

# LA MODIFICACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA EN CUENCAS DE LLANURA ANTE LA VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE LA GRILLA

**Hernán Stenta** <sup>(1)</sup> y **Gerardo Adrián Riccardi** <sup>(2)</sup>

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

(1) Becario CONICET - (2) Invest. CIUNR.

Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina

Telefax: +54 +341 4808541. E-mail: hstenta@fceia.unr.edu.ar

## RESUMEN

Los modelos hidrológicos de parámetros distribuidos son una herramienta que permiten representar la transformación lluvia-caudal en una determinada cuenca; a diferencia de los modelos de parámetros concentrados tienen la ventaja de que pueden representar la variabilidad de las características físicas de la cuenca y de los procesos que intervienen en la generación y traslado del escurrimiento superficial. A mayores niveles de detalle se logran resultados más exactos, como contrapartida se requiere mayor cantidad de información, tiempo de cálculo y espacio en disco. Un nivel de detalle adecuado sería aquel que capture la esencia de los procesos físicos y que resulte sencillo y económico de operar. En este trabajo se analizan los efectos del tamaño de la grilla en la representación del escurrimiento superficial en cuencas de llanura. El estudio se realizó sobre dos cuencas ubicadas en la región sur de la Provincia de Santa Fe (Argentina). Se definieron diferentes tamaños de la grilla (ortogonal) para su modelado y se simuló eventos observados y eventos hipotéticos. En ambas cuencas se evaluaron las respuestas hidrológicas en términos de caudales para todos los eventos simulados y para las diferentes discretizaciones. El sistema utilizado es una fusión de una versión del sistema de modelación hidrológica-hidráulica cuasi-2D tipificado CTSS8 (Riccardi, 2000) y una plataforma computacional de procesamiento de información pre y post cálculo bajo Windows denominada SIMULACIONES (Rentería y Stenta, 2003). Los resultados indican que a medida que aumenta el tamaño de la grilla (menores niveles de detalle) se computan en la sección de control mayores valores de caudales máximos y en general una reducción del tiempo al pico. Lo anterior se puede explicar a través del mecanismo de aceleración de flujo originado por la modificación de las áreas tributarias, caudales y velocidades en cada celda ante la variación de la dimensión de la grilla.

**Palabras clave:** cuencas de llanura, escurrimiento superficial, modelos hidrológicos distribuidos, tamaño de la grilla.

## INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos han sido desarrollados para mejorar nuestro conocimiento y descripción del escurrimiento superficial generado a partir de complejos mecanismos presentes en cuencas. En la actualidad están disponibles una extensa variedad de modelos de escurrimiento superficial y una de las más amplias clasificaciones que se pueden hacer de los mismos es agruparlos en modelos de parámetros concentrados y de parámetros distribuidos.

Los modelos de parámetros distribuidos, en comparación con los de parámetros concentrados, tienen la ventaja de que pueden representar la variabilidad de las características físicas de la cuenca y de los procesos que intervienen en la generación y traslado del escurrimiento superficial. Como desventaja debe mencionarse que requieren mayor cantidad de información de entrada, tiempo de cálculo y espacio en disco; aunque estas desventajas se han ido atenuando con las potencialidades de las computadoras actuales.

Lo mencionado está directamente relacionado con el nivel de detalle seleccionado; en teoría a medida que este nivel aumenta se tienen mejores representaciones del sistema pero se potencian las desventajas. Un nivel de detalle adecuado sería aquel que capture la esencia de los procesos físicos y que resulte sencillo y económico de operar. En este sentido, la definición del tamaño de la grilla, y por ende el número de elementos que conformarán el modelo, están en relación directa con la cantidad de información que se debe ingresar, manipular y almacenar.

Wood et al.(1988) han definido áreas de similar respuesta hidrológica como Área Elemental Representativa (AER). Esta área es el bloque fundamental de construcción para el modelado de la cuenca. La teoría está basada en que la generación de escurrimiento es un fenómeno de multiescala con diferentes longitudes de escala que caracterizan la variabilidad del suelo, topografía y lluvia. Por definición las AERs deben ser de una longitud de escala mayor que la longitud de escala característica de los componentes de la respuesta hidrológica que más rápidamente varían y menor que la longitud de escala de los componentes que varían más lentamente. Los autores afirman que las AERs están fuertemente influenciadas por la topografía, en tanto que la longitud de escala de la lluvia parece tener solamente un rol secundario, sin embargo incrementos en la variabilidad de la lluvia y suelo aumentan la variabilidad de la generación de escurrimiento. Los estudios comprendieron solamente la producción de escurrimiento y no el traslado.

Julien y Moglen (1990) utilizaron técnicas de modelación hidrológica para analizar el flujo superficial generado bajo condiciones de variabilidad espacial de pendientes, anchos, rugosidades e intensidad de lluvia neta. Señalan que las variaciones en la descarga del escurrimiento dependen principalmente de la relación entre la duración de la lluvia ( $t_r$ ) y el tiempo de equilibrio ( $t_e$ ). Las distribuciones de descarga al pico varían a medida que la relación adimensional  $t_r/t_e$  se acerca a la unidad. Utilizando el concepto de onda cinemática determinaron una longitud de escala adecuada basado en el hecho de que cuando la duración de la lluvia excede el tiempo de equilibrio la variabilidad de los parámetros hidrológicos tiene poca influencia en la respuesta de la cuenca. Esta longitud de escala depende de las características de la cuenca y del evento estudiado (duración e intensidad). Indican además, que esta longitud de escala puede servir como base para la determinación del tamaño de la grilla en modelos hidrológicos.

Molnár y Julien (2000) estudiaron el efecto del tamaño de la grilla en el escurrimiento superficial sobre cuencas de pendientes moderadas (1-2 %) con un modelo distribuido. Han

establecido que resoluciones gruesas pueden ser usadas si se calibran apropiadamente los parámetros; que el efecto primario del aumento del tamaño de la grilla es requerir un aumento en los valores del coeficiente de rugosidad del valle y del río. Los autores han utilizado el concepto de tiempo de equilibrio para evaluar la respuesta del escurrimiento en celdas valle y en celdas río señalando que los tamaños de la grilla mayores serán adecuados cuando se simulen eventos de alta intensidad o de gran duración. Para eventos de corta duración las condiciones de equilibrio no serán alcanzadas y en este caso es particularmente importante seleccionar un apropiado tamaño de la grilla.

En este trabajo se estudia el efecto del tamaño de la grilla en la representación de las características de la cuenca; y en la respuesta hidrológica de la misma mediante modelación matemática hidrológica-hidráulica. Los estudios se llevaron a cabo en dos cuencas de llanura ubicadas en la región sur de la Provincia de Santa Fe (Argentina); la cuenca del Arroyo Ludueña (700 Km<sup>2</sup>) y la cuenca del canal Santa Teresa (14 Km<sup>2</sup>).

## **DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS**

En cada una de las cuencas estudiadas se simularon eventos observados y eventos hipotéticos con diversas discretizaciones espaciales en grillas de cálculo cuadrangulares. El sistema utilizado es una fusión de una versión del sistema de modelación hidrológica-hidráulica cuasi-2D tipificado CTSS8 (Riccardi, 2000) y una plataforma de procesamiento de información pre y post cálculo bajo Windows denominada SIMULACIONES (Rentería y Stenta, 2003). El sistema de modelación permite la simulación hidrológica-hidráulica de escurrimiento superficial en dominios bidimensionales con unidades de discretización ortogonales. Las pérdidas de escurrimiento pueden ser estimadas en base a algoritmos que resuelven el método de CN, Horton o Green & Ampt. Este modelo ya ha sido implementado en diversos trabajos y en particular en la cuenca del Arroyo Ludueña obteniéndose resultados satisfactorios (Riccardi et al., 2002).

### **Cuenca del Arroyo Ludueña**

La cuenca del A° Ludueña se encuentra al 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 es de 140 Km., el área de la cuenca 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. (Stenta y Scuderi, 2001; Riccardi et al., 2002). Además presenta una serie de alteraciones antrópicas como: terraplenes de rutas y ferrocarriles, alcantarillas, puentes, etc.

La cuenca fue discretizada con cinco tamaños de grilla a saber: 250 m, 375 m, 500 m, 750 m y 1000 m. El límite de discretización más pequeño (250 m) estuvo definido por la información topográfica disponible. El modelo fue constituido en las diferentes discretizaciones a partir de información proveniente de: modelo digital del terreno, aerofotografía, imágenes satelitales, planchetas de IGM y relevamientos de campaña. La cuenca resultó constituida en celdas que representan las áreas tributarias a los cursos de agua (celdas valle) y celdas que constituyen los cursos de agua (celdas río). Los parámetros que definen condiciones hidráulicas de intercambio de flujo entre celdas son el coeficiente de resistencia de Manning entre celdas valle-valle, valle-río y río-río y los coeficientes de descarga en las obras de arte. A modo ilustrativo en las figuras 2 y 3 se

muestran las discretizaciones de 250 m y 1000 m respectivamente. En la tabla 1 se muestran algunas características relevantes de la cuenca y su variación para 3 tamaños de grilla adoptados.

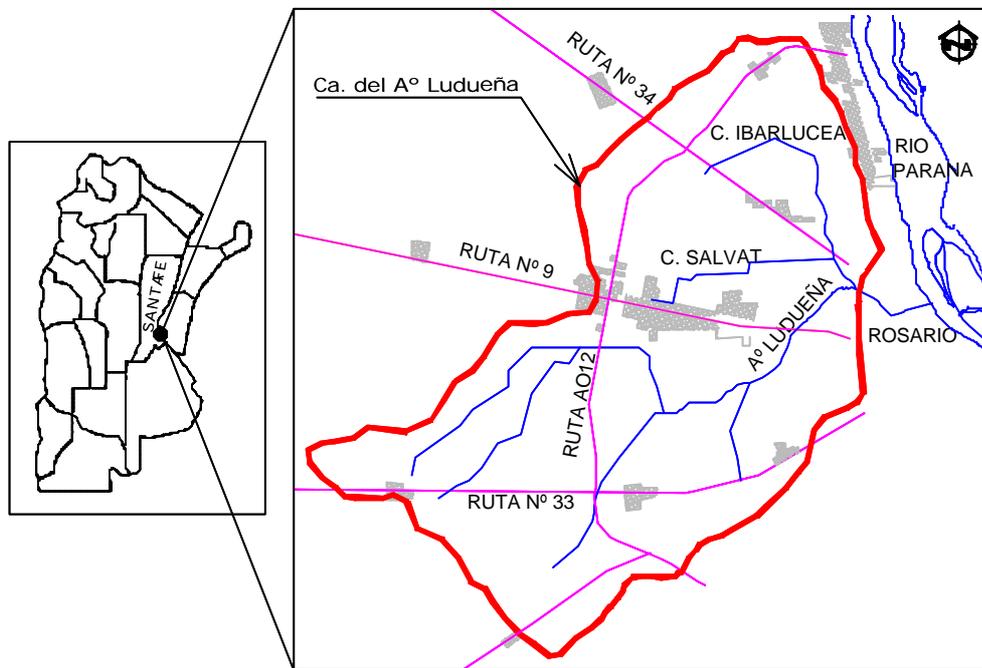


Figura 1: Cuenca del A° Ludueña

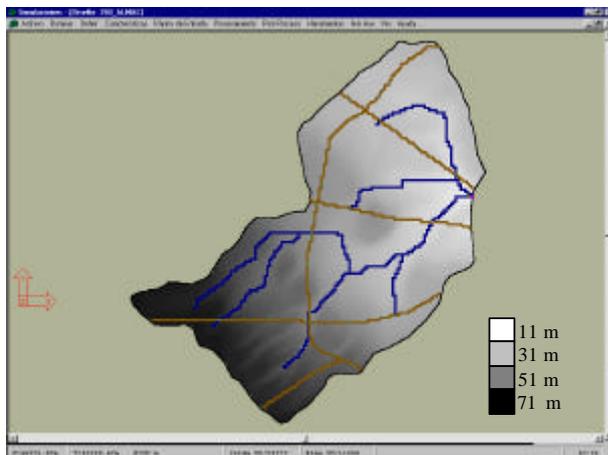


Figura 2: Discretización de la cuenca para una grilla de 250 m

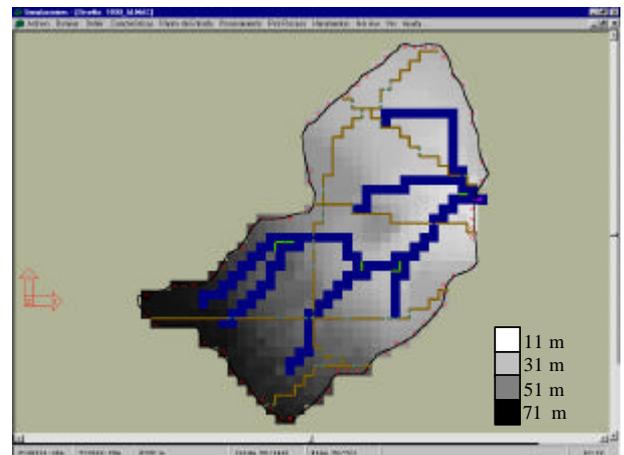


Figura 3: Discretización de la cuenca para una grilla de 1000 m

Tabla 1: Principales características de la cuenca para los diferentes tamaños de la grilla.

Tamaño de Grilla [m]	Area [Km <sup>2</sup> ]	Long. Tot. Cursos [Km]	D.d. [km <sup>-1</sup> ] (*)	Cant. Tot. de Celdas	Cant. Tot. de Vinculaciones	Pend. media [‰]
250	692.91	127.0	0.183	11085	21856	1.56
500	692.91	125.5	0.181	2851	5545	1.44
1000	692.91	122.0	0.176	720	1364	1.38

(\*) Dd: Densidad de drenaje = (Long. Total Cursos)/Area

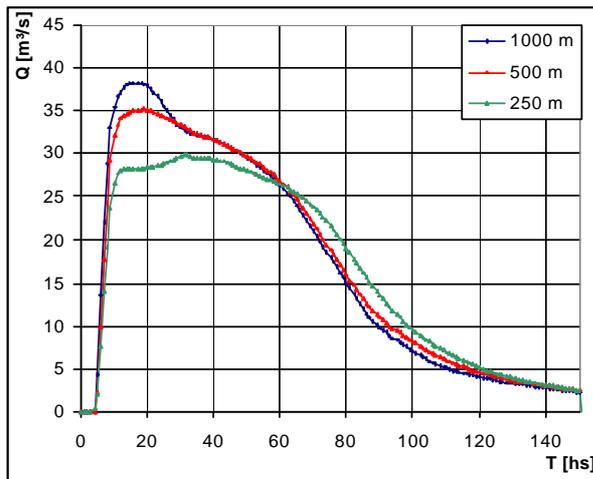
Para cada discretización se simuló una serie de eventos históricos en los que se contó con datos observados de lluvia y caudal, y eventos hipotéticos. Las lluvias se distribuyeron

espacialmente en tres zonas aplicando el método de los polígonos de Thiessen. Los eventos hipotéticos fueron lluvias uniformes en toda la cuenca, de diferentes intensidades y de igual duración. En la tabla 2 se resumen las características de 6 de dichos eventos.

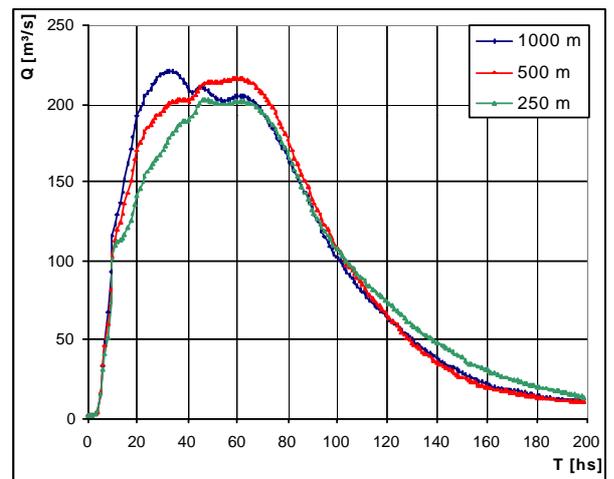
**Tabla 2: Características de los eventos simulados**

	Intensidad [mm/h]	Duración [hs]	Lamina neta [mm]
Evento 1	1	5	5
Evento 2	2	5	10
Evento 3	3	5	15
Evento 4	6	5	30
Evento 5 (observado)	27 (máxima)	30	38
Evento 6 (observado)	28 (máxima)	60	107

La discretización de mayor detalle (250 m) se consideró como referencia para la evaluación de la respuesta en término de caudales, asumiéndose que es la que mejor reproduce los procesos en la cuenca. Para esta discretización y con los eventos reales se calibraron los parámetros de modo de ajustar tanto los caudales picos como la forma del hidrograma resultando valores promedio de rugosidad del valle de 0.1 y del río de 0.04. Estos parámetros fueron utilizados en las discretizaciones más gruesas. En las figuras 4 y 5 se pueden observar los hidrogramas correspondientes al evento 3 y 6, respectivamente; en la sección de control de la cuenca para las discretizaciones de 250 m, 500 m y 1000 m.



**Figura 4: Hidrograma en la sección de control para el evento 3 y discretizaciones de 250, 500 y 1000 m.**



**Figura 5: Hidrograma en la sección de control para el evento 6 y discretizaciones de 250, 500 y 1000 m.**

En la figura 6 se muestran los valores de la relación del caudal pico para cada tamaño de la grilla y para cada evento referido al caudal pico correspondiente a la grilla de 250 m en la sección de control:

$$Q_P^* = \frac{Q_{P_{i,j}}}{Q_{P_{250,j}}} \quad (1)$$

Donde:

$Q_{P_{i,j}}$  = Caudal pico de la discretización  $i$  para el evento  $j$

$Q_{P_{250,j}}$  = Caudal pico de la discretización de 250 m para el evento  $j$

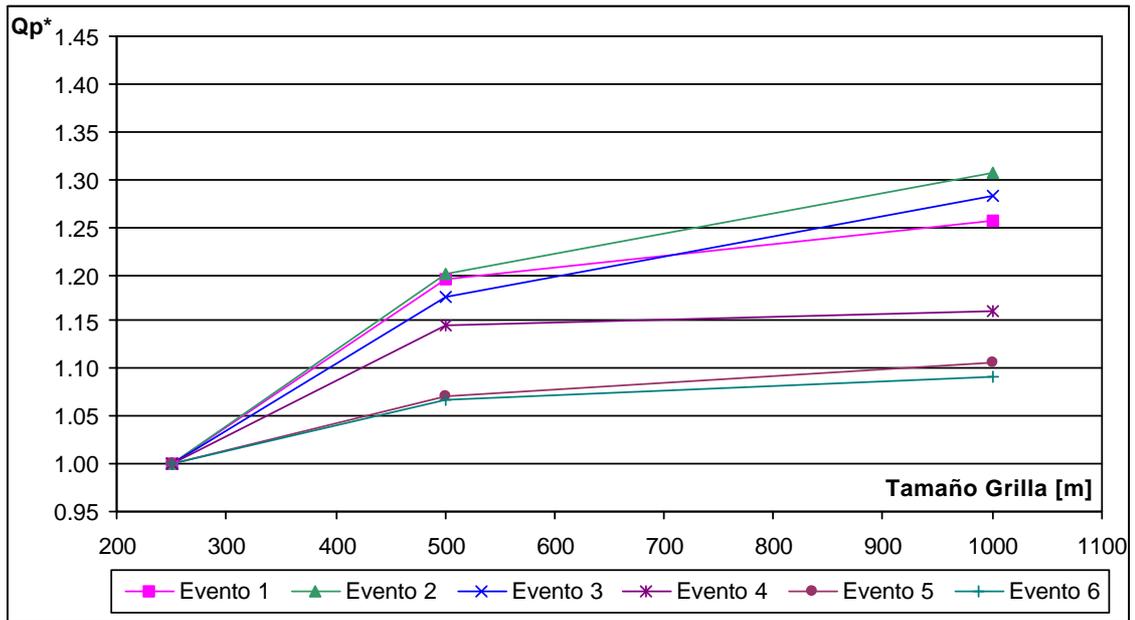


Figura 6: Relación entre caudales pico para las diferentes discretizaciones referidos al caudal pico de la de 250 m

### Análisis de compensación del efecto del aumento de la grilla mediante aumento de rugosidad

Debido a que las mayores discretizaciones producen un mayor caudal saliente, y para analizar la posible compensación en términos de coeficiente de resistencia que debe ser necesario para reproducir la misma respuesta con la menor y mayor discretización (250 m y 1000 m), se modificó la resistencia al escurrimiento en la constitución de 1000 m variando el coeficiente de rugosidad del valle. El criterio seguido fue que se ajusten los valores de caudal pico y que se mantenga la forma del hidrograma. Los valores finales promedios del coeficiente fueron: 0.17; 0.18; 0.175; 0.147; 0.132 y 0.122 para los eventos 1, 2, 3, 4, 5, y 6 respectivamente. En las figuras 7 y 8 se muestran los hidrogramas correspondientes para los eventos 4 y 5. Se observa que para los eventos mas pequeños se requieren mayores valores del coeficiente de rugosidad del valle que para los eventos mayores; esto coincide con la tendencia mostrada en la figura 6

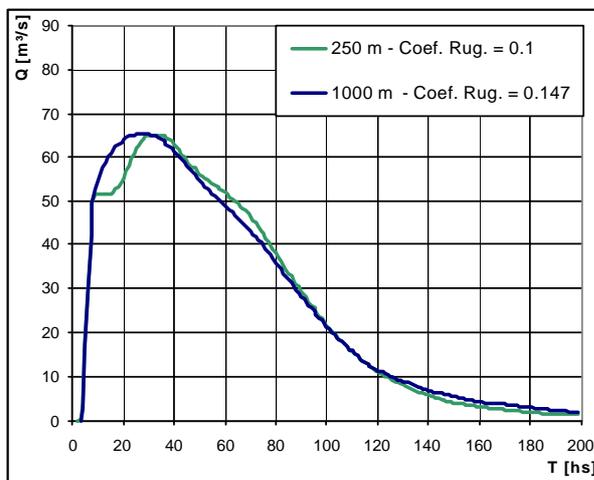


Figura 7: Hidrograma para el evento 4 ajustando el coeficiente de rugosidad para la grilla de 1000 m

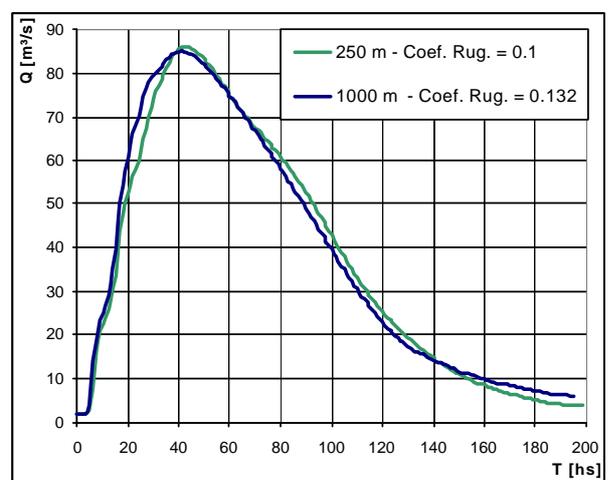
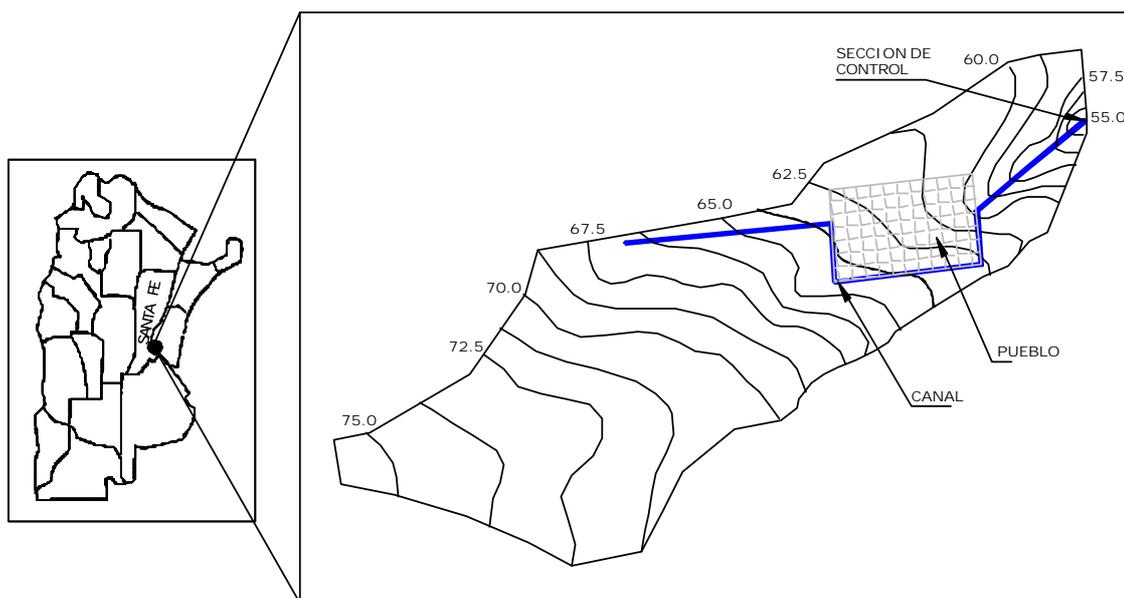


Figura 8: Hidrograma para el evento 5 ajustando el coeficiente de rugosidad para la grilla de 1000 m

## Cuenca del Canal Santa Teresa

La cuenca se encuentra ubicada al sureste de la provincia de Santa Fe, a unos 60 km. de la ciudad de Rosario. Tiene un área de aproximadamente 14 Km<sup>2</sup> y una pendiente media del 0.2 %. Es atravesada por un canal artificial construido para evitar el anegamiento de las áreas rural y urbana (Figura 9). Posee en su zona alta un predominio de flujo mantiforme (poca pendiente del terreno natural) convirtiéndose en la parte baja, en flujo predominantemente encausado (sobre la traza del canal artificial) (Scuderi et al., 1999; Rentería et al., 2000). En esta cuenca se aplicó la misma metodología que la aplicada en la cuenca del A° Ludueña. Los distintos tamaños de la grilla (cuadrada) para la representación fueron de 100 m, 200 m y 400 m de lado. En la tabla 3 se detallan las características resultantes de las diferentes discretizaciones. Un ejemplo de representación de la cuenca para la grilla de 100 m y de 400 m puede verse en las figuras 10 y 11, respectivamente.

Para todas las discretizaciones se definió un coeficiente de rugosidad promedio del valle igual a 0.1 y del curso igual a 0.025. Debido a la falta de datos de precipitaciones y caudales observados se simularon eventos hipotéticos (Tabla 4). El evento 6 se obtuvo por análisis estadístico de precipitaciones y corresponde a una lluvia de recurrencia de 10 años. Todos los eventos están distribuidos uniformemente en la cuenca. Los eventos 1 al 5 son de igual duración y de intensidad constante.



**Figura 9: Cuenca del Canal de Santa Teresa**

**Tabla 3: Principales características de la cuenca para los diferentes tamaños de la grilla**

Tamaño de Grilla [m]	Area [Km <sup>2</sup> ]	Long. Tot. Cursos [m]	D.d. [km-1] (*)	Cant. Tot. de Celdas	Cant. Tot. de Vinculaciones	Pend. media [o/oo]
100	13.81	6900	0.500	1396	2672	2.12
200	13.81	6800	0.492	357	654	2.11
400	13.81	6400	0.463	100	170	2.07

(\*) Dd: Densidad de drenaje = (Long. Total Cursos)/Area

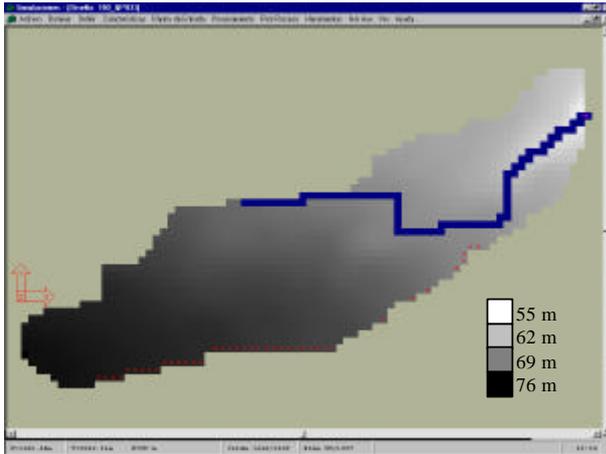


Figura 10: Discretización para un grilla de 100 m

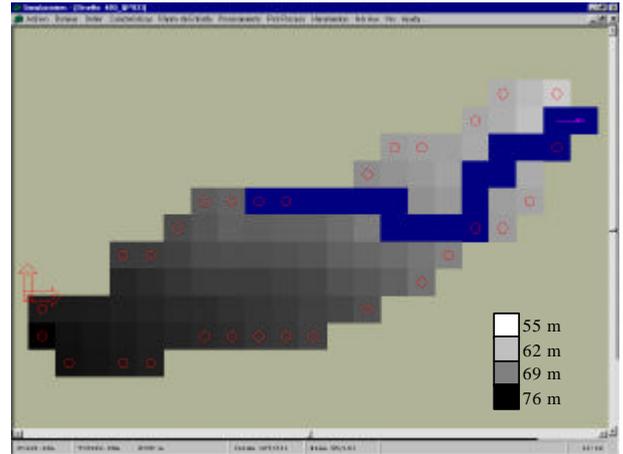


Figura 11: Discretización para un grilla de 400 m

Tabla 4: Características de los eventos simulados

	Intensidad [mm/h]	Duración [hs]	Lamina neta [mm]
Evento 1	2	5	10
Evento 2	3	5	15
Evento 3	6	5	30
Evento 4	10	5	50
Evento 5	14	5	70
Evento 6	13 (máxima)	8	70.2

En las figuras 12 y 13 se muestran los hidrogramas en la sección de control correspondiente a los eventos 4 y 6, respectivamente; para todas las discretizaciones. En la figura 14 se muestran los valores del caudal pico  $Q_p^*$  (ec.1) referido a la discretización de 100 m en la sección de control.

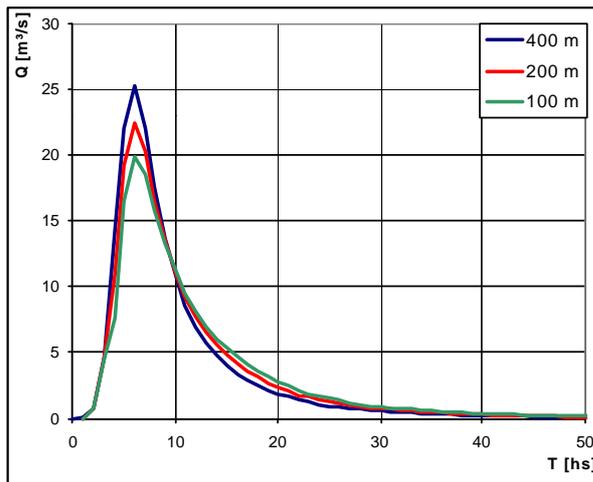


Figura 12: Hidrograma en la sección de control para el evento 4 y para todas las discretizaciones.

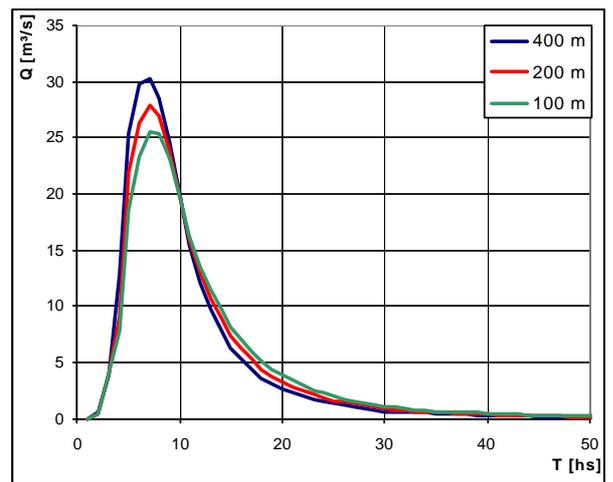


Figura 13: Hidrograma en la sección de control para el evento 6 y para todas las discretizaciones.

Los valores promedios del coeficiente de rugosidad del valle al ajustar el caudal pico y la forma del hidrograma de la discretización de 400 m referida a la de 100 m fueron para el evento 1: 0.16; evento 2: 0.16; evento 3: 0.16; evento 4: 0.152; evento 5: 0.15 y evento 6: 0.147.

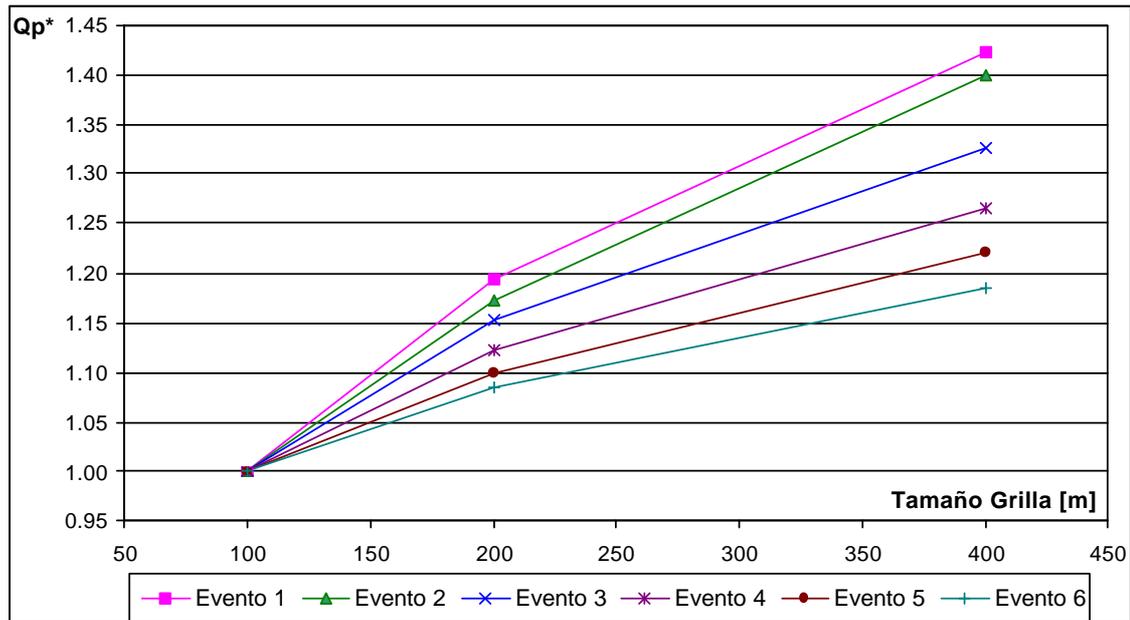


Figura 14: Valores de  $Q_p^*$  referidos al caudal pico de la discretización de 100 m

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

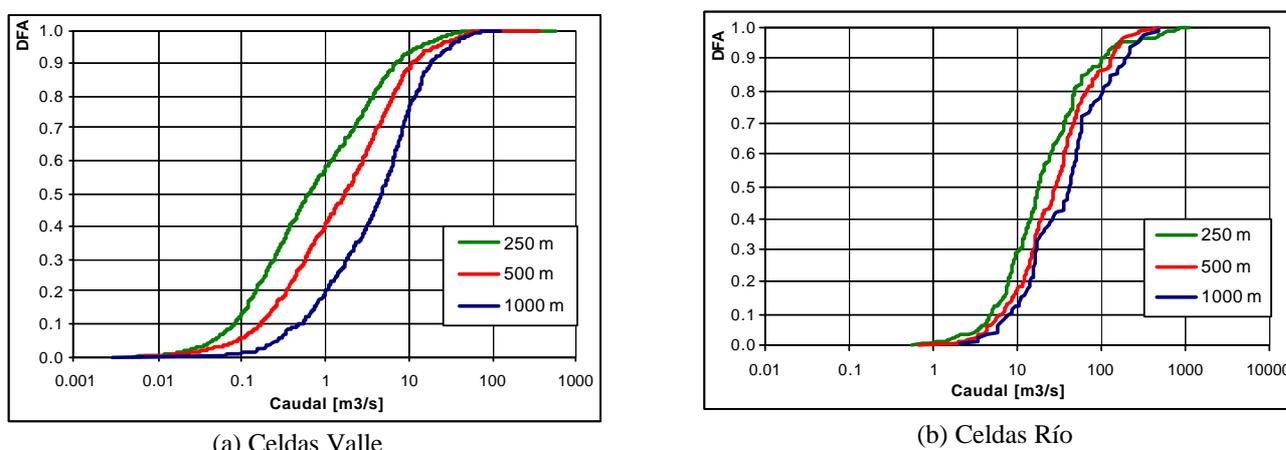
En función de los hidrogramas generados en ambas cuencas en la sección de control para un evento dado se observa que con el incremento del tamaño de la grilla se generan valores de caudales picos mayores (Figuras 4, 5, 12 y 13) y en general se presentan valores de tiempo al pico menores. Se observa además que la diferencia entre caudales pico es más marcada para eventos pequeños (baja intensidad y/o corta duración) (Figuras 6 y 14). Admitiendo que el parámetro de ajuste es el valor del coeficiente de rugosidad del valle se observa (Figuras 7 y 8) que es necesario aumentar dicho valor para lograr una adecuada concordancia entre el hidrograma de la discretización mayor con el correspondiente de la discretización menor. Valores mayores de este coeficiente se presentan para el ajuste del hidrograma correspondiente a los eventos más pequeños. Se considera que el único parámetro modificado es dicho coeficiente, permaneciendo constantes todos los demás parámetros. Al hacer un análisis similar modificando el valor del coeficiente de rugosidad del río se observa que al ajustar el valor del caudal máximo no se puede mantener la forma del hidrograma.

Comparando los resultados entre ambas cuencas (Figuras 6 y 14) se observa que para un mismo evento, en la cuenca más pequeña se tienen mayores variaciones entre los caudales pico; indicando que ésta es más sensible a la variación de las respuestas obtenidas con los diferentes tamaños de la grilla.

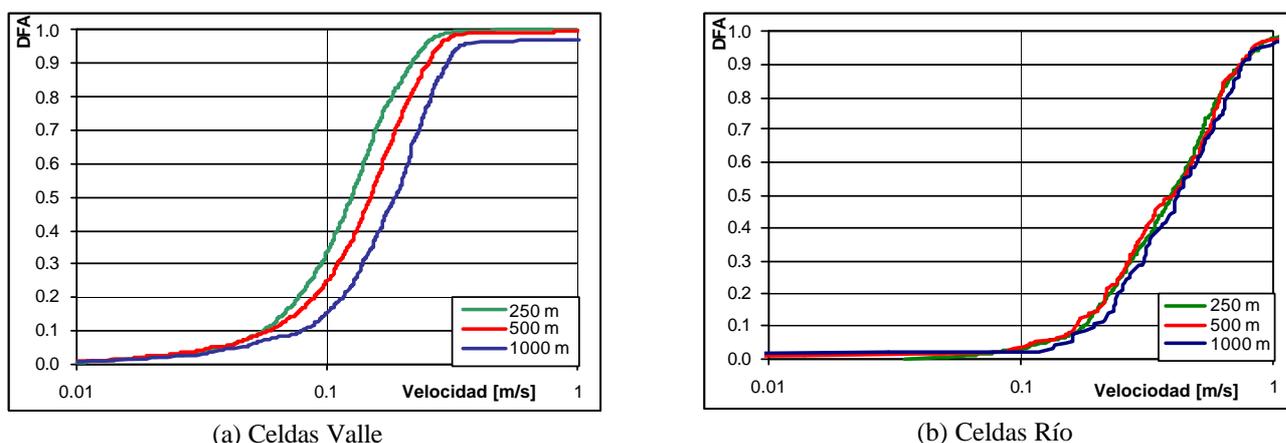
Una explicación al fenómeno observado se halla a partir del análisis de la modificación de las áreas tributarias, caudales y velocidades en cada celda ante la modificación de la dimensión de la grilla. Este análisis puede llevarse a cabo en condiciones de equilibrio de la cuenca, o sea, cuando en la cuenca se alcanza un estado de escurrimiento tal que todo lo que entra está saliendo. En este caso el caudal pasante por cada celda es directamente proporcional al área aguas arriba que aporta caudal a la celda (dividiendo el caudal pasante en cada celda por el caudal que produce una celda individual se obtiene la cantidad de celdas aportantes, multiplicando luego por el área de 1 celda se obtiene el área total de aporte o área tributaria). Aplicando distribuciones de frecuencias acumuladas (DFA) a las áreas tributarias, caudales y velocidades en cada discretización puede

explicarse el mecanismo de aceleración de flujo en la medida que la discretización espacial se incrementa.

En la figura 15 se presentan las DFA de los caudales para celdas del valle (a) y para celdas río (b), determinadas para el equilibrio en la cuenca del A° Ludueña para una lluvia de 2.5 mm/h que genera un caudal en la sección de control de 486 m<sup>3</sup>/s. Por ej. para dimensiones de celdas de 250, 500 y 1000 m por el 50% de las celdas (DFA= 0.50) del valle escurren menos que 0.64, 1.65 y 4.54 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Obsérvese que la alteración es menos significativa en las celdas del río. La figura 16 muestra las DFA de las velocidades para la misma cuenca. En este caso los valores para el 50% de las celdas valle es 0.124, 0.137 y 0.174 m/s para grillas de 250, 500 y 1000 m respectivamente. Claramente puede inferirse como en la medida que la discretización aumenta las velocidades de flujo aumentan mayormente en el valle y en menor medida en el curso.



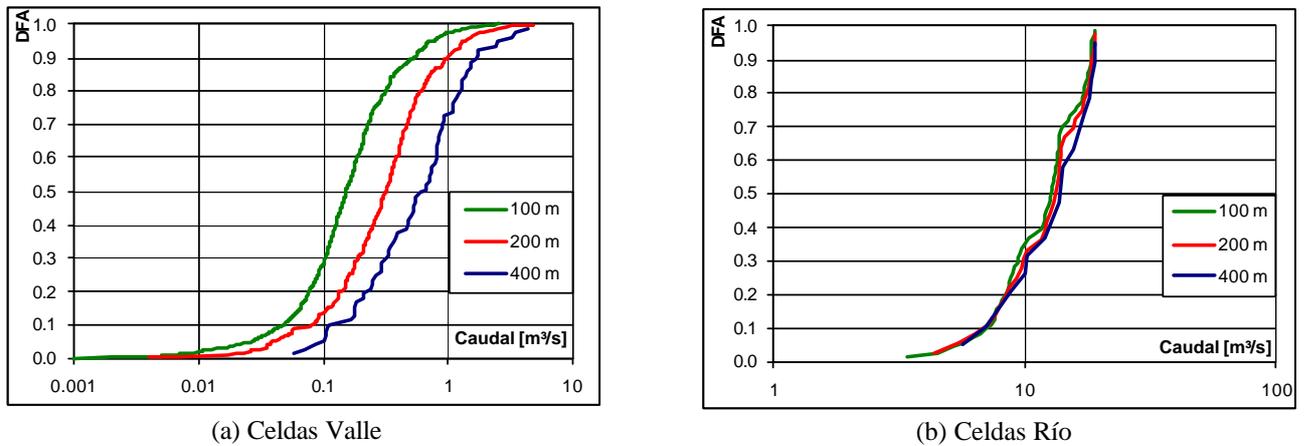
**Figura 15: Densidad de Frecuencia Acumulada para Caudales pasantes por cada celda. Cuenca del A° Ludueña.**



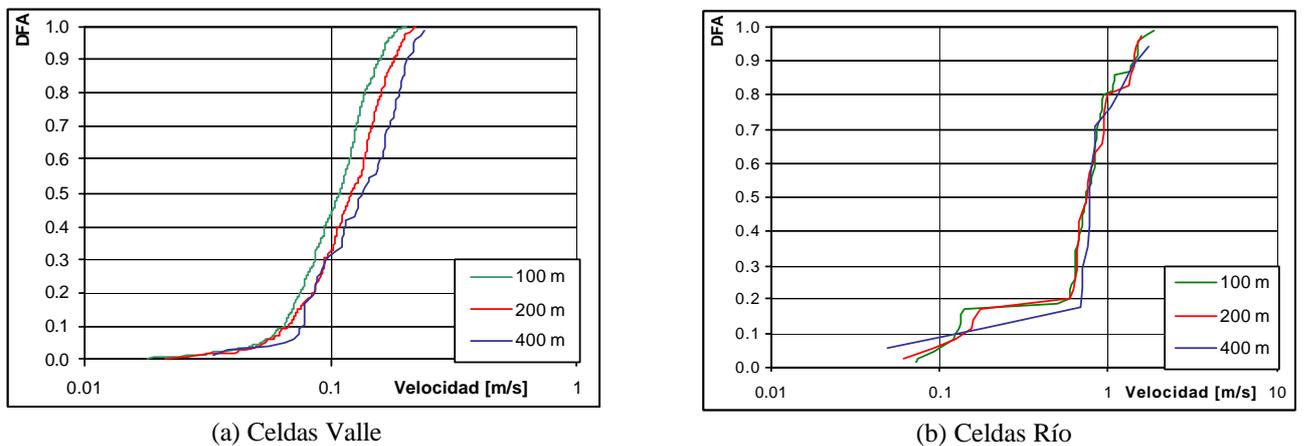
**Figura 16: Densidad de Frecuencia Acumulada para Velocidades pasantes por cada celda. Cuenca del A° Ludueña.**

La figura 17 muestra la DFA de caudales para celdas valle (a) y para celdas río (b) para la cuenca de Santa Teresa obtenidas para una lluvia de 5 mm/h en condiciones de equilibrio de la cuenca. Tomando un valor de DFA = 0.50 para las celdas valle, se tienen caudales pasantes de 0.15 m<sup>3</sup>/s; 0.315 m<sup>3</sup>/s y 0.64 m<sup>3</sup>/s para tamaños de la grilla de 100 m, 200 m y 400 m respectivamente. La DFA de velocidades para las mismas condiciones en la cuenca para celdas valle (a) y para celdas río (b) se presentan en la figura 18; los valores de velocidad en celdas valle para DFA = 0.50 son de 0.108 m/s, 0.120 m/s y 0.134 m/s para tamaños de grilla de 100 m, 200 m y 400 m,

respectivamente. Se observa nuevamente la pequeña variación del caudal y velocidad para las celdas río.



**Figura 17: Densidad de Frecuencia Acumulada para Caudales pasantes por cada celda. Cuenca de Sta. Teresa.**



**Figura 18: Densidad de Frecuencia Acumulada para Velocidades pasantes por cada celda. Cuenca de Sta. Teresa.**

Se observa que los patrones de drenaje del canal son bastante similares para todas las resoluciones, en contraste, los patrones de drenaje del valle son afectados por la resolución de la grilla. Las grillas más gruesas conducen a mayores áreas asociadas (caudales y velocidades) en tanto que las grillas de menores dimensiones producen una mejor descripción de los patrones de drenaje del valle. Las implicancias de estos resultados es que la grilla de dimensiones mayores incrementa el tiempo de equilibrio, llevando las áreas tributarias hacia condiciones de equilibrio parcial.

Para lluvias de similares características, a las áreas tributarias les tomará mayor tiempo alcanzar el equilibrio cuando se utilizan discretizaciones gruesas. A nivel de subcuencas, las grillas con discretizaciones más gruesas serán menos efectivas en la reproducción del escurrimiento si el equilibrio no es alcanzado. Si los eventos de lluvias son de larga duración el equilibrio será alcanzado en todas las celdas y la dimensión de la grilla no es relevante.

Las tendencias descritas son extraídas de un análisis en condiciones de equilibrio de la cuenca, no obstante se reproducen en condiciones de equilibrio parcial como sucede en todas las tormentas en las cuencas del Arroyo Ludueña y canal Santa Teresa donde nunca la duración de la lluvia es tal que la cuenca llegue al equilibrio.

Según Julien y Moglen (1990) se puede determinar una longitud de escala adecuada utilizando el concepto de onda cinemática basado en el hecho de que cuando la duración de la lluvia excede el tiempo de equilibrio, la variabilidad de los parámetros hidrológicos tiene poca influencia en la respuesta de la cuenca. Además esta longitud de escala puede servir como base para la determinación del tamaño de la grilla en modelos hidrológicos. La misma puede escribirse como sigue:

$$L_s = \left[ \frac{tr^{5/3} \times So^{1/2} \times i^{2/3}}{n} \right] \quad (2)$$

Donde  $L_s$  (m) es la longitud de escala;  $tr$  (seg.) es la duración de la lluvia;  $So$  es la pendiente media;  $i$  (m/seg.) es la intensidad promedio en exceso y  $n$  es el coeficiente de rugosidad de la superficie promedio. Por ejemplo, si se aplica esta fórmula para los siguientes valores:  $tr = 5 \text{ hs} = 18000 \text{ seg}$ ;  $So = 0.0015$ ;  $i = 6 \text{ mm/h} = 1.67 \times 10^{-6} \text{ m/seg}$ ;  $n = 0.1$ ; se obtiene:  $L_s = (18000^{5/3} \times 0.0015^{1/2} \times 0.00000167^{2/3}) / 0.1 = 673 \text{ m}$ .

Los valores anteriores corresponden al Evento 4 en la cuenca del A° Ludueña y al Evento 3 en la cuenca del canal Santa Teresa. Pero por otro lado ambas cuencas han sido modeladas para tamaños de la grilla menores al valor de  $L_s$  y no se observa que en los hidrogramas obtenidos se puedan despreciar las variaciones introducidas por los diferentes tamaños de la grilla poniendo en duda si el criterio señalado en ec(2) alcanza para poder definir la longitud de escala adecuada. Lo que se corrobora respecto a ec(2) es que parámetros como la duración de la lluvia en primer lugar y la intensidad contribuyen a aumentar la longitud de escala  $L_s$ , o viéndolo desde el análisis de influencia de la grilla, a mayor duración o intensidad de la lluvia la modificación en la respuesta de la cuenca ante modificaciones en la discretización tienden a disminuir.

## CONCLUSIONES

Se ha analizado la influencia del tamaño de la grilla de modelación sobre la respuesta hidrológica en dos cuencas de llanura utilizando un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasi-2D con diferentes tamaños de la grilla y para diversos eventos (observados e hipotéticos).

Con respecto a la representación de las características de la cuenca puede decirse que a medida que aumenta el tamaño de la grilla se “pierde” información debido a que se “agregan” dentro de un área mayor los valores correspondientes a la discretización más pequeña; por ejemplo para discretizaciones con más alto nivel de detalle se tienen valores de pendientes locales mayores, estas se “atenúan” cuando se pasa a un nivel de detalle menor; por lo que se obtiene una pendiente media de la cuenca más pequeña.

A medida que el tamaño de la grilla disminuye no se encontró una tendencia de los hidrogramas en la sección de control a “aproximarse” hacia un hidrograma determinado; a partir del cual pueda despreciarse la variación inducida por el tamaño de la grilla.

Al variar el tamaño de la grilla se observa que la respuesta de la cuenca es más sensible para eventos pequeños (bajas intensidades y duración) que para los eventos mayores. Esto permite modelar eventos de importancia con mejores resultados que si se utiliza la misma discretización para eventos más pequeños.

La grilla de discretización afecta primariamente condiciones de escurrimiento sobre las celdas valle. Los resultados indican que si las características de la lluvia son tales que solamente un equilibrio parcial será alcanzado en las celdas tributarias del valle, entonces deben utilizarse discretizaciones más pequeñas, incluso inferiores a las que resultan del análisis cinemático planteado con ec.(2).

Si un evento es de gran duración o de alta intensidad, entonces se alcanzarán condiciones de equilibrio en gran parte de las celdas tributarias.

Las cuencas más pequeñas y sin alteraciones antrópicas como terraplenes, alcantarillas, embalses, etc. son más sensibles a los efectos resultantes del tamaño de la grilla para un evento dado.

Los efectos sobre la respuesta de la cuenca debido al tamaño de la grilla no dependen del tamaño de la cuenca.

Un parámetro de ajuste que permite corregir al menos los hidrogramas en secciones de control es el coeficiente de rugosidad del valle, pero no debe perderse de vista que el mismo debe permanecer dentro de valores estándares, permitiendo además un buen ajuste de la forma del hidrograma.

Investigaciones posteriores estarán orientadas a precisar un tamaño de la grilla apropiado, compatible con las longitudes de escala de los procesos predominantes involucrados en la producción y propagación del escurrimiento superficial en cuencas de llanura.

## BIBLIOGRAFÍA

- Julien, P. and Moglen, G.** (1990) *Similarity and length scale for spatially varied overland flow*. Water Resources Research, 26, (8), 1819-1832.
- Molnár, D. and Julien, P.** (2000) *Grid-Size effects on surface runoff modeling*. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 5, (1), 8-16.
- Rentería, J. y Stenta, H.** (2003) *Desarrollo de soporte computacional interactivo para sistema de simulación hidrológica superficial*. Tesis de Grado Ingeniería Civil. Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Rentería, J.; Carbone, M. y Armando, A.** (2000) *Cuenca de Santa Teresa*. Trabajo final de la cátedra Hidrología e Hidráulica Aplicada. Carrera de Ing. Civil. FCEIyA. UNR.
- Riccardi, G.** (2000) "Un sistema de simulación hidrológica-hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos". XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II, Córdoba, Argentina, 159-168.
- Riccardi, G.; Scuderi, C. y Stenta, H.** (2002) "Modelado de escurrimiento superficial con alto nivel de detalle en La cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina". XIX Congreso Nacional del Agua, T33, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- Scuderi, C.; Stenta, H. y Saucedo, I.** (1999) *Cuenca de Santa Teresa*. Trabajo final de la cátedra Hidrología e Hidráulica Aplicada. Carrera de Ing. Civil. FCEIyA. UNR.
- Stenta, H. y Scuderi, C.** (2001) *La modelación de escurrimiento superficial con alto nivel de detalle de la cuenca del Arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina*. Informe de adscripción. Carrera de Ing. Civil. FCEIyA. UNR.
- Wood, E.; Sivapalan M.; Beven, K. and Band, L.** (1988) *Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling*. Journal of Hydrologic, 102, 29-47.