáneos en varias subcuencas, b) se añadieron componentes para simular clima, flujo de retorno, almacenamiento en lagunas y represas, crecimiento del cultivo, pérdidas de transmisión y movimiento de sedimentos a través de lagunas, represas, cauces y valles (Arnold y Williams, 1987). Varios componentes se tomaron de EPIC.

En el sentido vertical, permite la variación de las propiedades del suelo hasta en diez horizontes. En el componente hidrológico, las cuencas complejas se dividen en subcuencas para reflejar diferencias para varios cultivos y suelos.

La escorrentía es estimada diaria y separadamente para cada área mediante la ecuación del número de curva y sumada para obtener el volumen total producido por la cuenca. Según los autores, no se le somete a ecuaciones de tránsito ya que esto no aumenta significativamente la precisión del modelo. El valor del Número de Curva se recalcula diariamente para considerar los cambios de humedad en el suelo.

Las variables climáticas necesarias para correr el SWRRB son precipitación, temperatura y radiación. El manejo de las mismas se lleva a cabo con el mismo procedimiento del EPIC. El flujo de retorno es calculado como una función del contenido de agua en el suelo y del tiempo de concentración del flujo de retorno. Este último puede ser calculado a partir de las propiedades hidráulicas o introducido por el usuario.

El componente de percolación utiliza un modelo de tránsito de almacenamiento combinado con un modelo para predecir el flujo a través de grietas y de la zona radical. La evaporación se estima utilizando el modelo de Ritchie.

Las pérdidas de transmisión en el canal del flujo se calculan como una función del contenido del agua en el suelo, tiempo de concentración y la conductividad hidráulica efectiva

del lecho del canal.

El almacenamiento en lagunas se basa en una ecuación de balance de agua que toma en cuenta la entrada y salida, la evaporación y la filtración. El componente del balance de agua en represas es similar al de lagunas excepto en que él permite flujo desde los vertederos principales y de emergencia.

La producción de sedimentos se calcula para cada subcuenca con la mUSLE:

$$Y = 11,8 (Q \cdot Q_p)^{0,56} \cdot K.L.S.C.P \text{ (Williams y Berndt, 1977).}$$

donde:

Y: producción de sedimentos para una tormenta (Mg).

Q: volumen de escorrentía (m³)

Q_p: caudal pico (m³.s⁻¹)

K: erosionabilidad del suelo (Mg.h.N⁻¹.ha⁻¹).

L.S: factor topográfico.

C, P: factores de cobertura y manejo del suelo.

El caudal pico se estima mediante una modificación de la fórmula racional:

$$Q_p = \alpha Q A \cdot [(360 t_c)]^{-1}$$

donde:

α : parámetro adimensional que expresa la proporción de la lluvia total que ocurre durante el tiempo de concentración (t_c).

La duración de la lluvia se genera a partir de una distribución gamma.

El modelo de tránsito de sedimentos de canal y vega se compone de dos factores que operan simultáneamente (deposición y degradación). Se simula el tránsito de los sedimentos a través de lagunas y represas.

En el crecimiento del cultivo, se calcula diariamente la biomasa sobre el suelo durante el período de crecimiento, como una función de la radiación solar y del índice de área foliar. Esta última se calcula para cada día a partir del área foliar máxima y de la biomasa total. El componente de evapotranspiración utiliza al área foliar para calcular la evaporación de la planta. Restricciones por temperatura y déficit de agua se utilizan como limitaciones al crecimiento. Este componente es una simplificación del utilizado por el EPIC.

Al validar este modelo en 11 cuencas de EEUU, dentro de una amplia variedad de suelos, clima, topografía y condiciones de manejo, Arnold y Williams (1987) obtuvieron errores entre 8 y 11% en la predicción de la producción anual de agua y r² entre 0,55 y 0,83 para la producción de sedimentos. Afirman que los resultados indican el buen funcionamiento del modelo, y que puede convertirse en una útil herramienta de la planificación y diseño de proyectos para el recurso agua.

En Venezuela, el modelo SWRRB mostró precisiones de 76 y 98% en dos cuencas hidrográficas de 898,3 y 49,31 Km²

respectivamente, al comparar la producción de sedimentos estimada con la medida por batimetría, lo que ha permitido su uso en otras localidades (Hermelín, 1993). Al contrario, Silva (1995), determinó que en una cuenca pequeña SWRBB subestimó la producción de agua y sobreestimó notablemente la de sedimentos.

WEPP

El desarrollo del modelo WEPP, Water Erosion Prediction Project, dió inicio en 1985 para obtener una nueva técnica predictiva en favor de los planes de conservación de suelos y aguas (Foster y Lane, 1987, citados por Nearing *et al.*, 1990). Se basa en procesos físicos de hidrología y erosión para pre-decir erosión hídrica. Se diferencia de la USLE en los datos que requiere y en el origen, puesto que ésta última se basa en parámetros obtenidos empíricamente. Tiene dos aplicaciones principales: en laderas y en cuencas.

Este modelo tiene la capacidad de simular la distribución espacial y temporal de la pérdida de suelo para una ladera completa o cada punto de ella. Los procesos considerados en la simulación de erosión de ladera incluyen erosión de surco e intersurco, depósito y transporte de sedimentos, infiltración, sellado superficial, hidráulica de surco, escorrentía superficial, crecimiento de la planta, descomposición de residuos, percolación, transpiración, fusión de nieves, efecto de las heladas sobre la infiltración y erosionabilidad del suelo, clima, y efecto de la labranza sobre el suelo, incluyendo las consecuencias del desborde de los camellones (Flanagan *et al.*, 1995).

El componente de generación climática es similar al utilizado por EPIC y SWRRB. Se incluyó un modelo de generación de intensidad de la lluvias que se emplea para calcular la precipitación excedente, como parte del cálculo del escurrimiento.

Para el cálculo de la escorrentía superficial se recurre a la solución analítica de las ecuaciones de onda cinemática y a un método aproximativo, basado en regresiones sobre diversas condiciones de rugosidad del suelo, pendiente y clima. Un grupo de ecuaciones de regresión genera el caudal pico y otro a la duración del escurrimiento.

Los componentes de balance hídrico y de percolación se basan en los empleados en SWRRB, con algunas modificaciones para mejorar la estimación de parámetros de percolación y evaporación.

El componente de crecimiento de las plantas simula condiciones de cultivos o de pasturas. Su objeto es simular los cambios temporales en las plantas que afectan al escurrimiento y la erosión. El modelo de cultivos se basa en el componente de EPIC, y acepta diversos arreglos culturales, como la rotación y asociación de cultivos. El modelo de pasturas calcula el crecimiento de las plantas de la comunidad utilizando una curva de crecimiento potencial, la cual se obtuvo de una modificación de la función de densidad de Poisson.

El componente suelo se compone de tres factores (Laf-

len *et al.*, 1991a):

Erosión intersurcos: es la separación y transporte del suelo por la lluvia y la posterior escorrentía. Se obtiene como una función de la erosionabilidad intersurcos, la intensidad efectiva de la lluvia, un factor de ajuste de cobertura superficial, un factor de ajuste para la cobertura por copa y un factor de ajuste para la pendiente.

Fricción hidráulica: es la fuerza ejercida sobre el fondo del canal por el flujo de agua.

Erosión en surcos: es la separación y transporte del suelo por parte del flujo concentrado de agua, y es función de la erosionabilidad del surco, la fricción hidráulica del flujo, y la fricción hidráulica crítica que debe ser superada para que ocurra la separación.

En la determinación de los factores nombrados intervienen propiedades del suelo como densidad aparente, conductividad hidráulica saturada, contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico. Se toma en cuenta el posible depósito de los sedimentos a lo largo de la pendiente, aspecto no considerado por la USLE. El factor perfil de la pendiente se compone de los siguientes parámetros: longitud, pendiente promedio, pendiente superior y pendiente final.

En la versión para cuencas, se añade un componente que simula el transporte, deposición y separación de sedimentos en pequeños cauces, y puede aplicarse en campos terracedos y simular erosión laminar, en surcos y cárcavas (Laflen *et al.*, 1991b).

El modelo para cuencas utiliza las salidas del modelo para perfil de ladera. Es capaz de identificar zonas de depósito y producción de sedimentos dentro de canales construidos o de cárcavas efímeras, tomar en cuenta el efecto del reflujo sobre la producción, transporte y depósito de sedimentos en canales y representar la variabilidad espacial y temporal de los procesos de erosión y sedimentación ocasionada por las prácticas de manejo del cultivo. Este modelo calcula el exceso de lluvia según la intensidad crítica, y para los caudales picos utiliza la modificación de la fórmula racional de EPIC y SWRRB o la ecuación utilizada en CREAMS. Para obtener la producción de sedimentos, calcula la lámina de flujo y la fricción sobre el canal mediante regresiones basadas en la solución numérica de la ecuación de "flujo en estado estable y espacialmente variable".

WEPS

El modelo WEPS (Wind Erosion Prediction System; Hagen *et al.*, 1995) predice erosión eólica, sobre base diaria y continua. Es de formulación sobre procesos, y se propone como una herramienta con fines de planeamiento ambiental y diseño de sistemas de conservación.

Este modelo, en términos estrictos, quizás esté fuera del grupo de los modelos hidrológicos, ya que el tipo de erosión que simula está muy poco asociada al régimen de escurrimiento

y por lo tanto, el balance hídrico de la unidad de tierra no es el componente principal del procedimiento. No obstante, su mención es importante debido a la importancia de la erosión eólica en frecuentes situaciones.

El área de simulación es de un campo de cultivo hasta pocos campos adyacentes. Los usuarios pueden especificar la geometría de la simulación y subáreas que tengan diferencias de suelo, manejo o cultivo. Como salida, el WEPS provee promedios de pérdida y depósito de suelos en intervalos de tiempo especificados por el usuario, tomando en cuenta las subdivisiones del área de simulación. Se presenta una opción para simular las fracciones de saltación y en suspensión, lo cual es útil para estimar los efectos de la erosión eólica fuera del sitio sujeto a evaluación.

WEPS se compone de siete submodelos: clima, erosión, hidrología, manejo, suelos, cultivo y descomposición de residuos. El submodelo de clima (Tatarko *et al.*, 1995) genera estocásticamente la velocidad y dirección del viento y la hora del día cuando ocurren los máximos de velocidad. El submodelo de erosión (Hagen, 1995) decide la existencia de pérdida de suelo según relaciones entre el clima, la superficie del suelo y la cobertura vegetal. Periódicamente, el submodelo actualiza las condiciones de la superficie del suelo modificadas por la erosión eólica. La secuencia de procesos es la siguiente: calcula las velocidades de fricción en cada subárea; calcula la velocidad de fricción umbral para cada subárea; genera los puntos de la cuadrícula de simulación; calcula la pérdida y depósito de suelo; actualiza las variables superficiales modificadas por la erosión; actualiza las variables globales de las subáreas y finalmente, envía la información seleccionada a archivos.

El submodelo de descomposición de residuos (Steiner *et al.*, 1995) se basa en una ecuación de tasa de pérdida de primer orden:

$$M_t = M_o \cdot \exp^{-k \text{ CUMDD}}$$

donde:

M_t: cantidad de biomasa (kg.m⁻²) presente.

M_o: cantidad de biomasa inicial (kg.m⁻²)

k: constante para cada cultivo para calcular cambios de biomasa (día⁻¹)

CUMDD: variable ponderada con el tiempo calculada por funciones de temperatura y humedad.

El submodelo de hidrología (Durrar y Skidmore, 1995) predice el contenido de agua en los horizontes del suelo y en la interfase suelo atmósfera. Mantiene un balance de agua en el suelo continuo y diario de la forma:

$$\text{SWC} = \text{SWCI} + (\text{PRCP} + \text{DIRG}) + \text{SNOW} - \text{RUNNOFF} - \text{ETA} - \text{DPRC}$$

donde:

SWC: contenido de agua en el suelo (mm) para un día dado.

SWCI: contenido de agua inicial en el suelo (mm).

PRCP: precipitación del día (mm).

DIRG: lámina de riego aplicada (mm).

SNOW: diferencia de la nieve derretida y la caída (mm).

RUNOFF: escurrimiento (mm).

ETA: evaporación diaria.

DPRC: percolación (mm).

Vale destacar que el escurrimiento se calcula según la metodología del Número de Curva.

El submodelo de suelos (Hagen *et al.*, 1995) simula las propiedades del suelo que regulan su erosionabilidad ante el viento de manera diaria y continua. Las propiedades temporales que toma en cuenta son las siguientes: altura de camellones; rugosidad aleatoria; grosor, cobertura y estabilidad de la costra; pérdida de material erosionable de la costra; estabilidad de los agregados en seco; distribución del tamaño de los agregados; densidad aparente y densidad de los agregados y de la costra.

El submodelo de manejo (Wagner y Ding, 1995) simula el efecto del manejo del suelo sobre sus propiedades superficiales, a través de componentes como la manipulación de la superficie y de la masa del suelo, remoción: compactación, manipulación de la biomasa y aplicación de enmiendas.

El submodelo de crecimiento del cultivo (Retta y Armbrust, 1995) calcula la producción diaria de biomasa de raíces, hojas, tallos y órganos reproductivos. Es capaz de simular bajo condiciones de desarrollo subóptimas o de falta de suplencia adecuada de agua y nutrientes a los cultivos. Este submodelo es una adaptación del componente de cultivo de EPIC.

Otros modelos

El ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulator; Beasley *et al.*, 1980; citados por Bingner, 1990) fue desarrollado para simular el movimiento de sedimentos en cuencas agrícolas durante e inmediatamente después de la lluvia. El ANGPS (Agricultural Nonpoint Source; Young *et al.*, 1989; citados por Bingner 1990) simula, para eventos individuales de lluvia, el transporte de sedimentos y nutrientes en cuencas agrícolas.

Comparación del funcionamiento de varios modelos

Al comparar la producción de agua y sedimentos estimada por varios modelos (EPIC, CREAMS, SWRRB, AGNPS, ANSWERS) con valores obtenidos en mediciones, Bingner *et al.*, (1989), determinaron que sin excepción, todos los modelos fallaron en alguna situación. No obstante, CREAMS y SWRRB produjeron resultados que fueron similares a las mediciones más frecuentemente que otros modelos, seguidos por AGNSP. EPIC mostró buen ajuste al estimar producción de agua, pero simuló peor la erosión que los otros. Se supuso que se debió a que EPIC calcula el factor C (cobertura y manejo de la US-LE) en vez de recibirlo directamente. ANSWERS, generalmente predijo la producción de agua y sedimentos peor que los otros modelos. Los autores señalan que una de las ventajas del SWRRB es que requiere menos datos de entrada que los otros

modelos.

CONCLUSIONES

A pesar de las limitaciones que implica el uso de modelos, como los errores de estimación de las salidas y la complejidad e imprecisión en la colección de datos de entradas, se han convertido en frecuentes herramientas para el diagnóstico de áreas, establecimiento de prioridades y planificación de recursos hidráulicos, debido al bajo costo que implican, la rapidez de sus resultados y la posibilidad de evaluar varios escenarios de uso y manejo.

Existe un importante número de modelos, diseñados con distintos fines y requerimientos de información. Por ello, debe tenerse especial cuidado en la selección del modelo, ya que el criterio de elección debe combinar la aplicabilidad del modelo a los objetivos del trabajo con los requerimientos y disponibilidad de información. Se recomienda utilizar aquel modelo que cumpla con los objetivos de la evaluación y que a la vez, requiera la menor cantidad de información.

Existen modelos de simulación hidrológica que además de las salidas atinentes a cantidad y distribución en el tiempo de sedimentos y aguas, aportan información sobre el contenido en los mismos de pesticidas y nutrientes, en términos de concentraciones de nitrógeno, fósforo y cloruros.

Los modelos de simulación más importantes (EPIC, SWRRB y CREAMS) utilizan modificaciones de la USLE como componente de sedimentación y del método del número de curva para generar escurrimiento.

El WEPP, es uno de los pocos modelos desarrollados sobre una base independiente de la USLE y del Número de Curva, y con formulación física de los procesos. No obstante, parte importante de sus algoritmos fueron obtenidos mediante modificaciones de componentes de otros modelos o de regresiones.

EPIC parece ser el modelo hidrológico de sedimentación más avanzado en la simulación de los procesos del cultivo (nutrimentos, crecimiento y productividad), ya que la mayoría de los modelos basan en él dicho componente. En cuanto a erosión eólica, EPIC es el único modelo de simulación hidrológica que la toma como proceso, mientras que WEPS se diseñó especialmente para estimarla.

De evaluaciones hechas a modelos, puede concluirse que ninguno es apto para funcionar en todas las condiciones. Las mayores precisiones se han obtenido en las condiciones que dieron origen al modelo y por los formuladores del mismo.

LITERATURA CITADA

ARNOLD, J. y J. WILLIAMS. 1987. Validation of SWRRB-Simulator for Water Resources in Rural Basins. *J. Water Resources Planning and Management*. Vol. 113 (2):243-256.

BEASLEY, D., L. HUGGINS y E. MONKE. 1980. ANS-

WERS: A model for watershed planning. *Trans. of ASA-E*. Vol. 23(4):938-944.

BENSON, V., O. RICE, P. DYKE, J. WILLIAMS y C. JONES. 1989. Conservation impact on crop productivity for the life of a soil. *J. Soil and Water Conservation*. Vol. 44 (6):600-604.

BINGNER, R. 1990. Comparison of the components used in several sediment yield model *Trans. ASAE*. Vol. 33 (4): 1229-1238.

BINGNER, R., C. MURPHREE y C. MUTCHLER. 1989. Comparison of sediment yield models on watersheds in Mississippi. *Trans. ASAE*. Vol. 32(2):529-534.

DURAR, A. y E. SKIDMORE. 1995. Hydrology submodel. *In: USDA Wind Erosion Prediction System. Technical Description*. Agriculture Research Service, Natural Resources Conservation Service, Bureau of Land Management, Environmental Protection Agency. pp. H1-H64.

FOSTER, G., L. LANE, J. NOWLIN, J. LAFLEN y R. YOUNG, 1980. A model to estimate sediment from fieldsized areas. *In: CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. Knisel, W. Ed. USDA/Conservation Research Report, N° 26. pp. 65-87.

FRERE, M., J. ROSS, y L. LANE. 1980. The nutrient submodel. *In: CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. Knisel, W. Ed. USDA/Conservation Research Report, N° 26. pp. 65-87.

HAGEN, L. 1995. Erosion submodel. *In: USDA Wind Erosion Prediction System. Technical Description*. Agriculture Research Service, Natural Resources Conservation Service, Bureau of Land Management, Environmental Protection Agency. pp. E1-E49.

HAGEN, L., L. WAGNER y J. TATARKO. 1995. Wind Erosion Prediction System (WEPS). *In: USDA Wind Erosion Prediction System. Technical Description*. Agriculture Research Service, Natural Resources Conservation Service, Bureau of Land Management, Environmental Protection Agency. pp. I1-I8.

HAGEN, L., T. ZOBECK., E. SKIDMORTE. y Y. ELMIN-YAWI. 1995. Soil submodel. *In: USDA Wind Erosion Prediction System. Technical Description*. Agriculture Research Service, Natural Resources Conservation Service, Bureau of Land Management, Environmental Protection Agency. pp. S1-S22.

HERMELIN, S. 1993. Determinación de la producción de sedimentos en cuencas altas de la región centrooccidental aplicando el modelo SWRRB; Validación. Reunión internacional sobre procesos de erosión en tierras de altas pendientes; evaluación y modelaje. Mérida. Venezuela. 16-20

de Mayo. Mimeo. 10 p.

Msc en Ciencia del Suelo. Fac. Agronomía. UCV. 106 p.

- FLANAGAN, D., J. ASCOUGH, A. NICKS, M. NEARING, y J. LAFLEN. 1995. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP). Technical Documentation. NSERL Report N 10. Chapter 1. pp. 1.1 - 1.12.
- KNISEL, W, editor. 1980. CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. USDA, Conservation Research Report, No 26. 640 p.
- LAFLEN, J., L. LANE. y G. FOSTER. 1991b. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. J. Soil and Water Conservation. Vol. 46 (1):34-38.
- LAFLEN, J., W. ELLIOT, J. SIMANTON, C. HOLZHEY y K. KHOL. 1991a. WEPP Soil erodibility experiments for rangelands and cropland soils. Journal of Soil and Water Conservation. Vol. 46(1):39-44.
- LEONARD, R. y R. WAUCHOPE, 1980. The pesticide submodel. In: CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Knisel, W. Ed. USDA/Conservation Research Report, No. 26. pp. 88-112.
- NEARING, M., L. DEER-ASCOUGH y J. LAFLEN. 1990. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. Trans. ASAE. Vol. 33(3): 839-849.
- RATTA, A. y D. ARMBRUST. 1995. Crop submodel In: USDA Wind Erosion Prediction System. Technical Description. Agriculture Research Service, Natural Resources Conservation Service, Bureau of Land Management, Environmental Protection Agency. pp. C1-16.
- SILVA, O. 1995. Validación del modelo de simulación hidrológica SWRRB en una cuenca pequeña, de altas pendientes y lluvia estacional. Caso Macapo, Edo. Cojedes. Tesis
- SMITH, R. y J. WILLIAMS. 1980. Simulation of the surface water hydrology. In: CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Knisel, W. Ed. USDA/Conservation Research Report, No. 26. pp. 13-35.
- STEINER, J., H. SCHOMBERG, y P. UNGER. 1995. Residue decomposition submodel. In: USDA Wind Erosion Prediction System. Technical Description. Agriculture Research Service, Natural Resources Conservation Service, Bureau of Land Management, Environmental Protection Agency. pp. D1-D12.
- TATARKO, J., E. SKIDMORE y L. WAGNER. 1995. Weather submodel. In: USDA Wind Erosion Prediction System. Technical Description. Agriculture Research Service, Natural Resources Conservation Service, Bureau of Land Management, Environmental Protection Agency. pp. W1-W15.
- WAGNER L. y D. DING. 1995. Management submodel. In: USDA Wind Erosion Prediction System. Technical Description. Agriculture Research Service, Natural Resources Conservation Service, Bureau of Land Management, Environmental Protection Agency. pp. T1-T34.
- WILLIAMS, J., A. NICKS y J. ARNOLD. 1985. Simulator for water resources in rural basins. J. Hydraulic Engineering. Vol. 111(6):970-986.
- WILLIAMS, J., C. JONES y P. DYKE. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and productivity. Trans. ASAE. Vol. 27 (1):129-144.
- YOUNG, R., C. ONSTAD, D. BOSCH y W. ANDERSON. 1989. ANGPS: A. nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds. J. Soil and Water Conservation Vol. 44(2):168-173