



Modelación matemática hidro-sedimentológica físicamente basada y espacialmente distribuida a escala de cuenca

Pedro A. Basile^{1,2}, Gerardo Riccardi^{1,2,3}, Erik Zimmermann^{1,2,4} y Hernán Stenta^{1,2}

¹ Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – UNR)

² Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – UNR)

³ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina

Mail de contacto: pbasile@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta el desarrollo y la aplicación del modelo matemático físicamente basado y espacialmente distribuido CTSS8-SED, apropiado para simular numéricamente procesos hidro-sedimentológicos a escala temporal de eventos en cuencas de llanura. El modelo permite simular: i) la dinámica del escurrimiento superficial, ii) la tasa de disgregación de suelo por impacto de lluvia y por flujo sobre el terreno, iii) el transporte de sedimentos por flujo sobre el terreno y los correspondientes procesos de erosión-sedimentación distribuidos en la cuenca, iv) el transporte de sedimentos por flujo encauzado y los procesos de deposición-resuspensión en los cursos de agua. La representación del tránsito de agua y sedimentos se realiza mediante un esquema cuasi-bidimensional de celdas interconectadas. El modelo permite reproducir hidrogramas y sedimentogramas en cada celda del dominio modelado. Además, se pueden construir mapas de áreas inundadas y de erosión-sedimentación. Se presenta la aplicación del modelo en la cuenca del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina.

Palabras clave: modelación hidro-sedimentológica, erosión/sedimentación, Arroyo Ludueña.

ABSTRACT

The development and application of the physically-based and spatially-distributed mathematical model CTSS8-SED is presented. The model simulates hydrologic-hydraulic processes produced by storm events and related soil erosion and sediment transport processes at basin scale in lowland areas. The model simulates: i) storm runoff, ii) soil detachment by raindrop impact and overland flow (gross sediment yield), iii) sediment transport by overland flow and associated erosion-deposition processes and iv) sediment transport by stream flow and riverbed deposition/re-suspension processes. A quasi two-dimensional representation of water flow and sediment transport routing is made by means of interconnected cells approach. The model can reproduce hydrographs and sedimentographs in each cell of the modeled domain. In addition, inundation maps and erosion/sedimentation maps can also be constructed. The model is applied in the Ludueña Creek basin, Santa Fe province, Argentina.

Keywords: hydro-sedimentologic modeling, erosion/sedimentation, Ludueña Creek.

Introducción

La erosión hídrica juega un rol fundamental en el proceso de degradación de suelos. Sus efectos se observan in-situ y fuera del sitio de generación del sedimento. Los efectos in-situ son importantes en suelos destinados a la agricultura. Efectivamente, la desintegración de la estructura del suelo, la pérdida de suelo debido al transporte ejercido por el flujo sobre el terreno y el consiguiente arrastre de materia orgánica y nutrientes provocan una disminución de la productividad de suelos cultivables, lo cual conduce a un mayor gasto en fertilizantes y más tarde puede ocasionar el abandono de la

agricultura (Crosson, 1997). Fuera del sitio de generación existe el problema creado por la deposición de dicho sedimento en planicies de inundación, embalses, canales de riego, sistemas de conductos pluviales, etc. (Clark, 1985). Asimismo, los sedimentos finos pueden adsorber sustancias contaminantes, como agroquímicos, etc., lo cual puede incrementar los niveles de nitrógeno y fósforo en los cuerpos de agua receptores y desencadenar procesos de eutrofización (Steege et al., 2001).

Los modelos determinísticos que se emplean para estimar erosión hídrica a escala de cuenca pueden clasificarse en: empíricos, conceptuales, físicamente basados o una

combinación de ellos. Por otra parte, en función de la escala temporal, se dividen en modelos por eventos y continuos. Asimismo, pueden definirse como agregados, distribuidos o semidistribuidos de acuerdo a la representación de parámetros, variables de estado, entradas, salidas y condiciones al contorno. Algunos modelos que simulan procesos hidrológicos y sedimentológicos, basados en la ecuación empírica USLE, son: AGNPS (Young et al., 1987), RUSLE (Renard et al., 1991), SWAT (Arnold et al., 1998), AnnAGNPS (Bingner et al., 2001). Entre los modelos distribuidos físicamente basados se pueden citar: ANSWERS (Beasley et al., 1980), WEPP (Foster et al., 1987), KINEROS (Woolisher et al., 1990), SHESED (Wicks et al., 1996), CASC2D-SED (Julien et al., 2002), EROSET (Sun et al., 2002), InHM (Heppner et al., 2006), PSED (Chen et al., 2006). Mas allá del modelo utilizado, ningún modelo puede ser apropiado para todos los problemas y/o ambientes geográficos. Por lo tanto, es razonable pensar en la modificación de los modelos existentes y/o en el desarrollo de nuevos modelos.

En este trabajo se presenta el desarrollo y la aplicación del modelo CTSS8-SED, apropiado para simular procesos hidrológicos-hidráulicos y sedimentológicos por eventos, en forma físicamente basada y espacialmente distribuida, en cuencas de llanura. Mediante el modelo es posible simular la dinámica del escurrimiento superficial, la producción bruta por impacto de lluvia y flujo sobre el terreno, el transporte de sedimentos por flujo sobre el terreno y los correspondientes procesos de erosión-sedimentación, el transporte de sedimentos por flujo encauzado y los procesos de deposición-resuspensión en los cursos de agua. Se presenta una aplicación del modelo para simular el evento extraordinario, del 26 al 30 de marzo de 2007, que afectó la cuenca del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina.

Formulación del modelo CTSS8-SED

Procesos hidrológicos-hidráulicos

El modelo hidrológico e hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido, CTSS8 (Riccardi, 2000) se basa en esquemas de celdas y ha sido desarrollado para la simulación a escala temporal de eventos. La ecuación de continuidad cuasi-2D para el flujo hídrico en la j-ésima celda se expresa como:

$$A_{sj} \frac{\partial z_j}{\partial t} = P(t)_j + \sum_{k=1}^N Q_{j,k} \quad (1)$$

donde z_j : nivel del agua; A_{sj} : área superficial mojada; t : tiempo; P_j : caudal externo (lluvia neta); $Q_{j,k}$: caudal líquido intercambiado entre las celdas j y k , con N : número de celdas interconectadas con la celda j .

Las pérdidas del escurrimiento pueden ser estimadas mediante los métodos del número de curva (NRCS), Horton o Green-Ampt (Chow et al., 1994).

El escurrimiento superficial puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga entre celdas, las cuales han sido derivadas a partir de la ecuación dinámica de Saint Venant. En la aproximación de onda difusiva el caudal intercambiado entre celdas se expresa como:

$$Q_{j,k} = f(\Delta z_{j,k}) \frac{K_{j,k}}{\sqrt{\Delta x_{j,k}}} \sqrt{|z_j - z_k|} \quad (2)$$

con $f(\Delta z_{j,k}) = +1$ si $\Delta z_{j,k} > 0$ y $f(\Delta z_{j,k}) = -1$ si $\Delta z_{j,k} < 0$; $K_{j,k}$: factor de conducción, $K_{j,k} = A_t h^{2/3} / \eta$, con A_t : área transversal mojada, h : profundidad del agua y η : coeficiente de rugosidad de Manning; $\Delta x_{j,k}$: distancia entre centros de celdas y z_k : nivel de agua en la k-ésima celda.

Para contemplar condiciones de flujo particulares (desbordes de terraplenes viales, ferroviarios, etc.) se utilizan leyes de descarga basadas en la fórmula para vertedero de cresta ancha, para descarga libre, $(z_k - z_w) < (2/3) (z_j - z_w)$:

$$Q_{j,k} = \mu_1 B_w \sqrt{2g} (z_j - z_w)^{3/2} \quad (3)$$

y para descarga ahogada, $(z_k - z_w) \geq (2/3) (z_j - z_w)$:

$$Q_{j,k} = \mu_2 B_w \sqrt{2g} (z_j - z_w) (z_j - z_k)^{1/2} \quad (4)$$

donde z_w : nivel de cresta del vertedero, $\mu_{1,2}$: coeficientes de gasto, g : aceleración de la gravedad, B_w : ancho vertedero y $z_j > z_k$. Además, (3) y (4) se aplican para puentes y alcantarillas especificando escalón de fondo nulo y coeficientes de gasto según Chow (1959).

La distribución espacial de parámetros y variables se realiza a través de la discretización de la cuenca en celdas cuadrangulares de igual tamaño. Las celdas pueden tipificarse como celdas valle (flujo sobre el terreno) y celdas río (flujo encauzado), entre los dos tipos de celdas varían las funciones de almacenamiento y conducción (Riccardi, 2000).

El modelo es operado desde una plataforma computacional desarrollada en entorno Windows® (Stenta et al., 2005).

Procesos sedimentológicos

El módulo sedimentológico incorporado al modelo CTSS8 permite calcular, en forma físicamente basada y espacialmente distribuida, la tasa de disgregación de suelo por impacto de lluvia y por flujo sobre el terreno (producción bruta de sedimentos), el transporte de sedimentos y los procesos de erosión-sedimentación en las celdas valle y en las celdas río (Basile, 2007).

Producción bruta de sedimentos en celdas valle

La tasa de disgregación de suelo debido al impacto de la lluvia (D_p) se determina en función de las características del suelo (representadas por el coeficiente de erosionabilidad c_p), de la intensidad de la lluvia, de la profundidad de flujo superficial y de la cobertura vegetal de la celda, para la j -ésima celda tenemos:

$$D_{p_j} = c_{p_j} \alpha \int_j^\beta f_{h_j} f_{c_j} \quad (5)$$

donde α y β : coeficientes dependientes de la intensidad de lluvia i (Wicks, 1988); f_h : factor de corrección por profundidad de flujo (Park et al., 1982), el cual es función de la profundidad de flujo y de la mediana de la distribución de diámetros de las gotas de lluvia, la cual a su vez es función de la intensidad de lluvia (Laws et al., 1943) y f_c : factor de corrección por cobertura, el cual es función de la fracción del área de celda cubierta por canopeo y protección superficial, $f_c = 1 - R_{ac}$ (Alberts et al., 1995).

Por otra parte, la tasa de disgregación por flujo sobre el terreno (D_t) se calcula mediante una ecuación de exceso de tensión de corte (τ), donde la tensión de corte crítica (τ_c) se especifica en función de las características texturales de los suelos:

$$D_{f_j} = \begin{cases} c_{f_j} \left\{ \frac{\tau_j}{\tau_{c_j}} - 1 \right\}, & \tau_j > \tau_{c_j} \\ 0, & \tau_j \leq \tau_{c_j} \end{cases} \quad (6)$$

Los sedimentos producidos por impacto de lluvia y flujo sobre el terreno son propagados en la cuenca considerando el flujo superficial sobre el terreno (celdas valle) y el flujo encauzado en los cursos de agua (celdas río).

Propagación de sedimentos en celdas valle

El tránsito de sedimentos asociado al flujo sobre el terreno se simula considerando la capacidad de transporte del flujo y comparándola con la cantidad de sedimento disponible para el transporte, originado por la producción bruta local y por el suministro desde

celdas adyacentes. El tránsito se realiza aplicando la ecuación de continuidad de sedimentos cuasi-2D, considerando la j -ésima celda la misma se expresa como:

$$(1-p)A_j \frac{\partial z_{bj}}{\partial t} = \sum_{k=1}^N Q_{s_{j,k}} \quad (7)$$

donde p : porosidad del sedimento; A_j : área superficial total; z_{bj} : cota de fondo de celda y $Q_{s_{j,k}}$: caudal sólido efectivo intercambiado entre las celdas j y k . La resolución de la ecuación (7) determina los flujos horizontales de sedimentos en las celdas valle y los respectivos procesos de erosión-sedimentación. La capacidad de transporte del flujo sobre el terreno se calcula con la ecuación de Engelund-Hansen (1967) expresada como:

$$Q_{sc} = \frac{c_t}{\eta^r} \frac{Q^Z S^X}{B^Y d^W} \quad (8)$$

donde Q_{sc} : capacidad de transporte del flujo sobre el terreno, Q : caudal líquido, S : pendiente superficie libre del agua, B : ancho de transporte, d : diámetro del sedimento disponible para el transporte y η : coeficiente de rugosidad de Manning.

Propagación de sedimentos en celdas río

El tránsito de sedimentos correspondiente al flujo encauzado, es decir, en las celdas río, se realiza aplicando la ecuación de continuidad de sedimentos en suspensión, en la cual se considera el almacenamiento en la columna de agua, los flujos horizontales de sedimentos y los flujos verticales asociados a procesos de erosión-sedimentación del lecho:

$$\frac{\partial V_{s_j}}{\partial t} + \sum_k Q_{sr_{j,k}} + A_j \phi_{d_j} - A_j \phi_{e_j} = \sum_k Q_{sv_{j,k}} \quad (9)$$

donde V_s : volumen de sedimentos en la celda río, $V_s = V_w C_s$, siendo V_w el volumen de agua en la celda y C_s la concentración volumétrica de sedimentos; Q_{sr} : transporte de sedimentos en las celdas río; Q_{sv} : aportes de sedimentos provenientes de las celdas valle adyacentes y $\phi_{d,e}$: flujos verticales de sedimentos.

El flujo vertical de sedimentos hacia el lecho (tasa de deposición, ϕ_d) es expresado como:

$$\phi_d = P w_s C_s \quad (10)$$

donde P: probabilidad de deposición; w_s : velocidad de caída del sedimento en suspensión, calculada mediante la ley de Stokes: $w_s=(s-1)gd^2/18v$, con s: gravedad específica del sedimento, d: diámetro del sedimento y v: viscosidad cinemática. La probabilidad P de que una partícula de sedimento se deposite en el lecho y permanezca depositada es expresada como:

$$P = \begin{cases} 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} & ; \quad \tau_b < \tau_{cd} \\ 0 & ; \quad \tau_b \geq \tau_{cd} \end{cases} \quad (11)$$

donde $\tau_b = \rho g h S$ es la tensión de corte aplicada y τ_{cd} es la tensión de corte crítica para deposición.

El flujo vertical de sedimentos hacia arriba (tasa de re-suspensión, ϕ_e) se calcula mediante:

$$\phi_e = \begin{cases} E \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) & ; \quad \tau_b > \tau_{ce} \\ 0 & ; \quad \tau_b \leq \tau_{ce} \end{cases} \quad (12)$$

donde E: parámetro de erosión y τ_{ce} es la tensión de corte crítica para re-suspensión.

Para la resolución numérica del conjunto de ecuaciones se utiliza un esquema implícito. La resolución se realiza mediante un algoritmo matricial basado en el método de Gauss-Seidel. Las condiciones de borde posibles de imponer para la fase líquida son: a) Cota de agua en función del tiempo: $z(t)$; b) Caudal en función del tiempo: $Q(t)$ y c) Relación cota-caudal: $Q=f(z)$. Como condiciones iniciales el modelo requiere las alturas de agua en todas las celdas y las concentraciones de sedimentos.

Aplicación del modelo CTSS8-SED

Breve descripción del área de estudio

La cuenca del A° Ludueña se encuentra ubicada en el sur de la provincia de Santa Fe, Argentina (Fig.1). Su red de cursos principales y secundarios tiene una longitud de aproximadamente 110 km y los cauces se desarrollan sobre suelos cohesivos altamente resistentes a la erosión inducida por el flujo encauzado (Riccardi et al., 2005). Por otra parte, la erosión de márgenes por colapsos masivos son despreciables (Basile et al., 2005).

El área de la cuenca es de aproximadamente 700 km², con una pendiente media del curso principal de 1,33 ‰. Los horizontes superiores de los suelos preponderantes en la cuenca pueden

clasificarse texturalmente como franco-limosos, con porcentajes promedios de arena muy fina entorno al 6 %, arcilla 21 % y limo 73 %, el porcentaje promedio de materia orgánica es del 2 %. La sección de cierre de la cuenca se corresponde con el cruce del arroyo con el puente de Av. Circunvalación en la ciudad de Rosario. El caudal base es de 0,5 m³/s y el caudal medio anual es de 2,7 m³/s, habiéndose observado caudales picos del orden de los 400 m³/s durante la crecida extraordinaria de 1986.

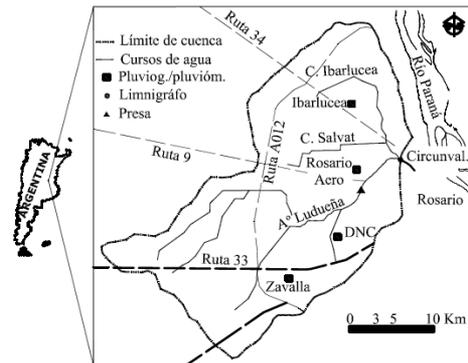


Fig. 1. Ubicación cuenca del Arroyo Ludueña.

La cuenca presenta una serie de intervenciones antrópicas tales como terraplenamientos viales y ferroviarios con sus correspondientes alcantarillas y puentes. La cuenca del A° Ludueña propiamente dicho se desarrolla casi enteramente al sur de la Ruta 9 (RN9), mientras que, al norte de dicha ruta se desarrolla el sistema formado por el canal Ibarlucea y el canal Salvat. La presa de detención de crecidas, en operación desde 1995, se ubica 1 km aguas arriba de la intersección del A° Ludueña con la RN9.

Transporte de sedimentos en suspensión

La carga sólida se compone en su totalidad de sedimentos finos ($d < 62.5 \mu m$) transportados en suspensión como carga de lavado. Las concentraciones de sedimentos en suspensión, medidas en el puente de Av. Circunvalación, varían entre 10 ppm y 750 ppm en peso. En la Fig. 2 se presenta la relación entre transporte de sedimentos en suspensión (Q_s) y caudal (Q) en Circunvalación.

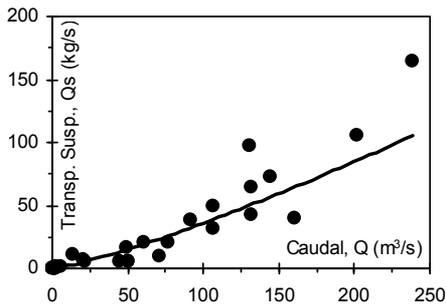


Fig. 2. Transporte suspensión en función del caudal líquido, en puente de Av. Circunvalación.

Implementación del modelo

El modelo se utilizó para simular el evento de crecida y los procesos de erosión-sedimentación producidos por la lluvia extraordinaria del 26 al 30 de marzo de 2007.

Para implementar el modelo se utilizó información pluviográfica registrada en la estación Rosario Aeropuerto. Como información adicional de lluvias se contó con la pluviometría de Zavalla, Ibarlucea y DNC. Además, se contó con el limnigrama registrado en Circunvalación, el cual fue convertido en hidrograma mediante la utilización de una curva nivel-caudal calibrada en la sección. Durante el evento se midieron concentraciones de sedimentos en suspensión, las cuales fueron procesadas en laboratorio. En la Fig. 1 se observa la localización de las distintas estaciones y en la Fig. 3 se presenta el hietograma medio de la cuenca.

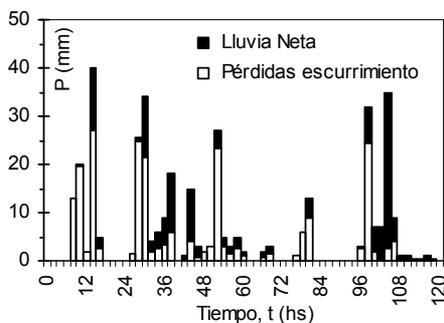


Fig. 3. Hietograma medio de la cuenca.

El total precipitado, registrado en la estación Rosario Aero, fue de 365 mm y la lluvia neta (media en el área de la cuenca) fue de 155 mm. El hidrograma en Circunvalación presentó un

primer pico a las 50 hs. de 150 m³/s y un segundo pico de 250 m³/s a las 110 hs.

Para constituir el modelo se probaron diferentes discretizaciones topológicas y espaciales, considerando principalmente los trazados de las vías de comunicación con importantes terraplenamientos, los cursos principales y secundarios, las obras de arte (alcantarillas y puentes) y la dinámica hídrica superficial observada en crecidas históricas.

En la sección de cierre de Circunvalación se especificó la condición de borde mediante una relación nivel-caudal. Una vez discretizado espacialmente el dominio se procedió a digitalizar la información proveniente de curvas de nivel de la cuenca con lo que se determinaron las cotas de fondo de cada celda. Además, se incorporaron datos topográficos provenientes del relevamiento de aproximadamente 300 secciones transversales de cursos principales, secundarios y cunetas, es decir, aprox. una sección transversal por km en promedio. Por otra parte, se incorporaron datos geométricos actualizados provenientes del relevamiento de 100 alcantarillas y puentes. Las celdas cuadradas se especificaron de 1000 m de lado. La pendiente lateral y el ancho mínimo de celdas valle fueron de 0,009 y 0,1 m respectivamente. La cuenca se discretizó con 701 celdas, quedando conformadas 1324 vinculaciones (Fig. 4).

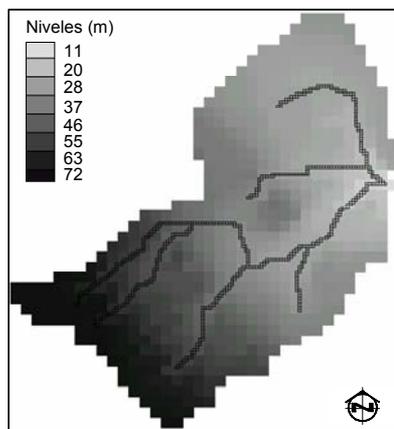


Fig. 4. Discretización y topografía de la cuenca.

Con esta discretización se simularon crecidas considerando la unión de tipo valle- valle como única vinculación posible. Una vez que se constató la conectividad entre las celdas se incorporaron las celdas correspondientes a

los canales y al arroyo. Posteriormente se incorporaron las alcantarillas y terraplenes viales y ferroviarios.

En el proceso de calibración del modelo para el escurrimiento superficial se ajustaron los coeficientes de rugosidad de Manning η de las celdas y los coeficientes de gasto en puentes y alcantarillas. En las celdas valle los valores de η variaron entre 0,1 y 0,15; en las celdas del curso principal η varió entre 0,035 y 0,050; mientras que, en las celdas de los cursos secundarios el mismo varió entre 0,040 y 0,060. Los coeficientes de gasto en puentes y alcantarillas variaron entre 0,6 y 0,9. Además, se especificaron los siguientes parámetros sedimentológicos: $s=1,65$, $p=0,5$, $\tau_{bc}=2,45 \text{ N/m}^2$, $\tau_{ce}=0,6 \text{ N/m}^2$, $\tau_{cd}=0,08 \text{ N/m}^2$ y $E=1,3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$. Los exponentes en la ecuación de transporte de Engelund-Hansen adoptaron los siguientes valores: $z=1,7$, $x=1,65$, $y=0,7$, $w=1$, $r=0,3$, los cuales surgen de expresar dicha ecuación en función del caudal líquido y la pendiente hidráulica. La fracción del área de celda protegida por canopeo de soja y rastrojo de trigo se especificó igual a 0,8. Los coeficientes c_p , c_r y c_i son los parámetros que controlan el proceso de producción y transporte de sedimentos en el modelo. Para el evento modelado se contaron con mediciones de concentración de sedimentos en Circunvalación. Por lo tanto, se especificaron valores de c_p y c_r sugeridos en la literatura, en función de las características texturales de los suelos extraídas de carta de suelos del INTA, mientras que, el coeficiente c_i se ajustó a los efectos de reproducir las mediciones de transporte de sedimentos en la sección de Circunvalación.

El coeficiente de erosionabilidad asociado al flujo sobre el terreno c_i , de acuerdo a la clasificación textural franco-limosa de los suelos, se especificó igual a $2,5 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Análogamente, el coeficiente de erosionabilidad de suelo por impacto de gotas de lluvia c_p se especificó igual a $17 \text{ (kg m}^2 \text{ s}^{-2})^{-1}$ para todas las celdas. Además, el coeficiente ajustado de la ecuación de transporte fue: $c_i=0,002 \text{ m}^{-1/2} \text{ s}$.

Análisis de resultados

En la Fig. 5 se presenta la comparación entre el hidrograma calculado y los caudales observados en Circunvalación, conjuntamente con el sedimentograma calculado y los valores observados de transporte de sedimentos en suspensión en la misma sección de cierre. En dicha Figura el sedimentograma calculado muestra un primer pico de aproximadamente 165 kg/s y un segundo pico de aprox. 298 kg/s. La producción neta de sedimentos, calculada en

Circunvalación, es de 58700 ton; con un SDR de 0,19. Los resultados del modelo son muy satisfactorios, observándose un buen ajuste entre valores calculados y medidos; en efecto, el valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe es igual a 0,86 para el caudal líquido y 0,68 para el transporte de sedimentos en suspensión.

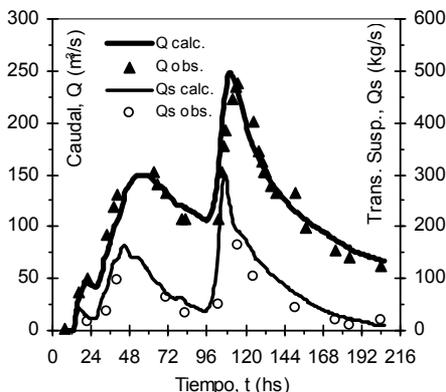


Fig. 5. Caudal y transporte en suspensión calculado y observado en Circunvalación.

A los efectos de visualizar y cuantificar los procesos sedimentológicos espacialmente distribuidos se construyó un mapa de erosión/sedimentación.

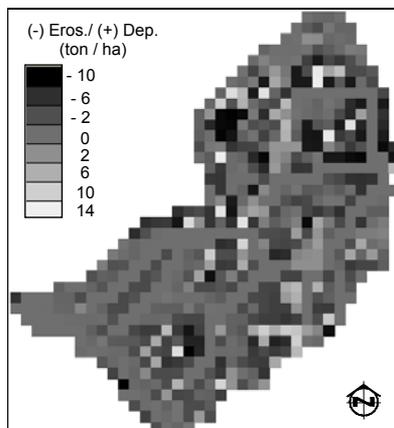


Fig. 6. Mapa de erosión/deposición neta.

En la Fig. 6 se presenta la distribución espacial de erosión/deposición neta. El mapa se construyó definiendo erosión (negativa) / deposición (positiva) como la diferencia entre el volumen final de sedimento acumulado en la j -ésima celda y la correspondiente integral

temporal de la producción bruta total de sedimentos. Las zonas de sedimentación neta se localizan aguas arriba de alcantarillas, reservorios de detención y celdas de bajo gradiente topográfico. Valores elevados de erosión neta se observan aguas abajo de alcantarillas y en celdas con pendientes más acentuadas. Por otra parte, para una evaluación más detallada de estos procesos, se realizó un análisis de frecuencia en término de número de celdas (o área) entre un intervalo de clase de erosión/sedimentación neta de $\pm 0,5$ ton/ha. La erosión neta máxima fue de $-9,91$ ton/ha, la mínima de $-0,58 \times 10^{-4}$ ton/ha, y un valor medio de $-2,75$ ton/ha con un desvío estándar de $2,63$ ton/ha. Por otro lado, la sedimentación neta máxima fue de $13,75$ ton/ha, la mínima de $2,08 \times 10^{-4}$ ton/ha y la media de $3,45$ ton/ha con un desvío estándar de $3,73$ ton/ha. En la Fig. 7 se presentan las curvas de frecuencia relativa y acumulada. Se observa que aproximadamente el 74% del área total de la cuenca fue afectada por erosión, mientras que, el restante 26% por sedimentación. Además, cerca del 46% de las celdas experimentaron una erosión neta comprendida entre $-0,58 \times 10^{-4}$ ton/ha y el valor medio de $-2,75$ ton/ha.

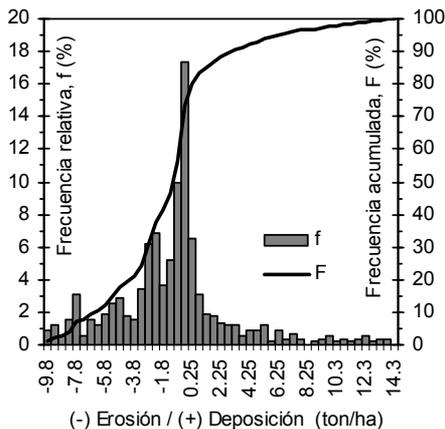


Fig. 7. Análisis de frecuencia de erosión / deposición neta.

Las tendencias observadas en campos cultivados bajo el sistema de siembra directa indican que las pérdidas de suelo anuales (erosión neta) son inferiores a -2 ton/ha, bastante menores que el valor máximo tolerable, que puede establecerse en el orden de las -10 ton/ha. Actualmente, en la cuenca del A° Ludueña casi la totalidad de los cultivos se realizan con sistema de siembra directa.

Considerando que el evento simulado es extraordinario (muy superior a los eventos ordinarios anuales) se observa que solo el 2% del área total experimenta erosiones netas en el rango de -10 a -9 ton/ha, es decir, cercanas a las erosiones máximas tolerables. Asimismo, el valor promedio para el 74% del área total es de $-2,75$ ton/ha.

Conclusiones

El modelo hidro-sedimentológico CTSS8-SED presentado en el trabajo es apropiado para simular escurrimiento superficial por eventos y procesos asociados de erosión/sedimentación en forma físicamente basada y espacialmente distribuida en cuencas de llanura.

Muchos de los modelos mencionados en la introducción representan la dinámica del escurrimiento superficial en forma simplificada mediante modelos unidimensionales del tipo de tránsito directo, de tránsito hidrológico o de onda cinemática. Tal representación de procesos propagatorios para el flujo sobre el terreno y encauzado no es adecuada en zonas de llanura antropizadas, donde el escurrimiento es condicionado por terraplenamientos viales y ferroviarios, alcantarillas, puentes, etc.. En efecto, por un lado, tal abordaje no permite transmitir información hidrodinámica hacia aguas arriba y, además, en numerosas situaciones la unidimensionalidad no es representativa del patrón de escurrimiento real. Efectivamente, en las simulaciones se observa que tales estructuras producen remansos que afectan las variables del flujo hasta distancias considerables aguas arriba. Por otra parte, cuando los cursos de agua desbordan la dinámica del escurrimiento en valle es preponderantemente bidimensional y el flujo es gobernado por la pendiente hidráulica en vez de la pendiente topográfica.

El modelo reprodujo satisfactoriamente los hidrogramas y sedimentogramas observados, obteniéndose parámetros de flujo espacialmente distribuidos que permitieron evaluar adecuadamente los procesos de disgregación por impacto de gotas de lluvia, disgregación por flujo sobre el terreno y los procesos propagatorios del sedimento. Las tasas de erosión neta calculadas se corresponden con las pérdidas de suelo observadas en la llanura pampeana en campos bajo siembra directa.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONICET y a la UNR por el apoyo brindado a través de los proyectos PIP 5308 y PID-UNR 19-I269 (ING246).

Referencias

- Alberts, E.E., M.A. Nearing, M.A. Weltz, L.M. Risse, F.B. Pierson, X.C. Zhang, J.M. Laflen y J.R. Simanton, 1995. Soil component. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. Ch. 7, pp. 7.1-7.45. NSERL Rep. N°10. USDA-ARS NSERL, West Lafayette, IN.
- Arnold J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah y J.R. Williams, 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Basile, P.A., 2007. Módulos sedimentológicos acoplados al modelo hidrológico-hidráulico cuasi-2D físicamente basado y espacialmente distribuido CTSS8. Reporte Técnico I0207. Departamento Hidráulica-EIC, FCEIA-UNR.
- Basile, P.A.; G. Riccardi; H. Stenta y M. Garcia, 2005. Evaluación de Procesos de Erosión/Sedimentación en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña. *II Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Neuquén.
- Beasley, D.B.; L.F. Huggins y E.J. Monke, 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. *Trans. of the ASAE*, 23(4), 938-944.
- Bingner, R.L. y F.D. Theurer (2001). AnnAGNPS Technical Processes: Documentation Version 2.
- Chen, C.N.; C.H. Tsai y C.T. Tsai, 2006. Simulation of sediment yield from watershed by physiographic soil erosion-deposition model. *Journal of Hydrology*, 327, 293-303.
- Chow Ven Te, 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw Hill, New York, USA.
- Chow Ven Te, D.R. Maidment y L.W. Mays, 1994. *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill Interamericana S.A. ISBN 958-600-171-7.
- Clark, E.H., 1985. The off-site costs of soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation* 40, 19-22.
- Crosson, P., 1997. Will erosion threaten agricultural productivity?. *Environment* 39, 4-5.
- Engelund F. y A. Hansen (1967) A monograph on sediment transport in alluvial streams. Tech. Univ. of Denmark.
- Foster G.R. y L.J. Lane, 1987. User requirements UDSA-Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL Report N° 1, USDA-ARS NSERL, West Lafayette, IN., 43 p.
- Heppner, C.S.; Q. Ran; J.E. VanderKwaak y K. Loague, 2006. Adding sediment transport to the integrated hydrology model (InHM): Development and testing. *Advances in Water Resources* 29, 930-943.
- Julien, P. y R. Rojas, 2002. Upland Erosion Modeling with CASC2D-SED. *International Journal of Sediment Research*, ISSN 1001-6279, 17 (4), 265-274.
- Laws J.O. y J.A. Parsons, 1943. The relation of raindrop size to intensity. *Trans. Am. Geophys. Union*, 24, 452-460.
- Park, S.W., J.K. Mitchell y J.N. Scarborough, 1982. Soil erosion simulation on small watershed: a modified ANSWER model. *Transactions ASAE* 25, 1581-1588.
- Renard, K.G.; G.R. Foster; G.A. Weesies y J.P. Porter, 1991. RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation. *J. Soil Water Conserv.* 46(1), 30-33.
- Riccardi, G., 2000. Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos. Tesis Doctoral, FCEfYN, UNC, Córdoba.
- Riccardi, G.; P.A. Basile; H. Stenta; G. Riesco y P. Baglietto, 2005. Ajuste Regional de Predictores de Erosión en Lechos Cohesivos. *XX Congreso Nacional del Agua*, Mendoza.
- Steege, A.; G. Govers; L. Takken; J. Nachtergaele; J. Poesen y R. Merckx, 2001. Factors controlling sediment and phosphorous export from two Belgian agricultural catchments. *Journal of Environmental Quality* 30, 1249-1258.
- Stenta, H.; J.P. Rentería y G. Riccardi, 2005. Plataforma computacional para gestión de información en la simulación hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial. *XX Congreso Nacional del Agua*, Mendoza.
- Sun, H.; P.S. Cornish y T.M. Daniell, 2002. Contour-based digital elevation modeling of watershed erosion and sedimentation: Erosion and sedimentation estimation tool (EROSSET). *Water Resources Research*, 38(11), 1-10.
- Wicks, J.M, J.C. Bathurst, C.W. Johnson y T.J. Ward, 1988. Application of two physically-based sediment yield models to plot and field scale. *IAHS Publication* 174, pp.583-591.
- Wicks, J.M. y J.C. Bathurst, 1996. SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yields component for the SHE hydrological modelling system. *Journal of Hydrology*, 175, 213-238.
- Woolisher, D.A.; R.E. Smith y D.C. Goodrich, 1990. KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. USDA, Rep. ARS-77, Fort Collins.
- Young, R.A.; A. Onstad; D. Bosch y P. Anderson 1987. AGNPS, Agricultural nonpoint-source pollution model: A watershed analytical tool. USDA, Conservation Research Report N° 35.