

**LA MODELACION DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL CON ALTO NIVEL DE  
DETALLE EN LA PLANIFICACION HIDRICA DE LA CUENCA DEL ARROYO  
LUDUEÑA, SANTA FE, ARGENTINA**

Gerardo Riccardi  
Investigador CIUNR

Carlos Scuderi  
Becario de Investigación  
Departamento de Hidráulica y CURIHAM

Hernán Stenta  
Becario de Investigación

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario  
Riobamba 245 bis. 2000 Rosario (SF), Argentina. [riccardi@fceia.unr.edu.ar](mailto:riccardi@fceia.unr.edu.ar)

**RESUMEN**

El escurrimiento superficial constituye uno de los principales procesos del ciclo hidrológico y esta directamente ligado a la generación de inundaciones. El conocimiento del proceso es de vital importancia para la planificación de los recursos hídricos a nivel de cuenca. Para su descripción matemática han sido desarrollados modelos desde 1850. Dentro de la temática constituye actualmente una línea de investigación hidrológica-hidráulica el modelado con alto nivel de detalle. En este trabajo se presenta el estado de avance de la aplicación de un modelo de simulación de escurrimiento superficial en la cuenca del arroyo Ludueña. El modelo utilizado fue desarrollado por Riccardi (2000) y permite la simulación del proceso de transformación lluvia-caudal con dinámica de escurrimiento multidireccional en ambientes rurales y urbanos. Los primeros trabajos de modelación de escurrimiento superficial en la cuenca fueron realizados por Zimmermann en 1985 (Zimmermann, 1985 y 1987). A partir de 1995 Zimmermann y Riccardi trabajan en un sistema integral de simulación hidrológico-hidráulica. En lo que respecta a escurrimiento superficial se han probado diversas discretizaciones desde 50 a 100 elementos en la cuenca de 700 km<sup>2</sup>. Los resultados fueron medianamente satisfactorios pero no se logró alcanzar un mismo nivel de precisión y confianza de los parámetros de flujo calculados (tirante y caudal) en todos los puntos de la cuenca. En la búsqueda de una mejor definición del flujo se ha realizado la constitución del modelo con un nivel de detalle de 1 km<sup>2</sup> por elemento y con grilla ortogonal. Esta discretización permite la transferencia de datos y resultados desde y hacia sistemas de información geográfica. Mediante la aplicación se ha constatado la capacidad del modelo para simular la transformación lluvia-caudal y propagación de crecidas, permitiendo reproducir todas las modalidades de escurrimiento superficial halladas en la cuenca. Si bien actualmente se está en una etapa de calibración de parámetros de resistencia al flujo, los resultados son muy alentadores especialmente en lo que respecta a tendencias generales de los hidrogramas y limnigramas reproducidos. La estructuración permitirá homogéneos ensambles con otros modelos (de generación areal de lluvias y de flujo vertical subterráneo en zona no saturada y horizontal subterráneo en zona saturada) dentro de un sistema integral de simulación del ciclo hidrológico. Además, la simulación hidrológica-hidráulica en detalle resulta compatible con las necesidades para el estudio del movimiento de contaminantes y sedimentos. La puesta en operación de este modelo en conjunto con una adecuada red pluviográfica permitirá la simulación a tiempo real y la puesta en marcha de planes de emergencia ante inundaciones en cualquier sector de la cuenca. En este camino la modelación constituye una importante herramienta tecnológica para la planificación y control de los recursos hídricos en la cuenca.

## INTRODUCCION

Los procesos involucrados en la transformación lluvia-caudal en ambientes rurales y urbanos han sido ampliamente estudiados por científicos para el desarrollo del conocimiento y por ingenieros para el diseño hidráulico de diversas obras componentes de sistemas de drenaje y saneamiento. Existen actualmente un gran número de sistemas de modelación de calidad reconocida que permiten la representación de tales procesos. En la región de la llanura pampeana los modelos más utilizados en la simulación de escurrimiento superficial son el HYMO10 y distintas variantes y adaptaciones del modelo de onda cinemática. Sin embargo, a pesar de la disponibilidad actual de información y herramientas existen limitaciones en el modelado, relacionadas con la modelación con apropiados niveles de detalle, efectos de escala e integración de modelos y modelado continuo. Dentro de este contexto, se presenta un sistema de simulación de escurrimiento superficial apto para ambientes rurales y su aplicación en la cuenca del Arroyo Ludueña. El modelo fue constituido con un nivel de detalle de 1 elemento/km<sup>2</sup>, inédito en la región. Este nivel responde a una necesidad de definir a nivel de detalle parámetros de flujo tales como altura de agua y caudales. Otros modelos aplicados en la cuenca han computado buenos resultados en las secciones de control de las subcuencas y segmentos considerados, pero su nivel de agregamiento impide definir dentro de las unidades de discretización los parámetros con mayor nivel de detalle. A través de múltiples estudios realizados en la cuenca por parte de ésta Unidad de Investigación se ha constatado la imposibilidad de garantizar un mismo nivel de aproximación en toda la cuenca sin un desagregamiento como el aquí considerado. Adicionalmente, estudios llevados a cabo por Zimmermann (2000) ponen en evidencia la importante variación espacial de las lluvias en la región por lo que se demanda un desagregamiento de las mismas tanto temporal como espacial para una correcta representación del fenómeno físico real. Ahora bien, el mayor detalle espacial demanda también un desagregamiento del nivel de representación de la transformación lluvia-caudal y el escurrimiento superficial por lo que se reafirma la necesidad de instrumentar la modelación superficial con un nivel de detalle compatible con la real disponibilidad de información de parámetros de flujo y la variabilidad de la información de entrada.

## FORMULACION DEL SISTEMA DE MODELACION

El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). En sucesivas investigaciones se ha ampliado el campo de aplicación original (Riccardi, 1995,1997 y 2000). Actualmente, el sistema permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. El escurrimiento resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación. Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos y alcantarillas. El sistema se denominó CELDAS2D y no se realizaron versiones comerciales del mismo. Las ecuaciones gobernantes consideradas son la de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas.

### Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad se plantea en cada celda, a partir de la definición del incremento del volumen de agua almacenada desde consideraciones geométricas y desde condiciones de descarga:

$$A_{S_i} \frac{dz_i}{dt} = P_{i(t)} + \sum_{k=1}^j Q_{k,i} \quad (1)$$

donde  $P_i(t)$  es lluvia, intercepción, almacenamiento superficial, infiltración e intercambio externo de caudales en la celda  $i$ ,  $A_{Si}$  y  $z_i$  área mojada superficial y nivel de agua en celda  $i$ ;  $Q_{k,i}$  caudal intercambiado entre celdas  $k$  e  $i$ .

Leyes de descarga entre celdas

Unión Cinemática: Se utiliza cuando la información del mecanismo hidrodinámico se propaga solamente hacia adelante :

$$Q_{k,i}^{(n)} = K_{k,i} S_{0\ k,i}^{1/2} \quad (2)$$

$$K_{k,i} = 1/\eta Rh_{k,i}^{2/3} At_{k,i} \quad (3)$$

donde  $Rh_{k,i}$ ,  $At_{k,i}$  y  $S_{0\ k,i}$  son el radio hidráulico, área transversal y pendiente longitudinal de la vinculación entre celdas  $k$  e  $i$  y  $\eta$  rugosidad de Manning.

Unión tipo Río Simple: Se utiliza para escurrimientos con preponderancia de las fuerzas de gravedad, presión hidrostática y fricción. El caudal se deduce por discretización de la ecuación de momento para flujo con fuerzas inerciales despreciables y considerando la ecuación de Manning:

$$Q_{k,i}^{(n)} = \text{signo}(z_k^{(n)} - z_i^{(n)}) \frac{K_{k,i}}{\sqrt{\Delta x_{k,i}}} \sqrt{|z_k^{(n)} - z_i^{(n)}|} \quad (4)$$

donde  $\Delta x_{k,i}$  es la distancia entre centros de celdas  $k$  e  $i$  y  $z_k$  el nivel de agua en celda  $k$ .

Unión tipo Vertedero : Representa vinculaciones donde se evidencia un límite físico como terraplenes de rutas, vías, etc. Se utiliza la ecuación de vertederos de cresta ancha:

$$Q_{k,i}^{(n)} = \mu_1 b_l \sqrt{2g} (z_k^{(n)} - z_i^{(n)})^{3/2} \quad \text{Descarga libre} \quad (5.a)$$

$$Q_{k,i}^{(n)} = \mu_2 b \sqrt{2g} (z_k^{(n)} - z_w) \sqrt{z_k^{(n)} - z_i^{(n)}} \quad \text{Descarga sumergida} \quad (5.b)$$

donde  $z_w$  y  $b_l$  son la cota de fondo y longitud vertedero y  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  los coeficientes de gasto de vertedero libre y ahogado

Unión tipo Puente: Se utiliza la expresión de caudal para vertederos con escalón de fondo nulo y coeficiente de gasto según Ven Te Chow (1959) para flujo a través de constricciones.

## FORMULACION NUMERICA

Para la resolución es adecuado el uso de un esquema implícito del tipo:

$$A_{Si} \frac{\Delta z_i}{\Delta t} = P_i + \sum_{k=1}^j Q_{k,i}^{(n)} + \sum_{k=1}^j \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_i} \Delta z_i + \sum_{k=1}^j \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_k} \Delta z_k \quad (6)$$

las funciones  $A_S$ ,  $P_i$  y  $Q_{k,i}$  son conocidas en el tiempo  $t$  y los incrementos  $\Delta z_i$  y  $\Delta z_k$  son las incógnitas,  $j$  es la cantidad de celdas vinculadas a la celda  $i$ . La resolución numérica se realiza mediante un algoritmo matricial basado en el método de Gauss-Seidel. Las condiciones de borde posibles de imponer son: a) Cota de agua en función del tiempo:  $z(t)$ ; b) Caudal en función del tiempo:  $Q(t)$  y c) Relación cota - caudal:  $Q = f(z)$ . El modelo requiere las alturas de agua iniciales en todas las celdas, y si se utilizan uniones dinámicas deben definirse los caudales iniciales en tales vinculaciones.

## APLICACIÓN EN ARROYO LUDUEÑA

La aplicación consistió en la simulación de escurrimiento superficial en la cuenca del Arroyo Ludueña, en vista a su utilización dentro de un sistema global de simulación hidrológica denominado SHALL (Zimmerman y Riccardi, 1995, Zimmermann, 2000 y Zimmermann y Riccardi, 2000) . La cuenca se ubica al sureste de la provincia de Santa Fe, Argentina (Figura 3). Su red de cursos permanentes y transitorios mide 140 km., el área en estudio es de 700 km<sup>2</sup> con una pendiente media de 1,0 ‰. El caudal base del arroyo es de 0,50 m<sup>3</sup>/s, en tanto que en crecidas ordinarias se alcanzan los 80 m<sup>3</sup>/s y en extraordinarias (R> 50 años) caudales superiores a 400 m<sup>3</sup>/s.

### Testeos previos

A los efectos de garantizar la aptitud del modelo para la simulación de las diferentes modalidades de escurrimiento encontradas en la cuenca del arroyo Ludueña el modelo fue testeado en cada modalidad por separado.

El modelo simula perfectamente los mecanismos de flujo bidimensional predominantemente cinemáticos, pudiéndose reproducir exactamente resultados alcanzados en cuencas pilotos con modelos cinemáticos bidimensionales donde no es posible la solución analítica y debe recurrirse a una aproximación numérica (Riccardi, 2001).

En lo que concierne a flujo cinemático unidimensional sobre valle, la estructuración en celdas aproxima adecuadamente la resolución analítica con una discretización como mínimo de cinco celdas del plano de escurrimiento. Siempre considerando las características morfológicas e hidráulicas de la cuenca del Arroyo Ludueña (Riccardi, 2001).

En el caso de flujo difusivo uni y bidimensional en cursos de agua y planicies de inundación el y ha través de constricciones (alcantarillas y puentes) el modelo cuenta con capacidad de simulación ya demostrada en otras aplicaciones (Riccardi, 2000)

### Constitución del modelo

Se ensayaron 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 (carreteras y férreas) 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 discretización seleccionada se compone de 779 celdas y 1473 vinculaciones, alcanzándose un grado de detalle de 1 elemento/ km<sup>2</sup> (Fig. 4). La condición de borde fue una relación H-Q en una gran puente carretero correspondiente a la Avda. de Circunvalación de Rosario, considerado como sección de control.

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. Constatándose la conectividad entre las celdas se incorporaron las celdas componentes de los canales y arroyo.

Una tercer etapa la constituyó la incorporación de las alcantarillas y terraplenes viales y ferroviarios.

En cada etapa se realizaron corridas de prueba verificándose controles de continuidad, celeridad de onda, ausencia de inestabilidades y otras perturbaciones numéricas. Debe destacarse el hecho

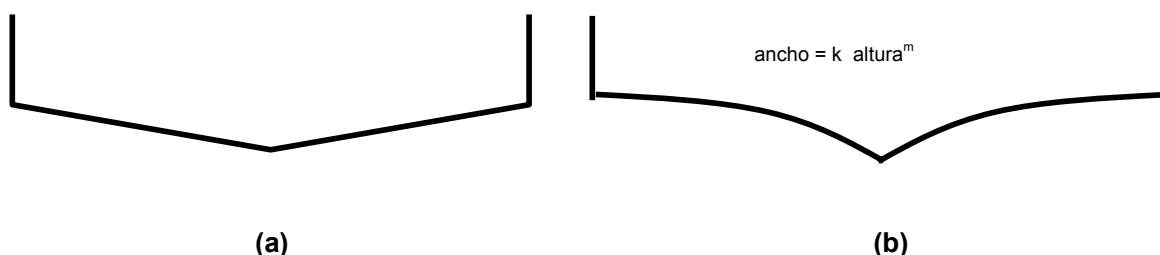
que al trabajarse con este tipo de dominios de cálculo, la generación de resultados es importante por lo que para poder ejercer un efectivo contralor sobre los parámetros de flujo calculados es preciso constituir el modelo en etapas y ejecutar testeos en cada una de ellas.

Durante cada simulación, el modelo se carga con precipitaciones netas, por lo que computa caudales (y velocidades) en cada una de las vinculaciones y alturas de agua en cada celda del dominio.

### Conducción y almacenamiento en celdas del valle

Gran parte de los modelos más conocidos que simulan flujo unidimensional en valle operan mediante la hipótesis de flujo mantiforme, donde el flujo ocupa totalmente el área superficial de la celda y con una sección de conducción rectangular (alguno modelos como por ejemplo el SWMM permiten la definición de una franja de conducción y almacenamiento incluida dentro de la unidad de discretización). Dentro del plano se aplica la teoría de onda cinemática y se puede resolver el flujo hacia un curso. Ahora bien, esto funciona adecuadamente en unidades de discretización con aporte de lluvia y con dirección de escurrimiento mayormente unidireccional, pero es inviable en dominios donde el escurrimiento puede adoptar distintas direcciones según los gradientes hidráulicos y donde cada celda, excepto las mas elevadas topográficamente, no solo reciben aportes de lluvia sino que intercambian caudales en sus cuatro bordes en el caso de ser cuadradas o rectangulares.

Para contemplar este mecanismo el modelo prevé la posibilidad de incorporar secciones transversales de tipo triangular con un punto bajo central y pendientes laterales (Figura 1a) afines con las encontradas en la morfología de la superficie de la celda. Además, actualmente se está incorporando la posibilidad de introducir secciones con perfil tipo exponencial (Figura 1b).



Datos necesarios: cota de fondo (punto más bajo), ancho de celda, pendiente lateral valle, coeficientes de ecuación exponencial  $k$  y  $m$ , resistencia en el valle

**Figura 1. Sección considerada en conducción y almacenamiento de celdas valle**  
**(a) Triangular y (b) Exponencial**

### Conducción y almacenamiento en celdas de cursos de agua

En las celdas de cursos de agua el modelo permite la adopción de secciones de cursos de tipo triangular, rectangulares o trapezoidales. Esta sección se ubica en el centro de la celda y el valle al igual que en el caso anterior puede contener pendientes laterales (Figura 2). En este caso deben definirse las dimensiones geométricas del cursos, la pendiente lateral del valle y la resistencia al escurrimiento en el curso y en el valle.



Datos necesarios: cota fondo curso, ancho total de celda, pendiente lateral valle, ancho del fondo del curso, profundidad máxima, pendiente de taludes laterales de curso, resistencia en el curso y resistencia en el valle

**Figura 2. Sección de celda con curso de agua**

### Calibración del Modelo

El proceso de calibración, que actualmente se está llevando a cabo, consiste en la reproducción de una serie de crecidas registradas en los años 1994 y 1995. Durante ese período se midieron hietogramas en tres estaciones de la cuenca (Rosario Aero, Despacho Nacional de Cargas e Ibarlucea), además se aforaron alturas de agua sobre el arroyo Ludueña en dos estaciones (Golf Club y Circunvalación). 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.

A los efectos ilustrativos, se exponen en la Figura 5, los hidrogramas computados y observados en la sección de control, durante la simulación de dos corridas de calibración. Un evento corresponde a una crecida moderada ocurrida el 17 y 18/03/1994 con una lluvia total media de 143 mm, una lluvia neta de 40 mm y un caudal máximo de 82 m<sup>3</sup>/s. El segundo evento corresponde a una lluvia pequeña ocurrida el 20/06/1994 con un total medio precipitado de 27 mm, una lluvia neta de 2 mm y un caudal máximo de 9 m<sup>3</sup>/s. Puede advertirse en ambos hidrogramas 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 en cada celda. En el actual estado de avance de la investigación el ajuste se considera aceptable, sin embargo debe profundizarse el conocimiento de los mecanismos presentes en el almacenamiento y conducción en cada unidad de programación. Los parámetros de resistencia ajustados en el proceso de calibración del modelo para el escurrimiento superficial son los siguientes:

Parámetro	Rango de Valores
Coefficiente de resistencia de Manning en valle	0.150 – 0.300
Coefficiente de resistencia de Manning en Cursos principales	0.035 – 0.050
Coefficiente de resistencia de Manning en Cursos secundarios	0.040 – 0.060
Coefficiente de gasto en puentes y alcantarillas	0.60 – 0.90

**Tabla 1. Parámetros de resistencia al flujo**

### Análisis de resultados

En el estado actual de avance de desarrollo del modelo, testeos previos y aplicación en el Arroyo Ludueña se advierten las siguientes cuestiones:

Existe una incertidumbre en lo que respecta al área de cada celda involucrada en mecanismos de almacenamiento y conducción. Evidentemente la irregularidad de las superficies y la cobertura lleva a afirmar rotundamente que no toda la superficie de la celda participa en el almacenamiento,

pero la incógnita es cuanto del total participa. Igual razonamiento corresponde a la determinación de la sección transversal comprometida en la conducción de flujo.

Si se desea describir los parámetros reales de flujo en cada unidad de discretización, es necesario desagregar el mecanismo físico aún en mayor detalle que el aquí presentado. Para lograr este objetivo es necesario investigar a nivel de parcela rural, por ej. una hectárea todos los mecanismos de microescurrimiento englobados en el área de referencia.

Si los mecanismos de escurrimiento no son descriptos en su forma real todo el flujo simulado en el valle constituirá una abstracción, con mayor detalle que modelos tradicionales como HYMO u Onda Cinemática pero sin dejar de ser una construcción abstracta del escurrimiento. Si las alturas, caudales y velocidades computadas no se corresponden con los valores reales es imposible utilizar el modelo en la representación de otros procesos "colgados de la hidrodinámica" como la erosión hídrica y la movilización y removilización de contaminantes.

## CONCLUSIONES

El modelo presentado ha demostrado una adecuada capacidad de reproducción del proceso real de transformación lluvia neta-caudal con escurrimiento bidimensional.

La estructura de modelación ha resultado apta para la simulación con el nivel de detalle propuesto 1celda/km<sup>2</sup>, permitiendo la desagregación máxima posible de los componentes físicos, parámetros geométricos e hidráulicos compatible con la información disponible.

Toda la información necesaria para el modelado puede ser intercambiada fácilmente desde o hacia sistemas de información geográfica.

Los parámetros de calibración ajustados se correspondieron íntegramente con valores estándares hallados en la bibliografía para la cuantificación de la resistencia al escurrimiento.

La distribución espacial de la señal de entrada al modelo, la lluvia neta, contiene una gran incertidumbre, que se proyecta a todos los resultados calculados por el modelo. Debe avanzarse en la investigación de la distribución areal de lluvias y de pérdidas de escurrimiento (almacenamiento superficial e infiltración).

La incertidumbre acerca de los mecanismos físicos reales de tránsito y almacenamiento a nivel de unidad de discretización del valle y su desagregamiento interno no hacen totalmente confiables parámetros de flujo calculados como alturas, caudales y velocidades, a pesar de aceptables resultados logrados en la calibración al comparar hidrogramas observados y calculados. Debe avanzarse en el conocimiento de estos mecanismo para afianzar el modelo en la simulación de otros procesos como erosión hídrica y transporte de contaminantes en el valle.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Cunge, J. (1975) *Two Dimensional Modelling of Flood Plains* Cap. 17 Unsteady flow in open channels (Ed. Mahmood K. and Yevjevich V.) Water Resources Publications, Fort Collins

Riccardi, G. Zimmermann, E. y Maurig R. (1995) *Math. Modelling of flood for the delimitation of zones with inundation risk*, International Symposium on Runoff Computations for Water Projects, IAHS, San Petesburgo

Riccardi, G. (1997) *The mathematical modelling for the delimitation of inundation risk zones*, Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty (ed. D. Rosberg et al.) IAHS Publication Nro 240, ISSN 0144-7815., Wallingford, pp.127-136.

Riccardi, G. (2000), *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes*

*rurales y urbanos*, Inédito, Tesis Doctoral, FCEFyN, UNC, Córdoba

Riccardi, G. (2001), *Comparación de Modelo CELDAS2 con Onda Cinemática uni y bidimensional*, Informe de Investigación, CIUNR, FCEIA, UNR, Inédito

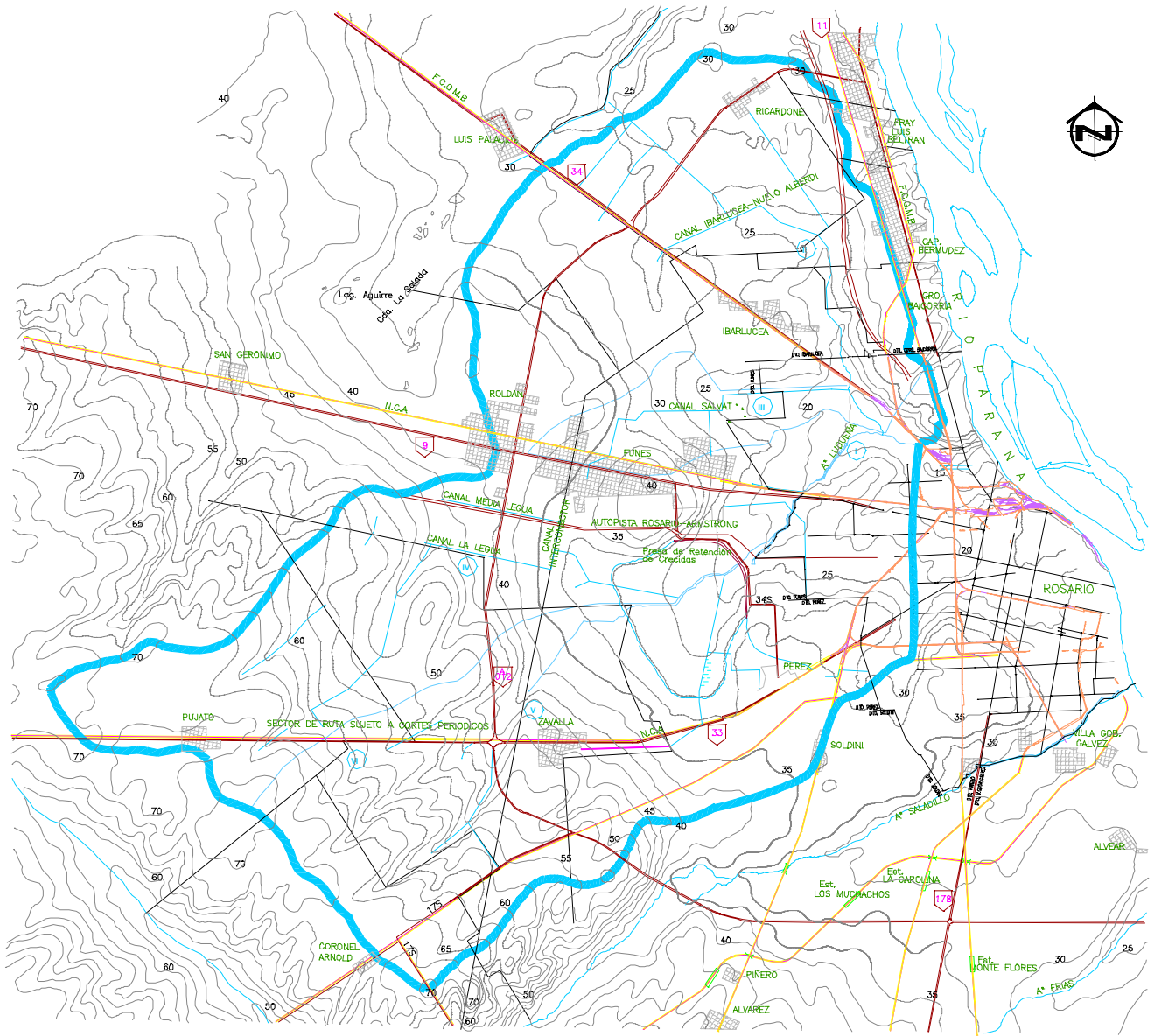
Zimmermann, E. and Riccardi, G. (1995) *Modelling of Fluxes of Water in Flatland*, XX General Assembly European Geophysical Society, Hamburgo

Zimmermann, E. (1985), *Modelación hidrológica en Cuenca de Arroyo Ludueña mediante Modelo de Embalses no lineales PLUMUS*, Informe de Investigación, Beca de Iniciación, CIUNR, FCEIA, UNR, Rosario, inédito

Zimmermann, E. (1987), *Modelación hidrológica en Cuenca de Arroyo Ludueña mediante Modelo de Onda Cinemática*, Informe de Investigación, Beca de Iniciación, CONICET, FCEIA, UNR, Rosario, Inédito.

Zimmermann, E. (2000) *Aplicación y Calibración del Modelo SHALL3 en el Sistema Hidrológico del Ao. Ludueña, Santa Fe, Argentina*, XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba. Argentina, IAHR, ISBN 950-33-0267-6, Vol. II, pp. 713-722.





**Figura 3. Cuenca del Arroyo Ludueña**

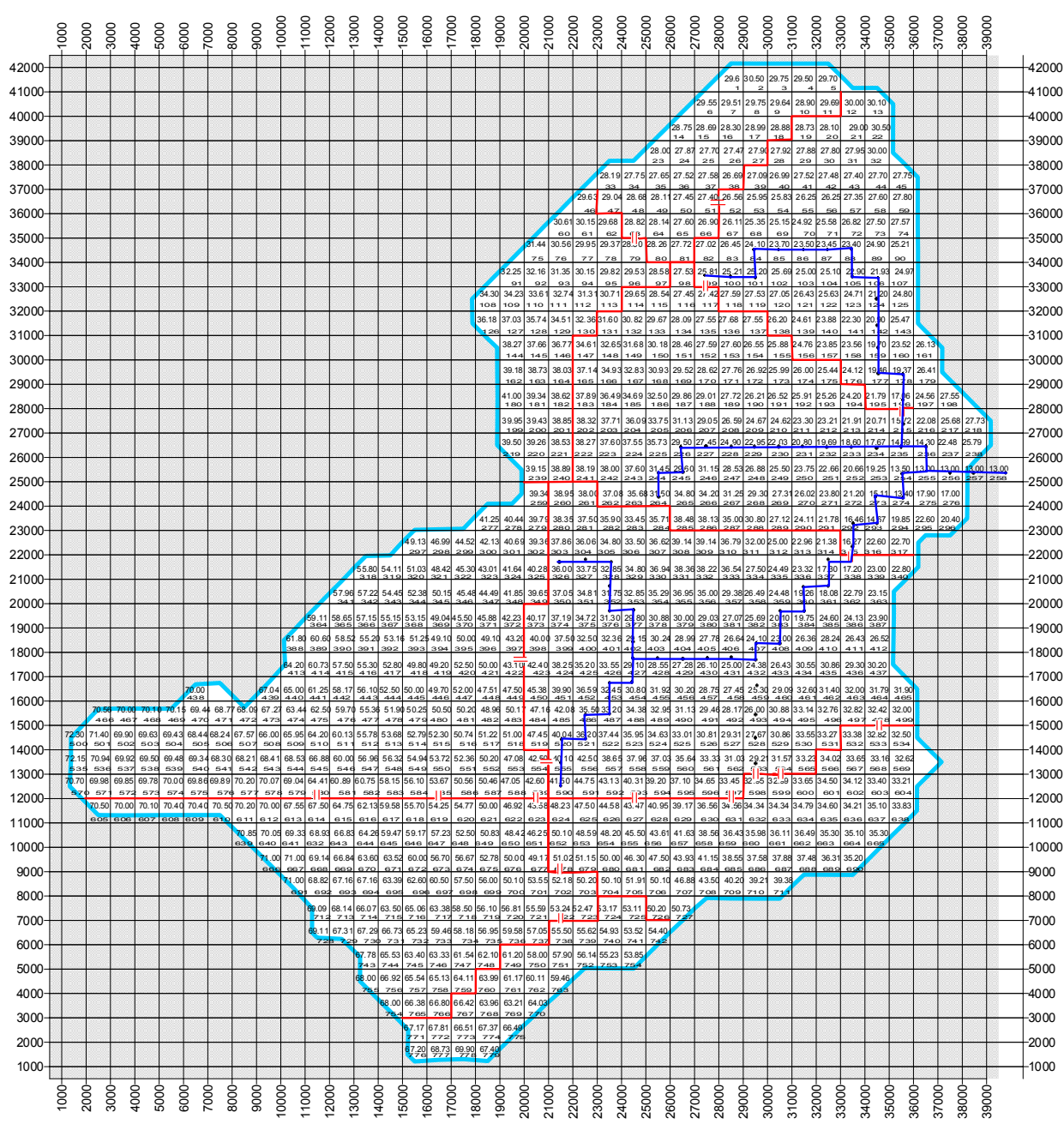
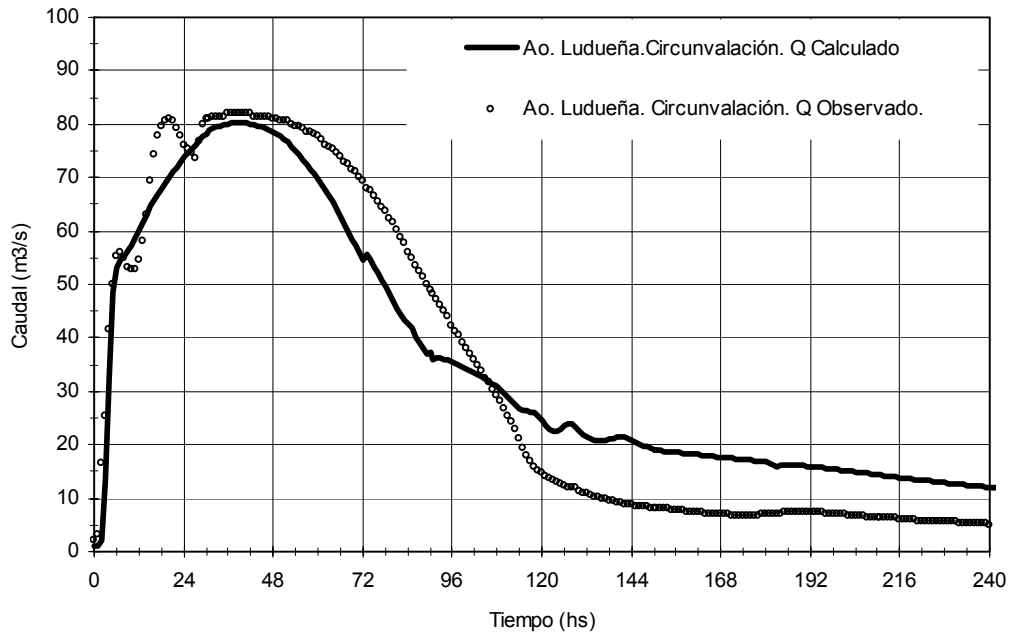


Figure 4. Constitución del modelo

Lluvia 17/03/94



Lluvia 20/06/94

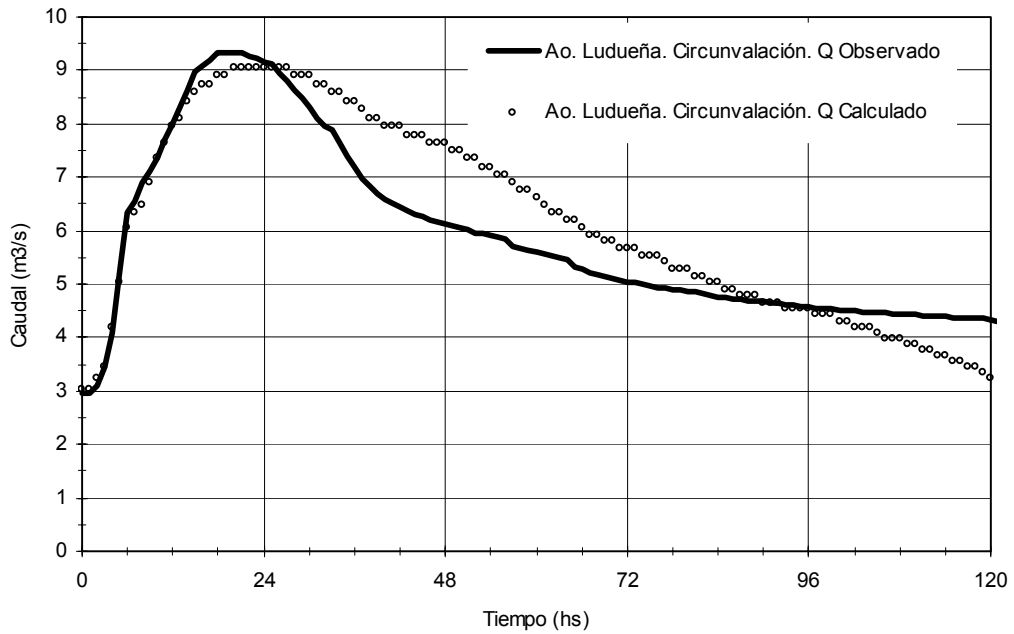


Figura 5. Hidrogramas de Calibración

