

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**UN MODELO FÍSICAMENTE BASADO PARA SIMULACIÓN
DE PROCESOS DE EROSIÓN-SEDIMENTACIÓN
EN CUENCAS DE LLANURA**

Pedro A. Basile^{(1),(2)}, ***Gerardo Riccardi***^{(1),(3)} y ***Hernán Stenta***⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Prof. Adjunto – ⁽²⁾ Investigador CONICET – ⁽³⁾ Investigador CIUNR – ⁽⁴⁾ Becario Doctoral CONICET

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina - Telefax: ++54 +341 4808541

E-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar - Web: <http://www.fceia.unr.edu.ar/curiham>

RESUMEN: En el presente trabajo se describe la formulación, implementación computacional y la aplicación del modelo físicamente basado y espacialmente distribuido CTSS8_SED. El modelo es apropiado para simular procesos hidrológicos-hidráulicos y procesos de erosión-sedimentación en cuencas de llanura. El modelo opera a escala temporal de eventos de crecidas y permite calcular la tasa de disgregación de suelo por impacto de lluvia y por el flujo sobre el terreno (producción bruta de sedimentos), el transporte de sedimentos ejercido por el flujo sobre el terreno y los procesos de erosión-sedimentación en las celdas valle. El tránsito de sedimentos en las celdas río (flujo encauzado) tiene en cuenta los procesos de erosión-sedimentación del lecho y el aporte de sedimentos proveniente de las celdas valle. Los procesos propagatorios del flujo hídrico superficial y del sedimento se representan en forma cuasi-bidimensional mediante esquemas de celdas. Mediante la aplicación del modelo se simularon los procesos hidro-sedimentológicos observados durante el evento del 03/04/1994 en la cuenca del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina.

ABSTRACT: In this work the formulation, implementation and application of the physically-based and spatially distributed mathematical model CTSS8_SED is presented. The model simulates hydrologic-hydraulic processes due to storm events and related soil erosion and sediment transport processes in lowland basins. The model simulates storm runoff, soil erosion by raindrop impact and overland flow (gross sediment yield), sediment transport by overland flow and associated erosion-deposition process. For channel flow the model simulates sediment routing by considering bed erosion-deposition processes and incoming load of sediments by overland flow. A quasi two dimensional representation of water flow and sediment transport routing is made by means of interconnected cells. The model was applied to simulate the hidro-sedimentological processes observed during the event of 03/04/1994 in the Ludueña Creek basin, Santa Fe, Argentina.

PALABRAS CLAVE: modelación hidro-sedimentológica, erosión, sedimentación, A° Ludueña.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de erosión asociados al flujo hídrico se pueden dividir en procesos de erosión superficial y en procesos de erosión lineal. Tal distinción se relaciona con la división entre el flujo superficial sobre el terreno y el flujo encauzado. El flujo sobre el terreno es responsable de la erosión superficial, extendida sobre toda la superficie de la cuenca. El flujo encauzado induce la erosión lineal del lecho y de las márgenes a lo largo de los cursos de agua. Las consecuencias de la erosión hídrica superficial se observan in-situ a nivel local y en zonas alejadas del lugar de generación del sedimento. Los efectos a nivel local son importantes en suelos destinados a la agricultura. En efecto, la desintegración de la estructura del suelo y la pérdida de materia orgánica y nutrientes de los horizontes superiores induce una disminución de su productividad, lo cual conduce a un mayor gasto en fertilizantes y más tarde puede ocasionar el abandono de la agricultura en dichas tierras (Pimentel et al., 1995; Crosson, 1997). Además de este problema local, generado por la erosión a nivel de cuenca, existe el problema creado por la deposición de dicho sedimento en planicies de inundación, embalses, canales de navegación, sistemas de conductos pluviales, etc. (Clark, 1985; Boardman et al., 1994; Verstraeten et al., 1999). Asimismo, los sedimentos finos son susceptibles de adsorber sustancias contaminantes, como agroquímicos, etc., lo cual puede inducir un incremento de los niveles de nitrógeno y fósforo en los cuerpos de agua receptores y desencadenar procesos de eutrofización (Steege et al., 2001).

Para estimar la erosión hídrica a escala de cuenca se emplean generalmente modelos matemáticos. Los modelos para el pronóstico de erosión hídrica pueden ser clasificados en (i) empíricos, (ii) físicamente basados o (iii) una combinación de los dos primeros (Sun et al., 2002). Por otra parte, en función de la escala temporal para la cual han sido desarrollados, los modelos permiten estimar la erosión producida por un evento hidrológico particular, otros permiten la simulación continua y otros estiman la erosión media anual. Entre los modelos por eventos pueden mencionarse: ANSWERS (Beasley et al., 1980), AGNPS (Young et al., 1987), KINEROS (Woolisher et al., 1990), CASC2D-SED (Julien et al., 2002), EROSET (Sun et al., 2002), PSED (Ching-Nuo Chen et al., 2006), CTSS8_SEDMU (Basile et al., 2007a). Algunos modelos de simulación continua son: ANSWERS-Continuous (Bouraoui et al., 1996), SHESED (Wicks et al., 1996), SWAT (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2002), AnnAGNPS (Bingner et al., 2001), InHM (Heppner et al., 2005) y para estimación de la erosión media anual: WaTEM/SEDEM (Van Rompaey et al., 2001), EROSUP-U (Basile et al., 2005a).

En este trabajo se presenta la formulación, la implementación computacional y la aplicación del modelo CTSS8_SED, apropiado para simular procesos hidro-sedimentológicos a escala temporal de eventos, en forma físicamente basada y espacialmente distribuida en cuencas de llanura. Mediante la aplicación del modelo se simuló la evolución de los procesos hidro-sedimentológicos observados durante el evento del 3 de abril de 1994 en la cuenca del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina.

BREVE DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRO-SEDIMENTOLÓGICO CTSS8-SED

El modelo hidrológico-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:

$$A_{s,j} \frac{\partial z_j}{\partial t} = (A_s i)_j + \sum_{k=1}^N Q_{j,k} \quad [1]$$

donde z_j : nivel del agua; $A_{s,j}$: área superficial de la celda; t : tiempo; i_j : intensidad de lluvia; $Q_{j,k}$: caudal líquido intercambiado entre las celdas j y k , con N : número de celdas interconectadas con la celda j .

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:

$$Q_{j,k}^{(n)} = \text{signo} [z_j^{(n)} - z_k^{(n)}] \frac{K_{j,k}}{\sqrt{\Delta x_{j,k}}} \sqrt{|z_j^{(n)} - z_k^{(n)}|} \quad [2]$$

donde $K_{j,k}$: factor de conducción, $\Delta x_{j,k}$: distancia entre centros de celdas y z_k : nivel de agua, celda k. Para contemplar condiciones de flujo particulares se utilizan leyes de descarga para puentes, vertederos, alcantarillas, etc.. El modelo es operado desde una plataforma computacional desarrollada en entorno Windows[®] (Stenta et al., 2005).

Al modelo CTSS8 se le ha incorporado el cálculo de procesos sedimentológicos en forma físicamente basada y espacialmente distribuida (Basile, 2007b). El modelo hidro-sedimentológico denominado CTSS8_SED permite calcular la tasa de disgregación de suelo por impacto de la lluvia y por el 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.

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 (i), de la profundidad de flujo superficial y de la cobertura vegetal de la celda, para la j -ésima celda tenemos:

$$D_{p_j} = c_{p_j} \alpha i_j^\beta f_{h_j} f_{c_j} \quad [3]$$

donde α y β : coeficientes dependientes de la intensidad de lluvia (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; Ma, 1995) 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.

Por otra parte, la tasa de disgregación por flujo sobre el terreno (D_f) 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 (Alberts et al., 1995):

$$D_{f_j} = \begin{cases} c_{f_j} \{(\tau_j / \tau_{c_j}) - 1\} & \tau_j > \tau_{c_j} \\ 0 & \tau_j \leq \tau_{c_j} \end{cases} \quad [4]$$

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).

El tránsito de sedimentos asociado al flujo superficial 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:

$$(1-p)A_{s_j} \frac{\partial z_{b_j}}{\partial t} = \sum_{k=1}^N Q_{s_{j,k}} \quad [5]$$

donde p : porosidad del sedimento; z_{bj} : cota de fondo de celda y $Q_{s,j,k}$: caudal sólido intercambiado entre las celdas j y k . La resolución de la ecuación [5] 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:

$$Q_{sc} = \frac{c_t}{\eta_v^r} \frac{Q^z S^x}{B^y d^w} \quad [6]$$

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

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:

$$\frac{\partial V_{sj}}{\partial t} + \sum_k Q_{sr,j,k} + A_{sj} \phi_{sj} = \sum_k Q_{sv,j,k} \quad [7]$$

donde V_s : volumen de sedimentos en la celda río, $V_s = A_{sj} h C_s$, siendo h la profundidad de flujo 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 ϕ_s : flujo vertical de sedimentos finos, definido en función de la tensión de corte sobre el lecho y las correspondientes tensiones de corte críticas para inicio de deposición y erosión.

Los coeficientes de erosionabilidad de suelo por impacto de gotas de lluvia y por flujo sobre el terreno, c_p y c_f respectivamente, son los parámetros que controlan la producción bruta de sedimentos. Puede señalarse que, si en la cuenca se cuentan con aforos sedimentológicos, tales coeficientes pueden considerarse como parámetros de calibración. En cambio, para simulaciones de pronóstico de procesos de erosión-sedimentación, en cuencas sin aforos sedimentológicos, es recomendable utilizar los valores orientativos sugeridos en la literatura de acuerdo a la composición textural de los suelos y contrastar los resultados analizando variaciones de producción neta y concentraciones físicamente plausibles para la zona en estudio. En manera análoga a lo comentado para los coeficientes c_p y c_f , el coeficiente de proporcionalidad de la ecuación de transporte de sedimentos c_t puede ser objeto de calibración si se cuentan con mediciones sedimentológicas.

Para la resolución numérica del conjunto de ecuaciones se utiliza un esquema implícito. La resolución numérica 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 HIDRO-SEDIMENTOLÓGICO

Breve descripción del área de estudio

La cuenca del A° Ludueña se encuentra ubicada en el sur de la provincia de Santa Fe (Argentina) y comprende parte de la ciudad de Rosario y un grupo de 8 poblaciones (Figura 1). Su red de cursos permanentes y transitorios 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). El área de la cuenca es de aproximadamente 700 km², con una pendiente media del curso principal de 0.00133 (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 de alrededor del 2 %. La sección de control corresponde al cruce del arroyo con el puente de la 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 del año 1986. La carga sólida se compone en su totalidad de sedimentos finos transportados en suspensión como carga de lavado. Las concentraciones de sólidos suspendidos para caudales líquidos ordinarios, medidas recientemente en el puente de Av. Circunvalación, varían entre 10 ppm y 700 ppm en peso. Por tratarse de un sistema hidrológico de llanura, en el A° Ludueña los procesos de remoción masivos están descartados. Por otra parte, el aporte correspondiente a los procesos de erosión debido al flujo encauzado pueden considerarse mucho menores que los producidos por erosión superficial (Basile et al., 2005b).

La cuenca presenta una serie de intervenciones antrópicas tales como terraplenes de rutas y ferrocarriles, alcantarillas, puentes, presa de retención de crecidas, etc. La cuenca del A° Ludueña propiamente dicho se desarrolla casi enteramente al sur de la Ruta Nacional N° 9 (RN9), mientras que, al norte de dicha ruta se desarrolla el sistema formado por el canal Ibarlucea y el canal Salvat. Actualmente se encuentra en funcionamiento una presa retardadora de crecidas, que se ubica aproximadamente 1 km aguas arriba de la intersección del A° Ludueña con la RN9. El área de aporte que delimita el cierre de la presa es de 440 km² aproximadamente. El embalse creado por el cierre se encuentra normalmente vacío. La presa retardadora de crecidas entró en funcionamiento en el año 1995. En inmediaciones del cruce del A° Ludueña con la Av. de Circunvalación de Rosario (6 km aguas abajo de la intersección con la RN9) el arroyo recibe el aporte de la cuenca del canal Ibarlucea (sistema formado por el canal Ibarlucea y el canal Salvat) cuya área de aporte es de aproximadamente 240 km². Aguas abajo de la Av. de Circunvalación el A° Ludueña recorre zonas densamente pobladas de la ciudad de Rosario hasta desembocar en el río Paraná. En parte de este recorrido urbano el arroyo se encuentra entubado en un tramo de 1,5 km mediante 5 grandes conductos subterráneos cuya capacidad global de conducción es de 300 m³/s aproximadamente. El sistema de grandes conductos está constituido por una obra de embocadura de donde salen 5 conductos, uno de los cuales acomete en uno mayor aguas abajo, llegando a la obra de desembocadura 4 conductos. El tramo desde la desembocadura del entubamiento hasta la desembocadura en el río Paraná tiene una longitud de 1 km aproximadamente.

Descripción de la problemática asociada a la producción de sedimentos en la cuenca

Los sedimentos erosionados en la cuenca, además de degradar la potencialidad productiva de los suelos, contribuyen con los procesos de sedimentación que se verifican actualmente en la presa de retención de crecidas y en las zonas de los entubamientos del arroyo Ludueña en la ciudad de Rosario. En efecto, parte de los sedimentos generados en la cuenca del A° Ludueña propiamente dicho son retenidos por la presa y contribuyen con el proceso de sedimentación a largo plazo del vaso de la misma. Evaluaciones de erosión y sedimentación realizadas con el modelo EROSUP-U (Basile et al., 2005a) han evidenciado que la capacidad de almacenamiento de la presa no se ve sustancialmente afectada por el proceso de sedimentación a largo plazo, incluso para aportes sólidos máximos evaluados considerando la erosión potencial. Esto se debe a la baja eficiencia de atrape de sedimentos que presenta la presa, justificada por la modalidad de transporte de los sedimentos extremadamente finos aportados por la cuenca de influencia, los cuales, al estar el embalse normalmente vacío (bajos tiempos de retención) pueden alcanzar con cierta facilidad los descargadores de fondo no regulados que posee la presa.

Por lo tanto, los conductos del entubamiento pueden ser sujetos a un severo proceso de sedimentación. En efecto, los sedimentos que pasan a través de las estructuras de descarga de la presa y los sedimentos generados en el sector de la cuenca comprendido entre la presa y la Av. Circunvalación se suman a los sedimentos producidos por la cuenca del canal Ibarlucea. Dicha carga sólida ingresa a la zona de la embocadura de los entubamientos del A° Ludueña en la ciudad de Rosario, localizada aproximadamente 3 km aguas abajo del cruce con Av. Circunvalación. La zona comprendida entre la embocadura del sistema de conductos y la desembocadura del A° Ludueña en el río Paraná funciona como una suerte de embalse, espontáneamente regulado por las fluctuaciones de niveles hidrométricos del río Paraná, lo cual induce la deposición de una parte de los sedimentos que ingresan, mientras que, la parte restante se descarga en el río Paraná.

Implementación del modelo

El modelo se utilizó para simular un evento de crecida y los procesos de erosión-sedimentación producido por la lluvia extraordinaria del 03/04/1994. En esa fecha todavía no estaba en funcionamiento la presa retardadora de crecidas. El total medio precipitado sobre la cuenca del A° Ludueña en esa ocasión fue de 155 mm, con una lluvia neta de 106 mm y un caudal máximo de 200 m³/s en la sección de Av. Circunvalación.

Para implementar el modelo se utilizaron hietogramas provenientes de tres estaciones de la cuenca: Rosario Aeropuerto, Despacho Nacional de Cargas (DNC) e Ibarlucea, además, se contó con los limnigramas registrados en las estaciones del Golf Club y de Av. Circunvalación. En la Figura 2 se observa la localización de las distintas estaciones y en las Figuras 3 a 5 se presentan los hietogramas de lluvia total correspondientes a cada estación, donde en color gris se indica la lluvia neta. Como información adicional de lluvias se contó con la pluviometría de las estaciones Zavalla y Coronel Arnold. La lluvia neta se estimó en base a la operación del modelo de simulación para áreas de llanuras SHALL3 (Zimmermann, 2000) el cual fue calibrado oportunamente.

Para constituir el modelo se probaron diferentes discretizaciones topológicas y espaciales en busca del mejor grado de detalle alcanzable con la información disponible, considerando principalmente los trazados de las vías de comunicación con importantes terraplenamientos, los cursos principales y cañadones secundarios, las obras de arte (alcantarillas y puentes) y la dinámica hídrica superficial observada en crecidas históricas. La cuenca se discretizó con 779 celdas, quedando conformadas 1473 vinculaciones (Figura 6). En la sección de control de Av. Circunvalación se especificó la condición de borde mediante una relación nivel hidrométrico-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. Con esta primer 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 cada etapa se realizaron corridas de prueba y se realizaron controles de continuidad, celeridad de onda, ausencia de inestabilidades y otras perturbaciones numéricas asociadas al flujo hídrico. Debe destacarse el hecho que, al trabajar con este tipo de dominio de cálculo, es necesario constituir el modelo en etapas y ejecutar simulaciones de prueba en cada una de ellas para poder ejercer un control efectivo sobre los parámetros de flujo calculados.

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.

Los coeficientes c_p , c_f y c_t son los parámetros que controlan el proceso de producción y transporte de sedimentos en el modelo. Para el evento modelado no se contaron con mediciones de concentración de sedimentos en ninguna sección del arroyo. Por lo tanto, se especificaron valores de dichos coeficientes sugeridos en la literatura, en función de las características texturales de los suelos extraídas de carta de suelos del INTA. De todos modos, los resultados obtenidos se compararon con otras predicciones realizadas utilizando métodos empíricos y semi-empíricos que pudieron ser calibrados con información sedimentológica disponible.

El coeficiente de erosionabilidad asociado al flujo sobre el terreno c_f , de acuerdo a la clasificación textural franco-limosa de los suelos, se especificó igual a $0.15 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^2$ (Wicks et al., 1996). Análogamente, el coeficiente de erosionabilidad de suelo por impacto de gotas de lluvia c_p se especificó igual a $16 (\text{kg m}^2 \text{ s}^{-2})^{-1}$ para todas las celdas (Meyer et al., 1984). La fracción del área de celda con cobertura vegetal se especificó igual a 0.6. El coeficiente de proporcionalidad en la ecuación de transporte de Engelund-Hansen fue igual a $c_t=0.002$, mientras que los exponentes 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.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 7 se presentan los hidrogramas calculados en Av. Circunvalación y en el Golf Club, conjuntamente con los hidrogramas observados durante el evento del 03/04/1994. El limnógrafo en el Golf Club, debido a un mal funcionamiento, solo registró la parte final de la rama descendente del hidrograma. En los hidrogramas calculados se nota que el modelo genera una curva de descenso más empinada que la observada, lo cual se atribuye directamente a la incertidumbre acerca de los mecanismos reales de almacenamiento a escala de subgrilla. Sin embargo, considerando el nivel de detalle adoptado, los resultados obtenidos con el modelo son igualmente muy satisfactorios. Además, es necesario resaltar las capacidades del modelo para simular los procesos hidráulicos en forma espacialmente distribuida y multidireccionalmente, lo cual permite representar en forma adecuada los procesos propagatorios en áreas de llanura fuertemente antropizadas.

Considerando el cierre en Av. Circunvalación la producción bruta de sedimentos calculada con el modelo CTSS8_SED es de 207470 T con una redeposición interna de 158000 T y una producción neta de sedimentos de 49470 T, esto hace que, para de sistema hidrológico completo, la relación de erogación de sedimentos sea $SDR=0.24$ y la degradación específica igual a 71 T/km^2 . En la Figura 8 se observa el hidrograma calculado en Av. Circunvalación conjuntamente con la distribución temporal de la producción neta de sedimentos (sedimentograma) cuyo pico alcanza los 300 kg/s aproximadamente. La concentración media asociada al evento es de 655 ppm en peso, con picos instantáneos de aproximadamente 1500 ppm en peso y valores mínimos entorno a los 240 – 100 ppm en peso en la parte de recesión de caudales líquidos. En la Figura 9 se presenta el hidrograma calculado en la sección Golf Club y el correspondiente sedimentograma, el cual distribuye temporalmente una producción neta de 29400 T y cuyo pico alcanza los 230 kg/s. Esta producción neta representa el 60% del aporte de sedimentos neto en Av. Circunvalación y se le puede asociar una concentración media de 390 ppm en peso. Por otra parte, el aporte de sedimentos neto proveniente de la subcuenca Ibarlucea-Salvat es de 20070 T, el cual representa el 40 % restante del aporte de sedimentos neto en Av. Circunvalación. Estos mismos porcentajes de distribución de aportes han sido determinados en predicciones realizadas precedentemente con otros modelos de tipo empírico y semi-empíricos (Basile et al., 2005a; Basile et al., 2007a).

Por ejemplo, el aporte total de sedimentos en Av. Circunvalación estimado con el modelo CTSS8_SEDMU (Basile et al., 2007a) para el mismo evento es de 63756 T, el cual puede

descomponerse en 37763 T (aproximadamente el 60 %) proveniente del Ludueña propiamente dicho y el restante 40 % aproximadamente, es decir, 25993 T proveniente del canal Ibarlucea-Salvat. La concentración de sedimentos media estimada para el evento, inmediatamente aguas abajo del puente de Av. Circunvalación, es de 838 ppm en peso. En este caso, se trata de un modelo semi-empírico agregado a escala de subcuenca.

Por otra parte, la producción neta media anual en Av. circunvalación evaluada con el modelo EROSUP-U (Basile et al., 2005a), oportunamente calibrado con el volumen observado de sedimentos depositados en el entubamiento del A° Ludueña en un período de 8 años, es de 30140 T (SDR=0.23) con el 61 % proveniente del Ludueña y el 39 % proveniente del Ibarlucea-Salvat (Basile et al., 2005a). La producción neta estimada con el modelo CTSS8_SED para el evento es casi 1,6 veces mayor que este valor. A fines comparativos es válido utilizar este valor ya que el modelo EROSUP-U estima la producción neta media anual a largo plazo, es decir, promediada en un período de diez o más años. Mientras que, la producción neta estimada con el presente modelo se corresponde con un evento extraordinario, en cual el volumen de escurrimiento directo fue superior al total escurrido a lo largo de un año hidrológico ordinario completo. Por lo tanto, es verosímil que la producción de sedimentos neta se posicione por encima del valor medio para una serie de años. Además, mediciones recientes realizadas en Av. Circunvalación muestran que, para caudales ordinarios, la concentración instantánea de sedimentos en suspensión varía entre 10 y 700 ppm en peso. Mientras que, la concentración de sedimentos media para el evento, calculada en función del aporte sólido total y el volumen del hidrograma, es de 655 ppm en peso, con picos entorno a las 1500 ppm en peso. Tales valores son verosímiles si se comparan con los valores medidos y se considera que el evento hidrológico fue extraordinario, con aproximadamente 100 mm de precipitación neta sobre la cuenca.

CONCLUSIONES

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

Muchos de los modelos hidro-sedimentológicos mencionados en la introducción del trabajo representan la dinámica del escurrimiento superficial en forma simplificada a través de la implementación de modelos propagatorios 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..

Efectivamente, por un lado, tal abordaje no permite la transmisión de información hidrodinámica hacia aguas arriba y, además, en numerosas situaciones la unidimensionalidad no es representativa del patrón de escurrimiento real. En efecto, en las simulaciones ha sido observado que dichas 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 la zona del valle adopta características preponderantemente bidimensionales.

El modelo ha permitido reproducir satisfactoriamente los hidrogramas observados durante el evento del 03/04/1994 y obtener 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 correspondientes al flujo sobre el terreno y al flujo encauzado. Los valores de producción neta de sedimentos estimados con el modelo CTSS8_SED son satisfactorios y entran dentro de los rangos posibles de acuerdo al comportamiento sedimentológico de la cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

- Alberts, E.E., M.A. Nearing, M.A. Wetz, L.M. Risse, F.B. Pierson, X.C. Zhang, J.M. Laflen y J.R. Simanton** (1995). *Soil component*. In USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. Chapter 7, pp. 7.1–7.45. NSERL Rep. N°10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN.
- Arnold, J.G.; R. Srinivasan; R.S. Muttiah and 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; G. Riccardi; H. Stenta y E. Zimmermann** (2007a). “Simulación hidro-sedimentológica a escala de cuenca acoplado un modelo hidrológico-hidráulico con MUSLE”. XXI Congreso Nacional del Agua, Tucumán, Argentina.
- Basile, P.A.** (2007b). “Módulos sedimentológicos acoplados al modelo hidrológico-hidráulico cuasi-2D físicamente basado y espacialmente distribuido CTSS8”. Reporte Técnico I0207. Departamento de Hidráulica. Escuela de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR.
- Basile, P.A.; G. Riccardi y H. Stenta** (2005a). “Modelación de la Producción de Sedimentos a Escala de Cuenca en el Sistema del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina”. XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza. CONAGUA 2005. CD-Rom ISBN: 9872214301.
- Basile, P.A.; G. Riccardi; H. Stenta y M. Garcia** (2005b). “Evaluación de Procesos de Erosión/Sedimentación en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña”. II Simposio Regional Sobre Hidráulica de Ríos, Neuquén. Hidráulica de Ríos 2005.
- Beasley, D.B.; L.F. Huggings and E.J. Monke** (1980). “ANSWERS: A model for watershed planning”. *Transactions of the ASAE*, 23(4), 938-944.
- Bingner, R.L. and F.D. Theurer** (2001). *AnnAGNPS Technical Processes: Documentation Version 2*.
- Boardman, J.; L. Ligneau; A. De Roo and K. Vandaele** (1994). “Flooding of property by runoff from agricultural land in northwestern Europe”. *Geomorphology* 10, 183-196.
- Bouraoui, F. and Dillaha** (1996). “ANSWERS: Runoff and sediment transport model”. *Journal of Environmental Engineering*, 122(6), 493-502.
- Ching-Nuo Chen; Chih-Heng Tsai and Chang-Tai Tsai** (2006). “Simulation of sediment yield from watershed by physiographic soil erosion-deposition model”. *Journal of Hydrology* (2006), 327, 293-303.
- 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.
- Heppner, C.S.; Q. Ran; J.E. VanderKwaak and K. Loague** (2005). “Adding sediment transport to the integrated hydrology model (InHM): Development and testing”. *Advances in Water Resources* 29 (2006) 930-943.
- Julien, P. and 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.
- Ma, M.M.** (1995). “The rainfall characteristic and erosivity in central and northern areas of Taiwan”. Master Thesis. Department of Civil Engineering, National Chung-Hsing Univ., Taichung, Taiwan.
- Meyer, L.D. y W.C. Harmond** (1984). “Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion”. *Soil Science Society America Journal*, 48: 1152-1157.
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R.; King, K.W.** (2002). “SWAT, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation”. *Version 2000*. Texas Water Resources Institute, Collage Station, Texas. TWRI Report TR-191.
- 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.

- Pimentel, D.; C. Harvey; P. Resosudarmo; K. Sinclair; D. Kurz; M. McNair; S. Crist; L. Shpritz; L. Fitton; R. Saffouri and R. Blair** (1995). "Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits". *Science* 267, 1117-1123.
- 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 y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza. CONAGUA 2005. CD-Rom ISBN: 9872214301.
- Steenen, A.; G. Govers; L. Takken; J. Nachtergaele; J. Poesen and 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 y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza. CONAGUA 2005. CD-Rom ISBN: 9872214301.
- Sun, H.; P.S. Cornish and T.M. Daniell** (2002). "Contour-based digital elevation modeling of watershed erosion and sedimentation: Erosion and sedimentation estimation tool (EROSET)". *Water Resources Research*, Vol. 38, Nº11, 1-10.
- Van Rompaey, A.J.J.; G. Verstraeten; G. Govers and J. Poesen** (2001). "Modeling mean annual sediment yield using a distributed approach". *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 481-494.
- Verstraeten, G. and J. Poesen** (1999). "The nature of small-scale flooding, muddy floods and retention pond sedimentation in central Belgium". *Geomorphology* 29, 275-292.
- 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. and J.C. Bathurst** (1996). "SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yields component for the SHE hydrological modelling system". *Journal of Hydrology* (1996), 175, 213-238.
- Woolisher, D.A.; R.E. Smith and D.C. Goodrich** (1990). "KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual". USDA, Agric. Research Service, Rep. ARS-77, Fort Collins, Colorado.
- Young, R.A.; A. Onstad; D. Bosch and P. Anderson** (1987). "AGNPS, Agricultural nonpoint-source pollution model: A watershed analytical tool". USDA, Conservation Research Report Nº 35.
- Zimmermann, E.** (2000). "Aplicación y Calibración del Modelo SHALL3 en el Sistema Hidrológico del A°. Ludueña, Santa Fe, Argentina". XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba. Argentina, IAHR, ISBN 950-33-0267-6, Vol. II, pp. 713-722.

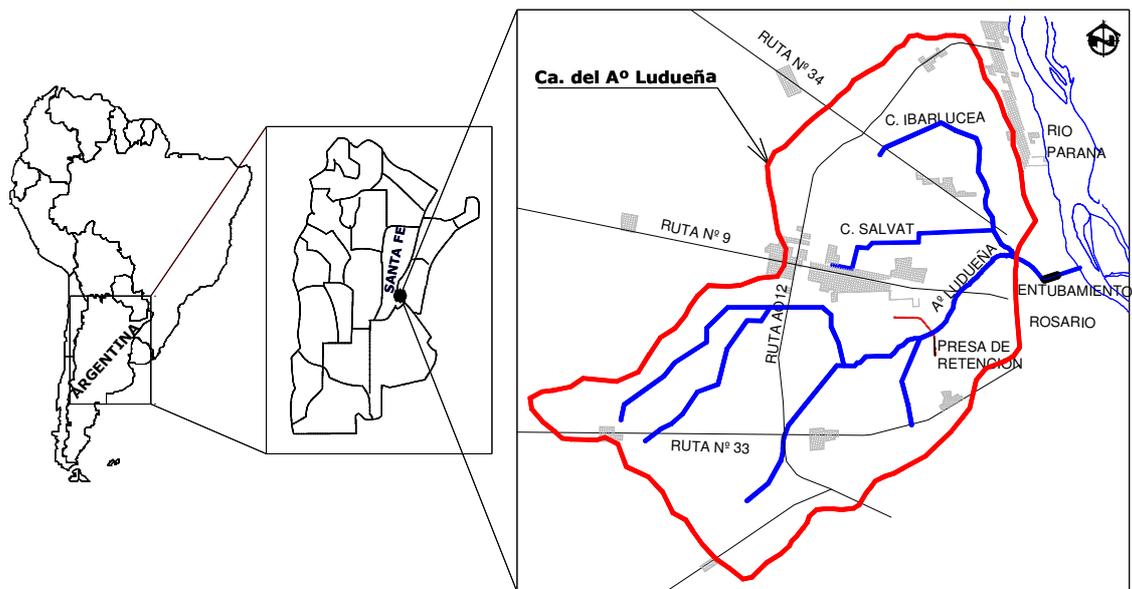


Figura 1.- Cuenca del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina.

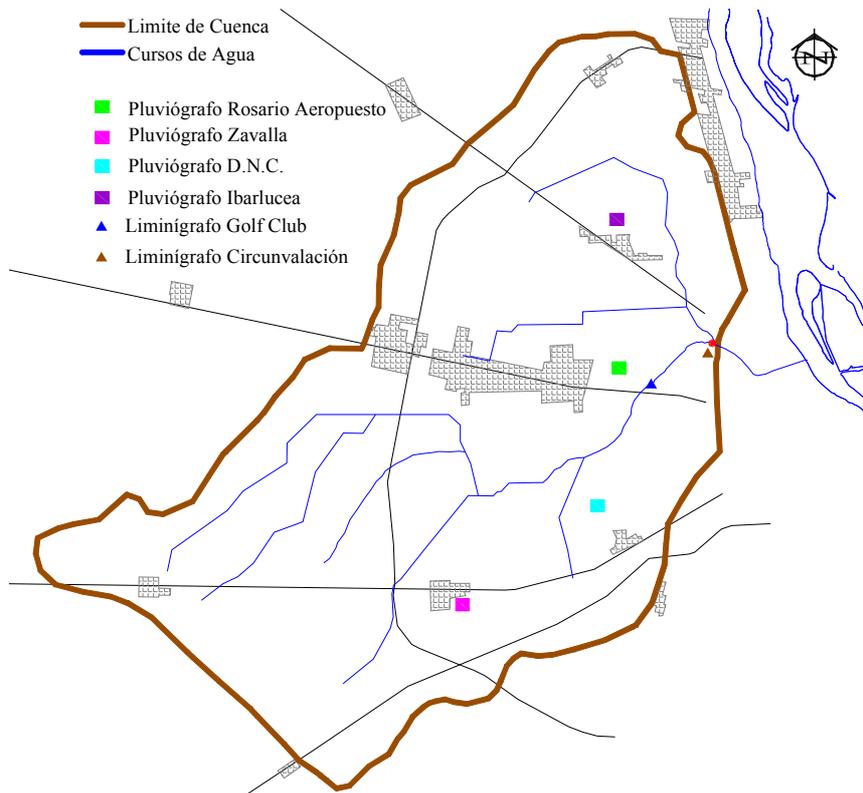


Figura 2.- Indicación de estaciones de medición de lluvia y niveles hidrométricos.

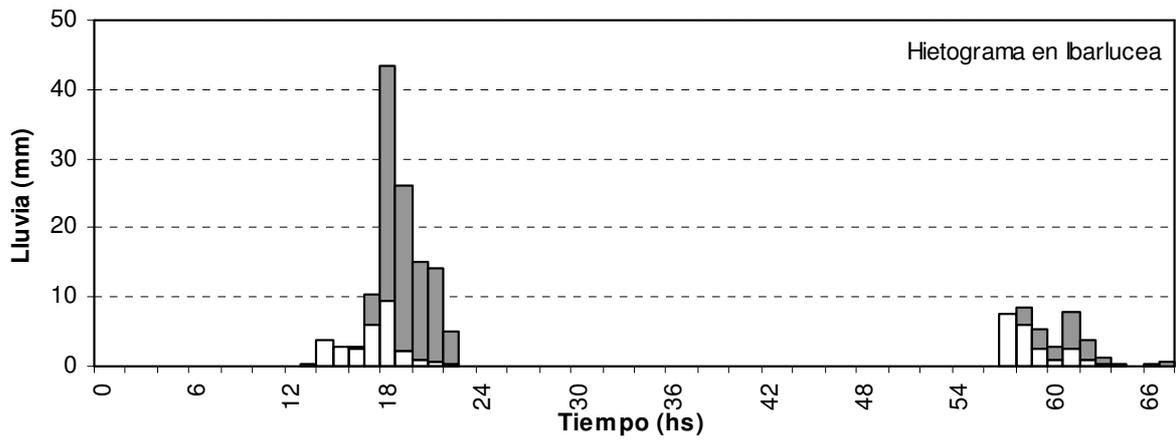


Figura 3.- Hietograma en Ibarlucea. Lluvia total: $(124 + 38)$ mm = 162 mm.

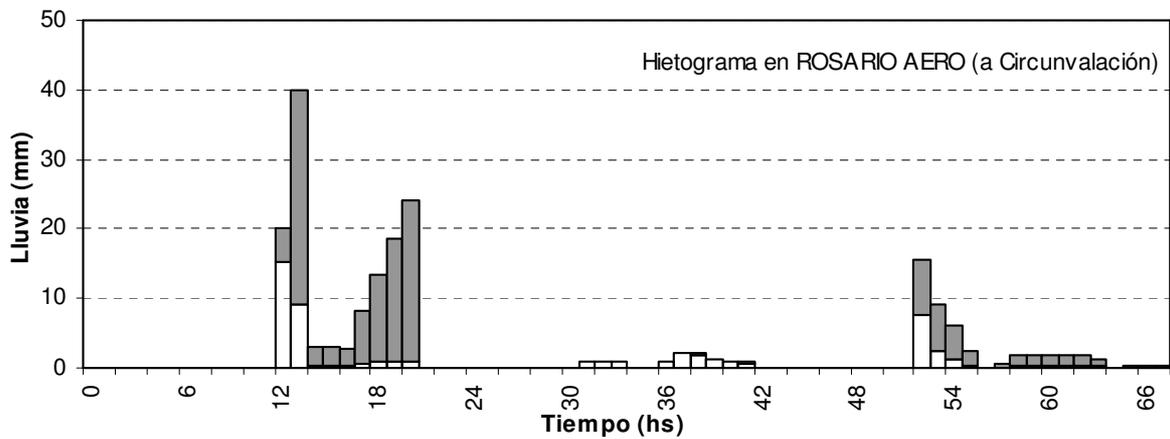


Figura 4.- Hietograma en Rosario Aero (a Circunv.). Lluvia total: $(133,2 + 45,6)$ mm = 178,8 mm.

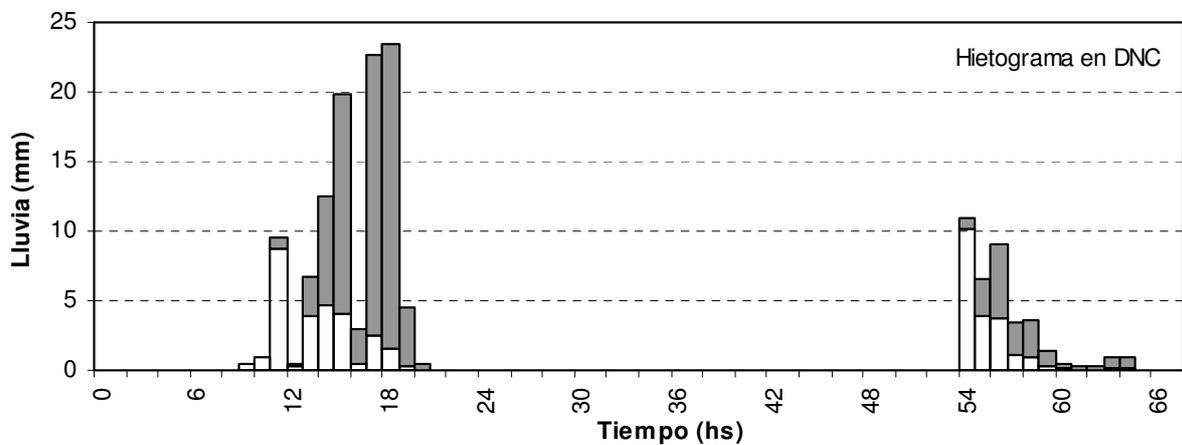


Figura 5.- Hietograma en Despacho Nacional de Cargas. Lluvia total: $(104,5 + 38)$ mm = 142,5 mm.

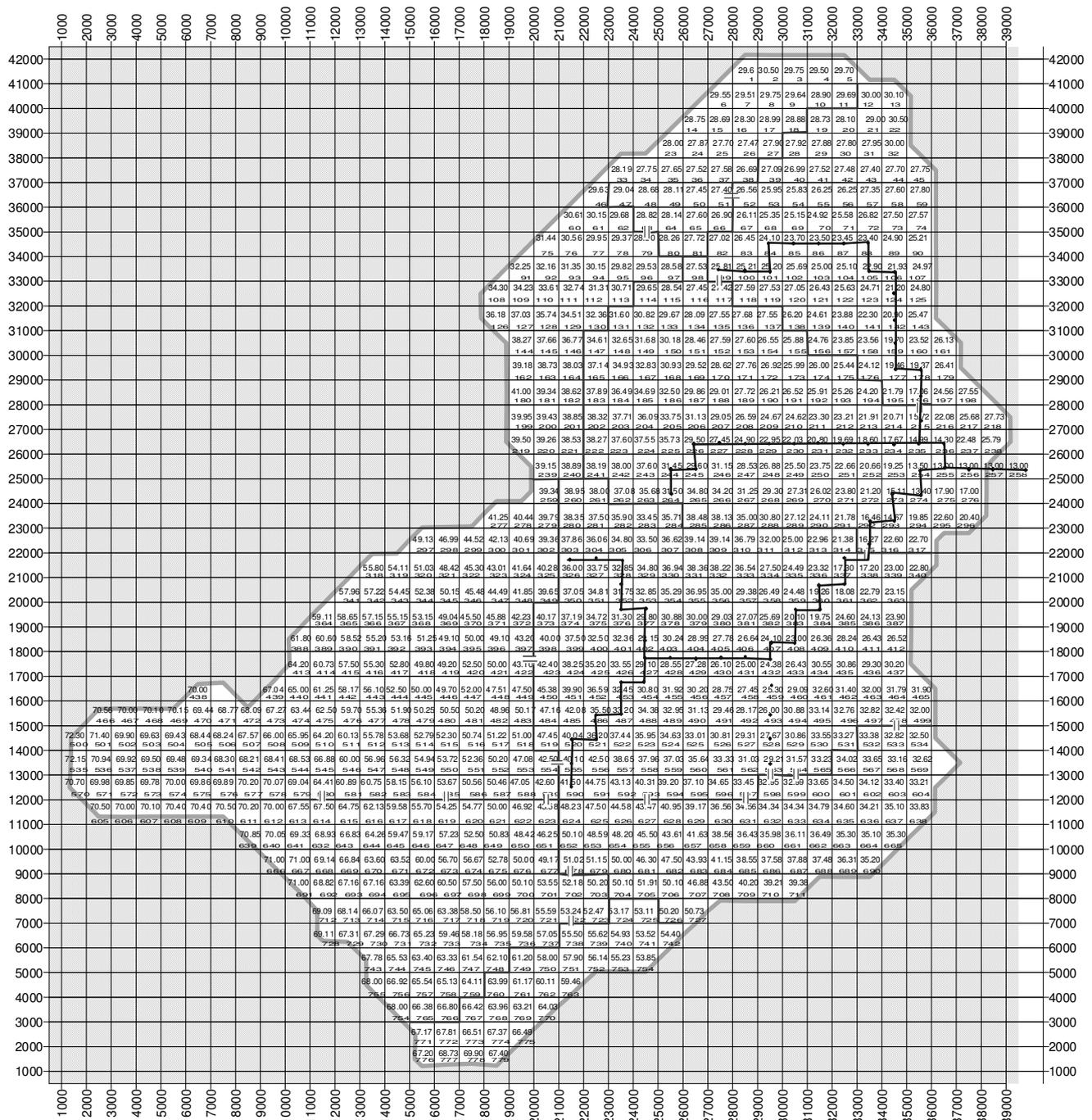


Figura 6.- Constitución del modelo.

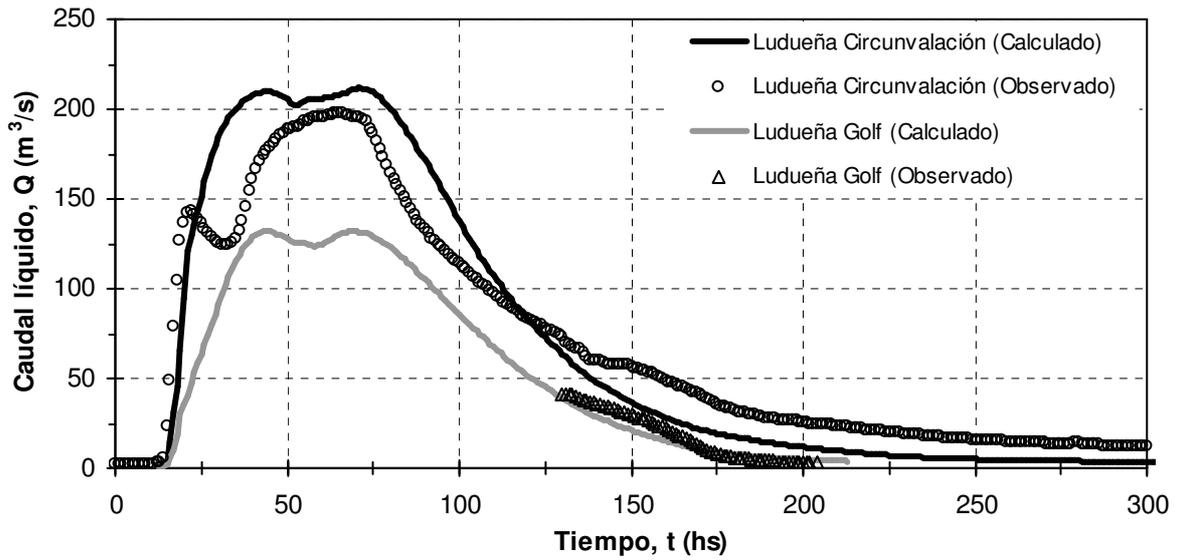


Figura 7.- Hidrogramas calculados y observados del Arroyo Ludueña en Av. Circunvalación y Golf Club para el evento del 03/04/1994.

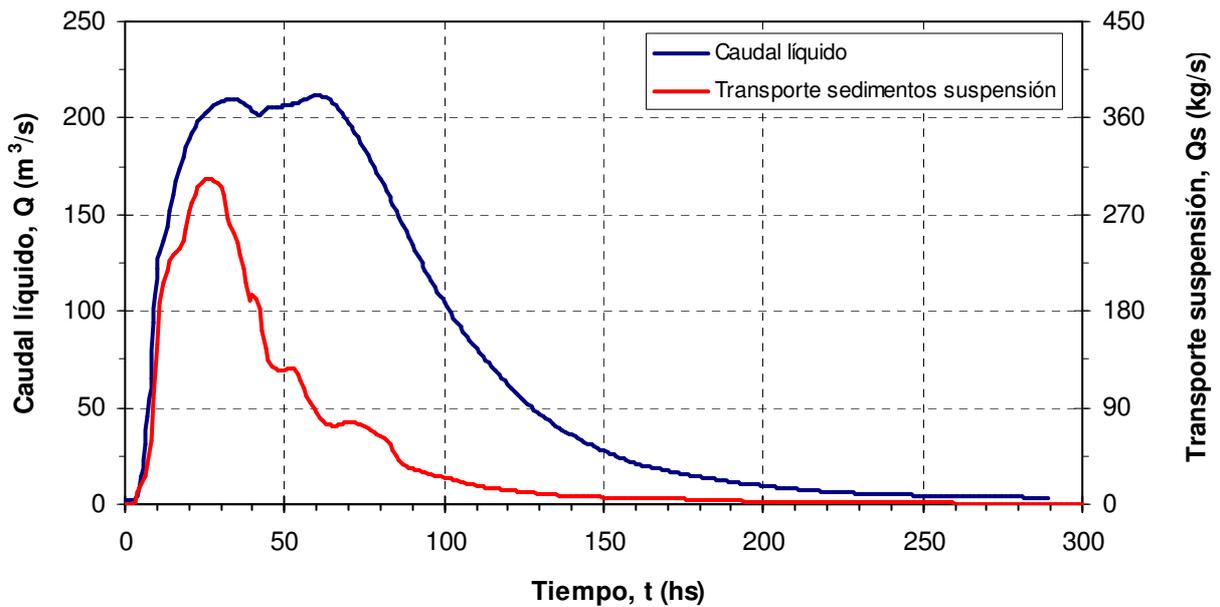


Figura 8.- Hidrograma y sedimentograma del A° Ludueña en Circunvalación calculados con el modelo CTSS8_SED, evento del 03/04/1994.

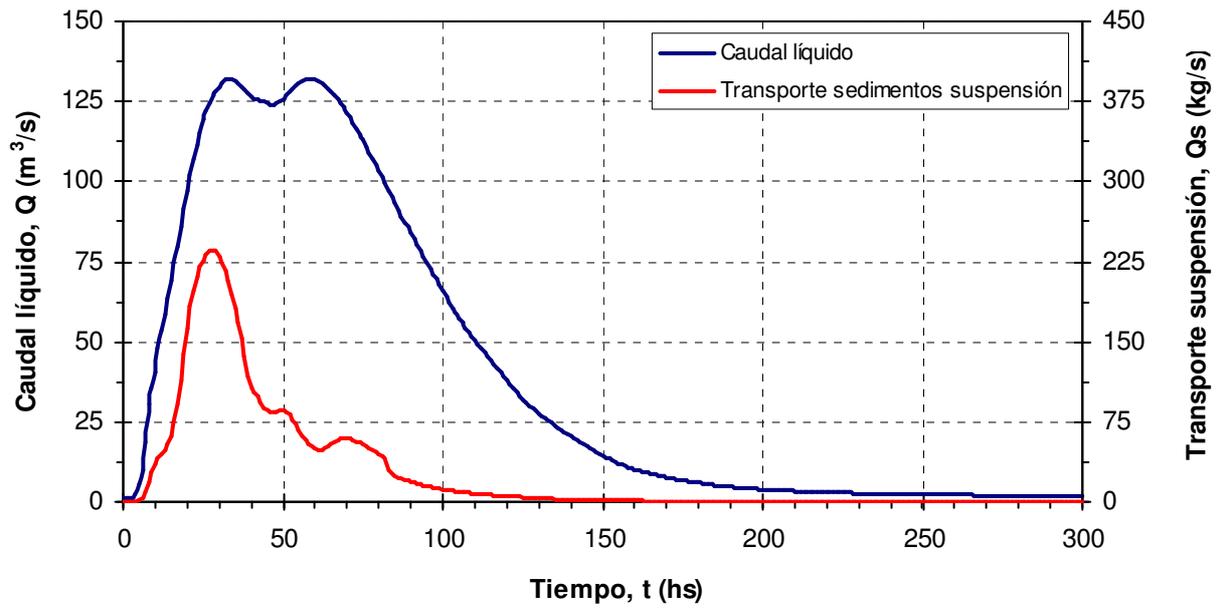


Figura 9.- Hidrograma y sedimentograma del A° Ludueña en Golf Club calculados con el modelo CTSS8_SED, evento del 03/04/1994.