

**XXII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CIUDAD GUAYANA, VENEZUELA, OCTUBRE 2006**

**RESPUESTAS HIDROLÓGICAS EN LA MODELACION DEL
ESCURRIMIENTO EN CUENCAS DE LLANURA CON DIFERENTES
NIVELES DE DETALLE**

Hernán R. Stenta⁽¹⁾, Gerardo A. Riccardi⁽²⁾ y Pedro A. Basile⁽³⁾

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

(1) Becario CONICET – (2) Investigador CIUNR – (3) Investigador CONICET

Riobamba 245 bis (2000) Rosario, Argentina

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

RESUMEN:

Los diferentes niveles de detalle en la constitución del modelo matemático distribuido, caracterizados por los distintos tamaños de la grilla, generan modificaciones en la representación morfológica de la cuenca y en la respuesta hidrológica de la misma (Stenta y Riccardi, 2004). En el presente trabajo se analizan dos cuencas de llanura ubicadas en la región sur de la provincia de Santa Fe (Argentina); cada una discretizada con diferentes tamaños de grilla cuadrangular, y se utiliza el concepto de estado de equilibrio completo en la cuenca con la finalidad de obtener respuestas hidrológicas similares; en términos de caudales transferidos y volúmenes almacenados; entre los diferentes niveles de detalle calibrando los parámetros de la geometría de almacenamiento en la celda y los parámetros de resistencia del valle y de los cursos correspondiente a la discretización de menor nivel de detalle. Los parámetros calibrados (resistencia del valle, de los cursos y la geometría de almacenamiento en la celda) bajo condiciones de equilibrio completo son utilizados para analizar la respuesta de la cuenca ante la ocurrencia de eventos reales e hipotéticos de corta duración. Los resultados indican acerca de la necesidad de incrementar los coeficientes de resistencia del valle y de los cursos a medida que aumenta el tamaño de la grilla; lográndose reproducir adecuadamente los hidrogramas en la sección de control y en secciones internas para eventos reales e hipotéticos para los distintos niveles de detalle.

ABSTRACT:

Different detail levels in the constitution of the distributed mathematical model generate modifications in the geomorphologic representation and hydrologic response in the basin. Different detail levels are characterized by different grid-cell size. Two flatlands basins located in the south region of Santa Fe (Argentina) are analyzed and they are modeled with different square grid-cell size. Complete equilibrium state in the basin is used to obtain similar hydrologic response at different detail levels in terms of discharge and storage. The overland and channels resistance parameters and storage geometry in the grid-cell parameter of smaller detail level are calibrated under complete equilibrium state in the basin. The calibrated parameters are used to analyze the response of the basin for observed and hypothetical event of short duration. The results indicate that higher overland and channels resistance coefficient will be necessary when the grid-cell-size is incremented. Outlet and sub-basin calculated hydrographs will be suitably reproduced for observed and hypothetical event for different detail level.

PALABRAS CLAVE: niveles de detalle, modelos matemáticos distribuidos, cuencas de llanura.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento y descripción del proceso de generación y traslado del escurrimiento superficial en una determinada región es de suma importancia. El mismo está directamente vinculado a procesos de generación de inundaciones, pudiendo afectar por lo tanto vidas humanas; además el conocimiento de este proceso es sumamente útil a la hora de plantear un manejo integral a nivel de cuenca.

En este contexto puede afirmarse que los modelos matemáticos de parámetros distribuidos con alto nivel de detalle constituyen una herramienta fundamental para mejorar el conocimiento y descripción del proceso de transformación lluvia-caudal y propagación de crecidas. Este tipo de modelos permite conocer variables de flujo tales como alturas de agua y caudales transferidos en todo el dominio de la cuenca.

Como contrapartida, estos modelos tienen la característica de requerir mayor cantidad de información, mayores tiempos de cálculo y mayor cantidad de ocupación de espacio en disco a medida que el nivel de detalle aumenta, estando estos altos niveles de detalle condicionados por la información existente, tanto morfológica como hidrológica. El nivel de detalle considerado está directamente relacionado con el grado de agregación de la información; y en modelos basados en esquemas de celdas ortogonales, como el aquí utilizado, este nivel de detalle se encuentra definido por el tamaño de la grilla considerada.

Los diferentes tamaños de grilla; es decir, los diferentes niveles de detalle en la constitución del modelo matemático de una determinada cuenca generan modificaciones en la representación de las características y en la respuesta hidrológica de la misma (Stenta y Riccardi, 2004). Al ir aumentando el tamaño de la grilla se tienen menores niveles de detalle; ya que se agregan en un área mayor las características topológicas y se engloban procesos que anteriormente se describían con mayor precisión para los tamaños de grilla menores.

Numerosos trabajos han abordado esta temática; Pedraza et. al. (2005a y 2005b) propusieron un procedimiento de agregación de esquemas de modelación para la simulación del flujo de agua superficial basado en relaciones de similitud hidrológica. Los autores estudiaron pequeñas cuencas urbanas teóricas y experimentales aplicando un modelo de onda cinemática. Utilizan el concepto de almacenamiento de equilibrio (Seq) como la “llave” para el escalamiento de los parámetros para mantener la similitud hidrológica entre la escala de detalle y una escala agregada modificando el valor de la rugosidad computacional (efectiva) N^* para la escala agregada. Ellos concluyen que se debe disminuir la rugosidad computacional (efectiva) N^* con el aumento de la escala.

Molnár y Julien (2000) realizaron un estudio sobre cuencas de pendientes moderadas (1-2%), analizando el efecto del tamaño de la grilla en el modelado del escurrimiento superficial con un modelo de parámetro distribuido. Han modelado una cuenca de aproximadamente 21 km² con tamaños de grilla de 127, 254 y 380 m de lado y encontraron que el efecto primario a la hora de reproducir el hidrograma en la sección de control entre las diferentes tamaños de grilla es aumentar el coeficiente de rugosidad del valle de un valor de 0.08 para 127 m a 0.15 para 380 m. Los autores utilizan el concepto de equilibrio en la cuenca (a través del tiempo de equilibrio en la misma) para analizar la respuesta para los distintos tamaños de grilla.

Stenta y Riccardi (2004) estudiaron el efecto del tamaño de la grilla en la representación de las características de la cuenca y en la respuesta hidrológica para cuencas de llanura. Los autores indicaron que al incrementarse el tamaño de la grilla se generan, en la sección de control, valores de caudales picos mayores y en general tiempo al pico menores. Indican además que al ir disminuyendo el tamaño de la grilla no se encuentra 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.

Julián y Moglen (1990) utilizaron un modelo de elementos finitos unidimensional utilizando la aproximación de onda cinemática para analizar la respuesta del escurrimiento superficial ante la variabilidad espacial de pendientes, anchos, rugosidades e intensidades de lluvia neta. Los autores concluyen 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.

En este trabajo se utiliza el concepto de estado de equilibrio completo en la cuenca para la obtención de respuestas hidrológicas similares entre los distintos tamaños de grilla. Se realiza un análisis sobre la cuenca contemplando las características del movimiento hidrodinámico caracterizado por los caudales y volúmenes de equilibrio en todo el dominio de la misma. Para obtener respuestas hidrológicas similares entre los diferentes tamaños de grilla se ajustan los parámetros de resistencia del valle; de los cursos y la geometría de almacenamiento de la celda asociados a la discretización de menor nivel de detalle. La condición de equilibrio completo en una cuenca se presenta cuando se alcanza un estado de escurrimiento tal que todo lo que entra está saliendo, para una lluvia espacialmente uniforme de intensidad constante y larga duración. Los parámetros obtenidos en estas condiciones se utilizan para analizar la respuesta de la cuenca para los diferentes tamaños de grilla ante la ocurrencia de eventos de corta duración (hipotéticos y observados).

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS

Se estudian dos cuencas de llanura ubicadas al sur de la Provincia de Santa Fe (Argentina); la cuenca del A° Ludueña y la cuenca del canal Santa Teresa. Se utiliza un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasi 2-D basado en esquemas de celdas con aproximación de onda difusiva, tipificado CTSS8 (Riccardi, 2000); este modelo matemático ha sido implementado con anterioridad en diversos trabajos en zonas de llanura (Riccardi et. al., 2002; Stenta y Riccardi, 2004) y en zonas de terreno ondulado (Casenave, 2005), obteniéndose resultados satisfactorios. Aplicando el modelo matemático la cuenca resulta constituida en celdas que representan las áreas tributarias a los cursos de agua (celdas valle) y celdas que constituyen los cursos de agua propiamente dicho (celdas río). En cada celda el modelo permite definir secciones transversales con un punto bajo y pendientes transversales (ita) para la definición de la forma de almacenamiento en celdas del valle y para el sector del valle de las celdas río (Riccardi et. al., 2002). En primer lugar, cada una de las cuencas constituidas y para los diferentes tamaños de grilla cuadrangular se analiza bajo condiciones de equilibrio completo y posteriormente bajo condiciones de equilibrio parcial para eventos observados e hipotéticos. Conjuntamente con el modelo matemático se ha implementado una plataforma visual bajo Windows denominada Simulaciones (Stenta et. al., 2005) para el manejo de la información en la etapa de pre y post cálculo.

Cuenca del Arroyo Ludueña.

La cuenca del Arroyo Ludueña se encuentra ubicada al sur de la Provincia de Santa Fe, Argentina (Figura 1). La misma encierra parte de la ciudad de Rosario y otras poblaciones de los alrededores. El área en estudio es de aproximadamente 700 km²; la misma se conforma de cursos naturales y artificiales y su pendiente media es del orden del 0.11 %. La cuenca presenta una serie de alteraciones antrópicas como ser terraplenes carreteros y ferroviarios, alcantarillas, puentes, etc. Esta cuenca se constituyó con tres tamaños de grilla cuadrangular de lado: 250 (TG₂₅₀), 500 (TG₅₀₀) y 1000 m (TG₁₀₀₀). Por lo tanto la discretización de mayor nivel de detalle corresponde a un tamaño

de grilla de 250 m de lado. En la tabla 1 se resumen las características más relevantes para las tres discretizaciones adoptadas y en la Figura 2 se muestra la discretización de la cuenca para un tamaño de grilla de 250 m. En base a una serie de eventos observados y para la discretización de TG₂₅₀ se calibraron los parámetros del modelo de modo de ajustar tanto el caudal pico como la forma del hidrograma, resultando de lo anterior valores del coeficiente de resistencia del valle de 0.12 y de los cursos de 0.04. La pendiente transversal de almacenamiento (ita) en celdas valle y en los sectores del valle de las celdas río arrojó un valor de 0.02.

Tabla 1.- Principales características de la cuenca del A° Ludueña según los diferentes tamaños de la grilla.

Tamaño de Grilla [m]	Area [Km ²]	Long. Total Cursos [Km]	Cant. de Total Celdas	Cant. Total de Vinculaciones	Pend. Media [%]
250	700	126.5	11200	22093	1.17
500	700	124.5	2800	5447	1.14
1000	700	122.0	700	1324	1.17

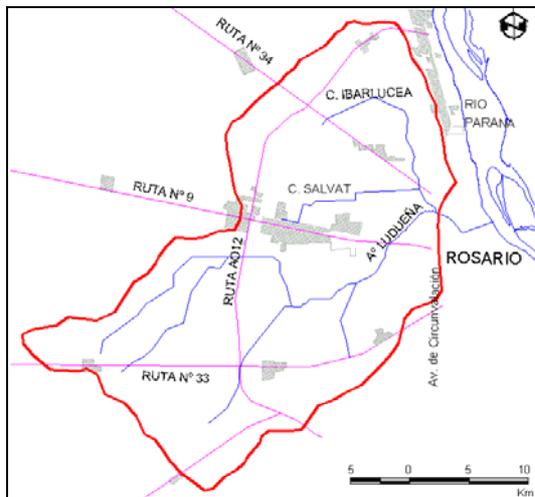


Figura 1.- Cuenca del A° Ludueña.

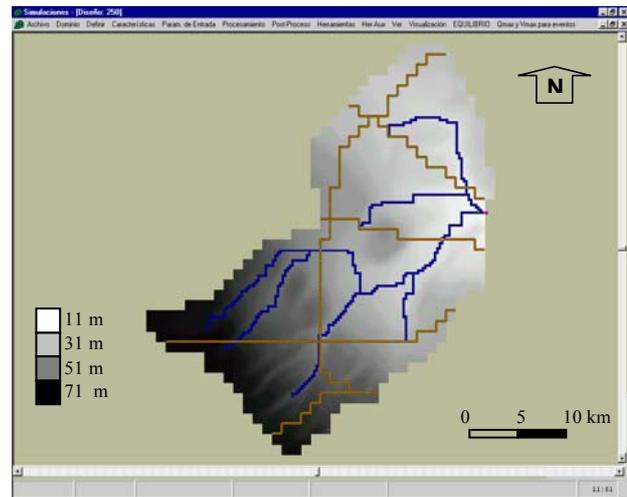


Figura 2.- Cuenca discretizada con un TG₂₅₀.

Con la finalidad de lograr la mejor reproducción de la dinámica de escurrimiento superficial en la cuenca, bajo condiciones de equilibrio completo, se comparan los volúmenes y los caudales intercambiados sobre todo el dominio de la cuenca al pasar de TG₂₅₀ a TG₅₀₀ y de TG₂₅₀ a TG₁₀₀₀. Se verifica, además, que el volumen total en la cuenca para TG₅₀₀ y TG₁₀₀₀ se encuentre dentro del 5 % relativo al volumen total de TG₂₅₀. Para la comparación se utiliza la formulación del coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970):

$$R^2_{Ve \text{ o } Qe} = \frac{\sum_{i=1}^{Nc} (D_{detalle_i} - \bar{D}_{detalle_i})^2 - \sum_{i=1}^{Nc} (D_{detalle_i} - D_{agregado_i})^2}{\sum_{i=1}^{Nc} (D_{detalle_i} - \bar{D}_{detalle_i})^2} \quad [1]$$

Donde:

R²_{Ve}: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe en términos de volumen de equilibrio en celda entre TG₂₅₀ y TG₅₀₀ y entre TG₂₅₀ y TG₁₀₀₀.

R²_{Qe}: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe en términos de caudales de equilibrio entre TG₂₅₀ y TG₅₀₀ y entre TG₂₅₀ y TG₁₀₀₀.

Nc: Numero o cantidad de celdas de la discretización de menor nivel de detalle (TG₅₀₀ y TG₁₀₀₀).

D_{detalle i}: Volumen o caudal de equilibrio de las celdas de la discretización de mayor nivel de detalle (TG₂₅₀).

$\bar{D}_{detalle i}$: Valor medio de los volúmenes o caudales de equilibrio de las celdas de la discretización de mayor nivel de detalle (TG₂₅₀).

$D_{agregado}$ i: Volumen o caudal de equilibrio de la celda de la discretización de menor nivel de detalle (TG_{500} y TG_{1000}).

Los parámetros considerados para TG_{500} y TG_{1000} para maximizar el coeficiente R^2 son: resistencia del valle (nv); resistencia de los cursos (nc) y la forma de almacenamiento en la celda definida a través de la pendiente transversal de almacenamiento (ita). Se asume que el mejor ajuste entre la discretización de mayor (TG_{250}) y menor nivel de detalle (TG_{500} y TG_{1000}) se logra al maximizarse la suma de los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe en términos de volumen (R^2_{Ve}) y de caudales (R^2_{Qe}).

Para todas las discretizaciones se simularon lluvias espacialmente uniformes y de larga duración de modo que en la cuenca se alcancen condiciones de equilibrio completo. Las intensidades de lluvia neta consideradas fueron de 0.25; 0.5; 1.25 y 2 mm/h, generando por lo tanto un caudal de equilibrio en la sección de control de 48,6; 97,2; 243 y 389 m³/s respectivamente. Con lo anterior se considera un amplio rango de condiciones de escurrimiento dentro de la cuenca. Para TG_{500} y TG_{1000} se obtuvieron los valores del coeficiente de resistencia del valle, de los cursos y el valor de la pendiente transversal de almacenamiento (ita) que maximizó la suma de los valores del coeficiente R^2_{Ve} y R^2_{Qe} para las intensidades consideradas. Entre TG_{500} y TG_{1000} se realizaron aproximadamente 160 simulaciones, teniendo en cuenta los 2 tamaños de la grilla, 4 valores de intensidades de lluvia, 4 valores de la pendiente transversal de almacenamiento y un promedio de 5 simulaciones modificando los valores de resistencia del valle y del curso para maximizar R^2_{Ve} y R^2_{Qe} . Los valores finales de los parámetros con los que se logró el mejor ajuste son para TG_{500} : ita = 0.02; nv = 0.135 y nc = 0.045 y para TG_{1000} : ita = 0.02, nv = 0.16, nc = 0.06. En la tabla 2 se resumen los resultados del ajuste en términos de R^2_{Ve} y R^2_{Qe} .

Tabla 2.- Resumen de los valores del coeficiente R^2_{Qe} y R^2_{Ve} al pasar de un TG_{250} a TG_{500} y TG_{250} a TG_{1000} .

TG_x [m]	Intensidad [mm/h]	nv	nc	ita	R^2_{Qe}	R^2_{Ve}	Suma R^2
500	0.25	0.135	0.045	0.020	0.983	0.382	1.37
500	0.50				0.981	0.521	1.50
500	1.25				0.965	0.698	1.66
500	2.00				0.856	0.797	1.65
1000	0.25	0.160	0.060	0.020	0.964	0.277	1.24
1000	0.50				0.957	0.407	1.36
1000	1.25				0.897	0.615	1.51
1000	2.00				0.810	0.735	1.55

En función de los parámetros obtenidos anteriormente (nv, nc e ita) para TG_{500} y TG_{1000} se realizaron las corridas para eventos observados y eventos hipotéticos de diferentes intensidades y duración con la finalidad de analizar la respuesta de la cuenca bajo condiciones de equilibrio parcial, ya que en la misma nunca se alcanzarán condiciones de equilibrio completo para las tormentas reales. Las intensidades de lluvia neta consideradas para los eventos hipotéticos fueron de 3; 8 y 15 mm/h y las duraciones consideradas fueron de 3, 5 y 10 hs. En este caso se compararon, entre la discretización de mayor nivel de detalle (TG_{250}) y menor nivel de detalle (TG_{500} y TG_{1000}), los caudales pico intercambiados (R^2_{Qp}) y el volumen máximo dentro de la celda (R^2_{Vmax}) en todo el dominio de la cuenca. Se utilizó nuevamente para dicha comparación la ec. [1]. Los resultados al agregar una discretización de TG_{250} en otra de TG_{500} se resumen en la tabla 3. En la tabla 4 se muestran los mismos resultados al pasar de un TG_{250} a otra de TG_{1000} . Se muestran además las diferencias porcentuales en caudal pico en la sección de control. En las tablas 3 y 4 el evento E1 corresponde a un evento observado de 38 mm de lámina neta y E2 corresponde a un evento observado de 107 mm de lámina neta.

En las Figuras 3 a 6 se muestran algunos de los hidrogramas resultantes en la sección de control y en secciones internas para los tres tamaños de grilla.

Tabla 3.- Caudales picos en la sección de control, R^2_{Qp} y R^2_{Vmax} para diferentes eventos entre TG₂₅₀ y TG₅₀₀.

Evento simulado	Int. Lluvia neta [mm/h]	Dur. [hs]	Qp TG ₂₅₀ [m ³ /s]	Qp TG ₅₀₀ [m ³ /s]	Dif. Qp [%]	R ² _{Qp} [-]	R ² _{Vmax} [-]	Suma R ² [-]
E 1 (Obs)	27 (máx.)	30	82.1	81.5	-0.8	0.960	0.684	1.644
E 2 (Obs)	28 (máx.)	60	203.7	207.7	2.0	0.955	0.718	1.673
E 4	3	3	15.7	15.8	0.6	0.975	0.521	1.496
E 5	8	3	41.0	44.3	8.0	0.976	0.586	1.562
E 6	15	3	84.2	87.2	3.6	0.968	0.664	1.632
E 7	3	5	28.6	29.8	4.2	0.979	0.556	1.535
E 8	8	5	79.8	80.8	1.3	0.970	0.671	1.641
E 9	15	5	164.9	159.7	-3.1	0.953	0.738	1.691
E 10	3	10	62.1	62.8	1.1	0.950	0.549	1.499
E 11	8	10	191.2	196.5	2.8	0.949	0.724	1.673
E 12	15	10	466.5	466.6	0.0	0.940	0.810	1.750

Tabla 4.- Caudales picos, R^2_{Qp} y R^2_{Vmax} para diferentes eventos entre TG₂₅₀ y TG₁₀₀₀.

Evento simulado	Int. Lluvia neta [mm/h]	Dur. [hs]	Qp TG ₂₅₀ [m ³ /s]	Qp TG ₁₀₀₀ [m ³ /s]	Dif. Qp [%]	R ² _{Qp} [-]	R ² _{Vmax} [-]	Suma R ² [-]
E 1 (Obs)	27 (máx.)	30	82.1	76.7	-6.7	0.899	0.556	1.455
E 2 (Obs)	28 (máx.)	60	203.7	198.4	-2.6	0.879	0.608	1.487
E 4	3	3	15.7	15.3	-2.5	0.939	0.303	1.242
E 5	8	3	41.0	41.9	1.9	0.934	0.416	1.35
E 6	15	3	84.2	83.9	-0.4	0.921	0.515	1.436
E 7	3	5	28.6	27.5	-3.8	0.946	0.372	1.318
E 8	8	5	79.8	76.1	-4.6	0.925	0.507	1.432
E 9	15	5	164.9	161.4	-2.1	0.871	0.619	1.490
E 10	3	10	62.1	57.8	-6.9	0.939	0.495	1.434
E 11	8	10	191.2	179.5	-6.1	0.875	0.639	1.514
E 12	15	10	466.5	406.7	-12.8	0.809	0.627	1.436

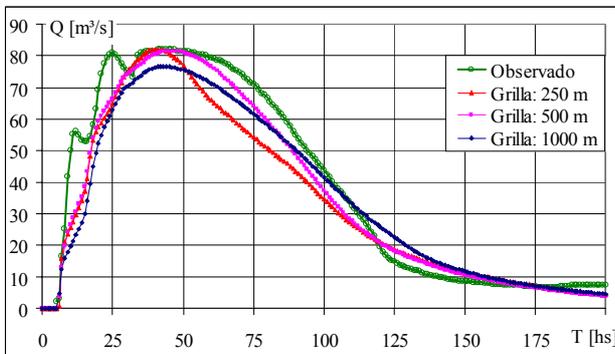


Figura 3.- Hidrograma correspondiente a la sección de control para el evento E 1.

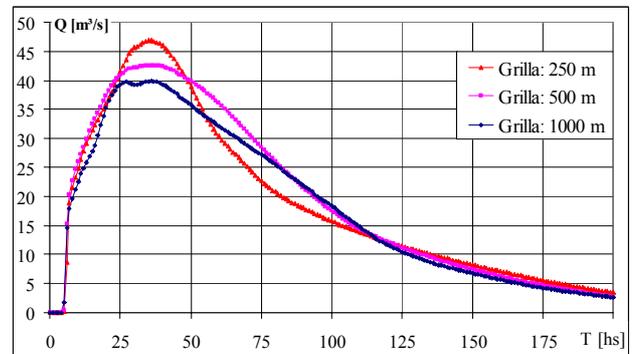


Figura 4.- Hidrograma de la descarga del canal Ibarlucea en el A° Ludueña para el evento E 1.

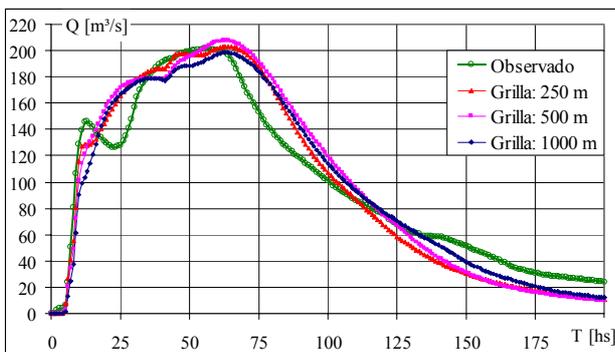


Figura 5.- Hidrograma correspondiente a la sección de control para el evento E 2.

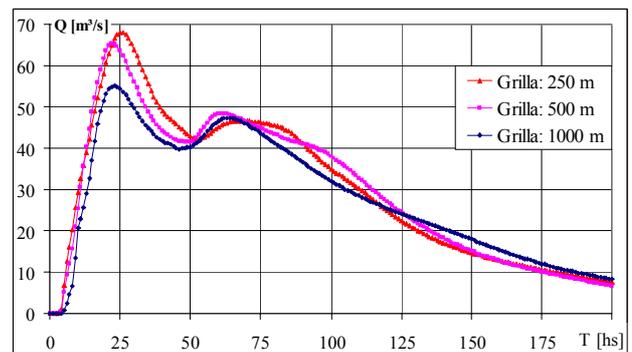


Figura 6.- Hidrograma de la descarga del canal Ibarlucea en el A° Ludueña para el evento E 2.

Cuenca del canal Santa Teresa

La cuenca se encuentra ubicada al sur de la provincia de Santa Fe (Argentina), a unos 60 km. de la ciudad de Rosario. Tiene un área de aproximadamente 14 Km² y una pendiente media del 0.17 % (Figura 7). Es atravesada por un canal artificial construido para evitar el anegamiento del área urbana. Esta cuenca se constituyó con tres tamaños de grilla cuadrada: 100 (TG₁₀₀), 200 (TG₂₀₀) y 400 m (TG₄₀₀) de lado. En la tabla 5 se detallan las características resultantes de las diferentes discretizaciones y en la figura 8 se muestra la representación de la cuenca para TG₁₀₀.

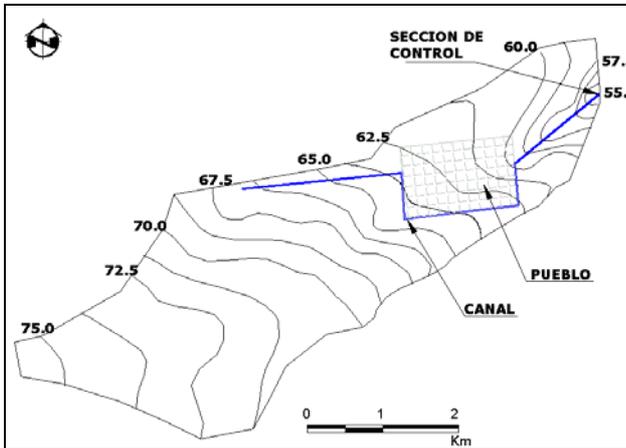


Figura 7.- Cuenca del Canal Santa Teresa.

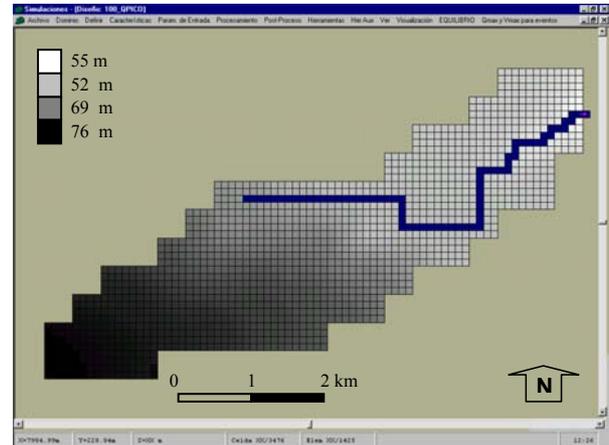


Figura 8.- Cuenca Discretizada con un TG₁₀₀.

Tabla 5.- Principales características de la cuenca de Santa Teresa según los diferentes tamaños de la grilla.

Tamaño de Grilla [m]	Area [Km ²]	Long. Total Cursos [Km]	Cant. de Total Celdas	Cant. Total de Vinculaciones	Pend. Media [%]
100	14.24	6.80	1424	2729	1.73
200	14.24	6.80	356	653	1.72
400	14.24	6.80	89	149	1.71

La discretización de mayor nivel de detalle corresponde a un tamaño de grilla de 100 m (TG₁₀₀) y los tamaños de grilla de 200 (TG₂₀₀) y 400 m (TG₄₀₀) constituyen las discretizaciones de menor nivel de detalle. Para TG₁₀₀ el valor del coeficiente de resistencia del valle (nv) es de 0.100; para los cursos (nc) de 0.040 y el valor de la pendiente transversal de almacenamiento (ita) de 0.08. En esta cuenca se aplicó la misma metodología que la utilizada en la cuenca del A° Ludueña. Bajo condiciones de equilibrio completo las intensidades de lluvia neta consideradas fueron de 2; 6; y 10 mm/h, generando un caudal de equilibrio en la sección de control de 7.8; 23.3; 38.9 m³/s respectivamente. Para TG₂₀₀ y TG₄₀₀ se obtuvieron los valores del coeficiente de resistencia del valle (nv), de los cursos (nc) y el valor de la pendiente transversal de almacenamiento (ita) para las intensidades consideradas que maximizan la suma de los coeficientes R²_{Qe} y R²_{Ve} según ec. [1] para obtener respuestas hidrológicas similares entre los diferentes niveles de detalle. En la tabla 6 se detallan los resultados.

Tabla 6.- Resumen de los valores del coeficiente R²_{Qe} y R²_{Ve} al pasar de TG₁₀₀ a TG₂₀₀ y de TG₁₀₀ a TG₄₀₀.

TG _x [m]	Intensidad [mm/h]	nv	nc	ita	R ² _{Qe}	R ² _{Ve}	Suma R ²
200	2.00	0.120	0.050	0.08	0.997	0.904	1.901
200	6.00				0.999	0.911	1.910
200	10.0				0.999	0.911	1.910
400	2.00	0.155	0.055	0.08	0.981	0.638	1.619
400	6.00				0.991	0.667	1.660
400	10.0				0.993	0.688	1.680

A partir de los valores de los parámetros obtenidos (nv, nc e ita) para TG₂₀₀ y TG₄₀₀ bajo condiciones de equilibrio completo, se corrieron eventos hipotéticos con intensidades de lluvia neta de 3; 8 y 15 mm/h y las duraciones de 3, 5 y 10 hs. La comparación en términos de caudal pico y volumen máximo en todo el dominio de la cuenca entre TG₁₀₀ y TG₂₀₀ y entre TG₁₀₀ y TG₄₀₀ se detallan en la tabla 7 y 8 respectivamente. Asimismo se muestran los errores porcentuales del caudal pico en la sección de control para las distintas discretizaciones.

Tabla 7.- Caudales picos en la sección de control, R^2_{Qp} y R^2_{Vmax} para diferentes eventos entre TG₁₀₀ y TG₂₀₀.

Evento simulado	Int. Lluvia neta [mm/h]	Dur. [hs]	Qp TG ₁₀₀ [m ³ /s]	Qp TG ₂₀₀ [m ³ /s]	Dif. Qp [%]	R^2_{Qp} [-]	R^2_{Vmax} [-]	Suma R^2 [-]
E 1	3	3	1.7	1.6	-1.4	0.997	0.892	1.889
E 2	8	3	7.2	7.2	0.0	0.998	0.895	1.893
E 3	15	3	18.4	18.0	-2.1	0.998	0.892	1.890
E 4	3	5	3.9	3.9	-1.9	0.998	0.900	1.898
E 5	8	5	15.8	15.8	0.2	0.998	0.905	1.903
E 6	15	5	36.2	36.4	0.4	0.999	0.907	1.906
E 7	3	10	8.6	8.7	0.9	0.998	0.909	1.907
E 8	8	10	27.8	27.9	0.5	0.999	0.912	1.911
E 9	15	10	55.7	54.1	-2.9	0.999	0.903	1.902

Tabla 8.- Caudales picos en la sección de control, R^2_{Qp} y R^2_{Vmax} para diferentes eventos entre TG₁₀₀ y TG₄₀₀.

Evento simulado	Int. Lluvia neta [mm/h]	Dur. [hs]	Qp TG ₁₀₀ [m ³ /s]	Qp TG ₄₀₀ [m ³ /s]	Dif. Qp [%]	R^2_{Qp} [-]	R^2_{Vmax} [-]	Suma R^2 [-]
E 1	3	3	1.7	1.6	-6.1	0.986	0.727	1.713
E 2	8	3	7.2	6.9	-3.9	0.992	0.705	1.697
E 3	15	3	18.4	17.6	-4.4	0.993	0.699	1.692
E 4	3	5	3.9	3.7	-6.5	0.990	0.730	1.720
E 5	8	5	15.8	15.1	-4.5	0.993	0.721	1.714
E 6	15	5	36.2	34.9	-3.5	0.994	0.715	1.709
E 7	3	10	8.6	8.4	-2.8	0.992	0.723	1.715
E 8	8	10	27.8	27.0	-2.6	0.994	0.701	1.695
E 9	15	10	55.7	54.1	-2.9	0.995	0.730	1.725

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis de los resultados bajo condiciones de equilibrio completo.

El análisis bajo condiciones de equilibrio completo en la cuenca (tablas 2 y 6) indica que para obtener respuestas hidrológicas similares en términos de volúmenes y caudales de equilibrio en todo el dominio de la cuenca, al pasar de un tamaño de grilla dado a otro mayor, se debe incrementar el coeficiente de resistencia del valle y de los cursos. Se observa, además, que al aumentar la intensidad de la lluvia se produce un aumento de la suma de los coeficientes R^2_{Ve} y R^2_{Qe} ; es decir, un mejor ajuste en términos de caudal y volumen de equilibrio entre las diferentes discretizaciones.

En una misma cuenca a medida que se produce una mayor agregación (por ejemplo al pasar de TG₂₅₀ a TG₅₀₀ y de TG₂₅₀ a TG₁₀₀₀ en la cuenca del A° Ludueña, tabla 2) se observa que la suma de R^2_{Ve} y R^2_{Qe} disminuye y los valores de los coeficientes de resistencia del valle y de los cursos aumenta. Lo anterior se relaciona directamente con la cantidad de información agregada.

En la cuenca de Santa Teresa se logra un mejor ajuste en términos de la suma de R^2_{Ve} y R^2_{Qe} ; es decir, mejores representaciones de las respuestas hidrológicas entre los diferentes tamaños de la grilla; en comparación con la cuenca del A° Ludueña. Lo anterior se explica por la gran diferencia entre el área de ambas cuencas (la cuenca de Santa Teresa tiene un área 50 veces menor que la del A° Ludueña); conjuntamente con el hecho de que la primera no tiene grandes almacenamientos naturales y/o artificiales, comparado con la cuenca del A° Ludueña que posee numerosos terraplenes carreteros y

ferroviarios que actúan como verdaderas barreras en zonas de llanura y secciones de paso puntuales como ser alcantarillas y puentes; estas restricciones al libre traslado del flujo generan una dinámica de escurrimiento más compleja que en el caso de la cuenca de Santa Teresa.

Análisis de los resultados para eventos históricos e hipotéticos.

Los parámetros resultantes del ajuste bajo condiciones de equilibrio completo y utilizados para eventos hipotéticos y observados en ambas cuencas arrojan como resultado un muy buen ajuste en términos de la reproducción del caudal pico en la sección de control al comparar la discretización de mayor nivel de detalle con las de menores niveles de detalle (tablas 3 y 4 para A° Ludueña y tablas 7 y 8 para Santa Teresa).

Se obtienen valores de $R^2_{Q_e}$ y $R^2_{V_e}$ de las mismas magnitudes y con las mismas tendencias generales que las obtenidas bajo condiciones de equilibrio completo; indicando de esta forma que la dinámica de almacenamiento y transferencia de escurrimiento bajo condiciones de equilibrio completo se mantienen en gran medida para los eventos analizados; es decir, bajo condiciones de equilibrio parcial en la cuenca. Según lo anterior las observaciones y el análisis de resultados hecho bajo condiciones de equilibrio completo son válidas para el equilibrio parcial en la cuenca.

CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizaron diferentes niveles de detalle (a través de la modificación del tamaño de la grilla) para el modelado matemático de escurrimiento superficial en cuencas de llanura con la finalidad de obtener respuestas hidrológicas similares al producirse la agregación del sistema a modelar; utilizando para tal fin un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasi-2D. La premisa se ha logrado calibrando el coeficiente de resistencia del valle, de los cursos y la forma de almacenamiento de la celda para las discretizaciones de menores niveles de detalle (mayor tamaño de la grilla). Se ha utilizado el concepto de equilibrio completo en la cuenca y se compararon entre los diferentes niveles de detalle los caudales transferidos entre celdas y el volumen almacenado en las mismas en todo el dominio de la cuenca aplicando, para tal caracterización, el coeficiente de eficiencia R^2 de Nash–Sutcliffe.

Los resultados indican que al producirse la agregación del sistema a modelar; es decir, al pasar de un alto nivel de detalle a otros niveles de detalle menores se deben aumentar los valores de los coeficientes de resistencia del valle y de los cursos, manteniéndose la forma de almacenamiento en la celda, para obtener respuestas hidrológicas similares entre las distintas discretizaciones; analizado bajo condiciones de equilibrio completo en la cuenca. A medida que el grado de agregación aumenta (es decir, se “pierde” mayor cantidad de información en la representación del sistema), disminuye el grado de ajuste para obtener respuestas hidrológicas similares y además es necesario incrementar el valor de los coeficientes de resistencia (del valle y de los cursos) para compensar el efecto de la agregación. Sin embargo no puede considerarse que en todos los casos el coeficiente de resistencia represente sólo la física de la rugosidad. Partiendo del supuesto que el parámetro de resistencia es más representativo de la física de la rugosidad para los menores tamaños de la grilla, puede concluirse que para los tamaños mayores de grilla el parámetro de resistencia representa la rugosidad de la superficie (igual en todo tamaño de grilla) y relaciones de escaleo de los mecanismos de escurrimiento superficial. Se evidencia una relación entre el parámetro de resistencia y el nivel de detalle modelado, ratificándose el concepto investigado previamente por Pedraza et. al. (2005a y 2005b) y por Molnár and Julien (2000).

Se logran mejores resultados a la hora de obtener respuestas hidrológicas similares para diferentes niveles de detalle en cuencas rurales pequeñas (Santa Teresa), con cortas longitudes de escurrimiento, donde no se observan grandes almacenamientos (naturales o artificiales) y con predominancia de flujo

de tipo cinemático; en comparación con grandes cuencas (A° Ludueña), con dinámica de escurrimiento más complejo; con grandes almacenamientos y restricciones al escurrimiento debido a la presencia de alcantarillas y puentes.

Los parámetros obtenidos del análisis bajo condiciones de equilibrio para obtener respuestas hidrológicas similares entre diferentes niveles de detalle y aplicados a eventos hipotéticos y observados han logrado reproducir apropiadamente los caudales pico en la sección de control de la cuenca para las diferentes discretizaciones; resultando éstos en la totalidad de los casos analizados inferiores al 15 %, encontrándose la gran mayoría con valores menores al 10 % comparados con los respectivos caudales de la discretización de mayor nivel de detalle.

La similitud en las tendencias y magnitudes de los valores de R^2_{Qe} y R^2_{Ve} , para condiciones de equilibrio completo en la cuenca y para eventos (equilibrio parcial), indican que se mantiene la dinámica de almacenamiento y transferencia de caudal entre ambos estados si se calibran adecuadamente los parámetros de las diferentes discretizaciones.

La utilidad de lograr niveles de detalles menores que reproduzcan la respuesta hidrológica de una determinada cuenca, tiene como ventaja que permite manejar menor cantidad de información; de requerir menores tiempos de procesamiento y cálculo del modelo matemático; de requerir tamaños de archivos más pequeños y de permitir compatibilizar escalas de otros procesos, no sólo de índole hidrológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cazenave, G.; Dalponte, D.; Rentarúa, J. P.; Rinaldi, P.; Stenta, H.; Varni, M.; Vives, L.; Clause, A.; Riccardi, G.; Venere, M. (2005). "Modelación numérica del escurrimiento superficial: aplicación de modelos agregados y distribuidos en la cuenca del arroyo del Azul." XX° Congreso Nacional del Agua y III° Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza, Argentina.

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.

Nash, J. and Sutcliffe, J. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, I-A discussion of principles." Journal of Hydrology 10, 282-290.

Pedraza, R.; Gómez Valentín, M.; Reyna, S. (2005a). "Un procedimiento de agregación de esquemas de modelación basado en relaciones de similitud hidrológica-Parte1." XX° Congreso Nacional del Agua y III° Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza, Argentina.

Pedraza, R.; Gómez Valentín, M.; Reyna, S. (2005b). "Un procedimiento de agregación de esquemas de modelación basado en relaciones de similitud hidrológica-Parte2." XX° Congreso Nacional del Agua y III° Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza, Argentina.

Riccardi, G. (2000). *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. Tesis Doctoral, FCEFYN, UNC, Córdoba, Argentina.

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.

Stenta, H. y Riccardi, G. (2004). "Análisis del efecto del tamaño de la grilla en el modelado del escurrimiento superficial en cuencas de llanura"XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil.

Stenta, H.; Rentería, J. P.; Riccardi, G. (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, Argentina.