

XXIº CONGRESO NACIONAL DEL AGUA 2007

TUCUMÁN, 15 AL 19 DE MAYO DE 2007

COMPARACION DE RESPUESTAS HIDROLÓGICAS APLICANDO UN MODELO MATEMATICO DISTRIBUIDO PARA DIFERENTES TAMAÑO DE GRILLA

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

(1) Becario Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

(2) Investigador Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario (CIUNR)

(3) Investigador Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

(4) Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (U.N.R.)

Riobamba 245 bis (2000) Rosario, Argentina.-Telefax: +54+341-4808541 – e-mail: hstenta@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Los modelos matemáticos de parámetros distribuidos resultan particularmente apropiados para determinar la variabilidad espacial y temporal de las respuestas hidrológicas dentro de un determinado sistema hídrico; resultando esto de suma utilidad para, entre otras cosas, la determinación de zonas con riesgo de inundación; planificación y gestión de los recursos hídricos; modificaciones de las respuestas por acciones antrópicas. En una misma cuenca es posible realizar la constitución de un modelo con diferentes niveles de detalle en función principalmente de la disponibilidad de información de entrada necesaria, de los objetivos y de los requerimientos del modelado del sistema. En el presente trabajo se realiza la comparación entre las respuestas hidrológicas establecidas en modelaciones con los diferentes niveles de detalle en que se ha discretizado espacialmente una cuenca de llanura. La comparación se realizó en términos de las variables hidráulicas: caudal máximo, velocidad de flujo máxima y altura máxima, simulando una serie de eventos históricos y eventos hipotéticos. Para ello se utilizó el concepto de estado de equilibrio completo en la cuenca y bajo estas condiciones se calibraron separadamente los coeficientes de resistencia (del valle y de los cursos) y la geometría de la función de almacenamiento de la celda para las discretizaciones de menor nivel de detalle. Para la comparación de las respuestas hidrológicas se utilizó el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Los resultados indican que se obtiene mayor similitud en la respuesta hidrológica; fundamentalmente en términos de alturas máximas de agua en celda; calibrando la geometría de almacenamiento de la celda en comparación con la calibración de los parámetros de resistencia del valle y de los cursos. El efecto de obtener respuestas hidrológicas similares entre diferentes niveles de detalle implica reducir la cantidad de información de entrada y el tiempo de cálculo y procesamiento al permitir implementar discretizaciones menos detalladas y sobre las cuales se obtienen respuestas hidrológicas similares a la de mayor nivel de detalle.

Palabras Clave: cuencas de llanura, modelación matemática distribuida, niveles de detalle.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de parámetros distribuidos intentan cuantificar la variabilidad hidrológica que ocurre en un rango de escalas por medio de la división de la cuenca en un número de unidades. Estas unidades son llamadas de diferentes formas: unidades de respuesta hidrológica; subcuencas o elementos de grilla. En tal aproximación, los procesos con una longitud de escala menor que el tamaño de la grilla son representados implícitamente (parametrizados) mientras que los procesos con longitudes de escala mayores que el tamaño de la grilla son representados explícitamente a través de las variaciones entre los diferentes elementos que componen la cuenca. En general los modelos de parámetros distribuidos representan fenómenos locales con considerable detalle; mientras que la variabilidad dentro del elemento es despreciada. (Blöschl y Sivapalan, 1995)

Debido a las características propias de los modelos de parámetros distribuidos, una misma cuenca puede ser constituida con diferentes niveles de detalle o discretizaciones espaciales; lo anterior está relacionado principalmente con la cantidad y calidad de la información de entrada disponible; con los objetivos buscados y con los requerimientos del modelado.

La subdivisión de la cuenca en elementos de grilla representa una abstracción de la superficie de la cuenca real y de sus propiedades hidrológicas relevantes. Un punto que debe ser abordado por cualquier usuario de estos modelos antes de su aplicación es la definición de un aceptable nivel y tipo de discretización de la cuenca. (Goodrich, et. al. 2003)

Numerosos trabajos han abordado la temática en relación a la agregación del sistema a modelar; produciendo lo anterior diferentes escalas de modelación de un mismo sistema hidrológico. Así se tienen diferentes representaciones de la topografía de una cuenca; se modifica la red de drenaje; y se generan datos de entradas y parámetros con diferentes niveles de agregación. Lo anterior ocupa todo el rango de sistemas posibles de modelar; desde una pequeña cuenca urbana de pocas hectáreas a una cuenca de varios miles de kilómetros cuadrados.

Shrestha, et. al. (2006) estudiaron la sensibilidad en la respuesta de un modelo hidrológico debido a cambios en la escala de los datos de entrada. Ellos utilizaron un modelo hidrológico distribuido basado en una macro grilla y aplicado sobre cuencas de 132350 km²; 29844 km² y 2093 km², con resoluciones de datos de entrada desde 10 minutos a 2.5°. Evaluaron la respuesta del modelo a través de la comparación de hidrogramas observados e hidrogramas calculados. Utilizaron el concepto de relación IC, definido como la relación entre la resolución de la grilla de entrada y el área de la cuenca. Los coeficientes evaluados para cuantificar las respuestas fueron, entre otros, Momento de Correlación de Pearson y coeficiente de Nash-Sutcliffe. Ellos concluyen que el modelo produce buenos resultados con resoluciones de datos de entrada más finas y que una buena respuesta se logra con relaciones IC de 1:10 o mayores; lo cual permite seleccionar una escala para el modelado de cuencas no aforadas. Además encontraron que las cuencas más pequeñas resultan más sensibles que las cuencas mayores indicando que se debe prestar especial atención en el modelado de las primeras.

Haile y Rientjes (2005) estudiaron los efectos del “resamplero” (agregación espacial de datos) en la simulación hidrológica utilizando un modelo digital de elevación (MDE) de alto nivel de detalle de la ciudad de Tegucigalpa obtenido a partir de datos LIDAR. La resolución espacial de los datos de origen fue de 1.5 m; agregando posteriormente dicha información hasta valores de 15 m de tamaño de grilla. A partir del análisis de sensibilidad de la resolución del MDE ellos concluyen que la representación topográfica es crítica y que los resultados del modelo son afectados significativamente por la resolución del MDE. Las características del flujo afectadas son la

extensión de las áreas inundadas y la velocidad, profundidad y patrones de flujo en el dominio del modelo.

El objetivo del presente trabajo es analizar las modificaciones en la representación de las características generales del terreno que se presentan al modelar un determinado sistema hídrico con diferentes niveles de detalle de resolución espacial y a su vez se comparan las respuestas hidrológicas en términos de caudales, velocidades de flujo y alturas de agua máximas en todo el dominio de definición de la cuenca entre las diferentes discretizaciones ajustando los coeficientes de resistencia (del valle y de los cursos), por un lado, y la geometría de almacenamiento en celda por el otro.

Las comparaciones se realizan asumiendo que la discretización de menor tamaño de grilla (mayor nivel de detalle) es la que representa más fielmente la dinámica de escurrimiento dentro de la cuenca y por lo tanto se toma dicha discretización como base para la comparación de las respuestas hidrológicas de las restantes discretizaciones asociadas a tamaños de grilla mayores.

El presente trabajo constituye un grado de avance sobre trabajos anteriores (Stenta y Riccardi, 2005; Stenta, et. al, 2006) abordando la temática del análisis de los efectos del tamaño de grilla en el modelado del escurrimiento superficial en cuencas de llanura.

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS

El estudio se ha llevado a cabo sobre la cuenca del A° Ludueña, ubicada en la región sur de la provincia de Santa Fe en un relieve de escasa pendiente. Esta cuenca se ha discretizado con diferentes niveles de detalle de resolución espacial; con tamaños de grilla cuadrada de 250 m, 500 m y 1000 m de lado. La modelación hidrológica – hidráulica se realiza por medio de la implementación del modelo matemático cuasi 2-D tipificado CTSS8 (Riccardi, 2000); el mismo está basado en esquemas de celdas con aproximación de onda difusiva; de calidad probada en la región. 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 geometría de almacenamiento en celdas del valle y para el sector del valle de las celdas río (Riccardi et. al., 2002). Se utiliza el concepto de estado de equilibrio completo en la cuenca y se evalúa el almacenamiento de equilibrio dentro de la misma. Posteriormente se calibran para las discretizaciones de menor nivel de detalle los parámetros de resistencia del valle y cursos, por un lado; y la geometría de almacenamiento en celdas por el otro, de modo de mantener dicho almacenamiento en todas las discretizaciones. A partir de los parámetros ajustados según las condiciones anteriormente descritas se simulan una serie de eventos observados e hipotéticos y se comparan las respuestas hidrológicas entre las diferentes discretizaciones.

ESTUDIO SOBRE LA CUENCA DEL ARROYO LUDUEÑA

La cuenca del A° Ludueña se encuentra situada entre los paralelos 32° 45' S y 33° 08' S y los meridianos 61° 04' O y 60° 39' O (Figura 1); perteneciendo a la provincia de Santa Fe, República Argentina. La misma encierra parte de la ciudad de Rosario y otras poblaciones de los alrededores. Su área de aporte es de 700 Km² y la elevación varía entre 70 m y 18 m sobre el nivel del mar. Su pendiente media es del orden del 0.11 %. La red hídrica principal está constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan

numerosos y pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales que aportan al escurrimiento. Por otra parte, la región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios, lo que permite observar una fuerte acción antrópica ejercida sobre la cuenca. La sección de control corresponde al cruce del arroyo Ludueña con un gran puente carretero.

El modelo digital del terreno se obtuvo a partir de la vectorización de planos con curvas de nivel del Instituto Geográfico Militar (IGM); posteriormente se procedió a la interpretación e impresión en archivo ASCII de los vectores de curvas generados; con lo que se obtienen una grilla “amorfa” o irregular de puntos; finalmente estos datos fueron procesados para generar una grilla regular de acuerdo a las distintas discretizaciones realizadas aplicando el algoritmo de Kriging para interpolación de los datos.

La cuenca se constituyó con tres tamaños de grilla (TG) cuadrangular de lado: 250 m (TG250) (mayor nivel de detalle), 500 m (TG500) y 1000 m (TG1000). En la tabla 1 se resumen las características más relevantes para las tres discretizaciones adoptadas. En la Figura 2.a y 2.b se muestra la discretización de la cuenca para un tamaño de grilla de 250 m y 1000 m, respectivamente.

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 0.11 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: Características generales resultantes de las discretizaciones de la Cuenca del A° Ludueña.

Tamaño de grilla [m]	Área [Km ²]	Pend. Long. Media [%]	Longitud Cursos [Km]	Densidad de Drenaje [1/Km]	Cantidad de Celdas	Celdas Valle	Celdas Río	Cant. total de Vinculaciones
250	700	1.14	127	0.181	11200	10694	506	22093
500	700	1.14	125	0.179	2800	2551	249	5447
1000	700	1.14	123	0.176	700	578	122	1324

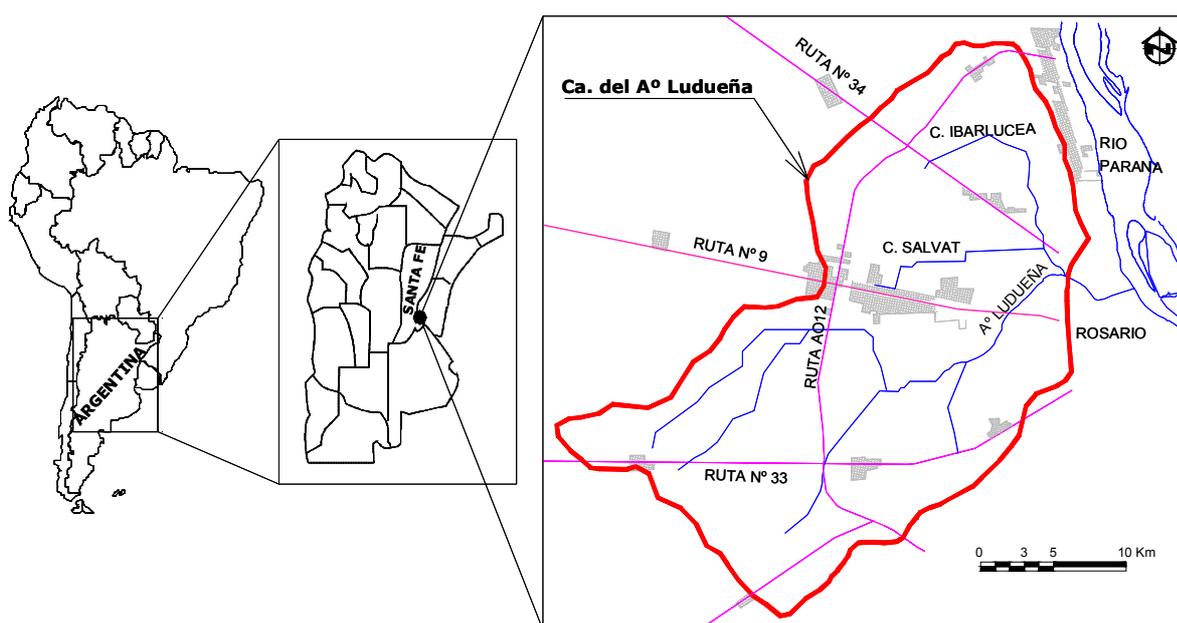


Figura 1. Cuenca del A° Ludueña. (Santa Fe, Argentina)

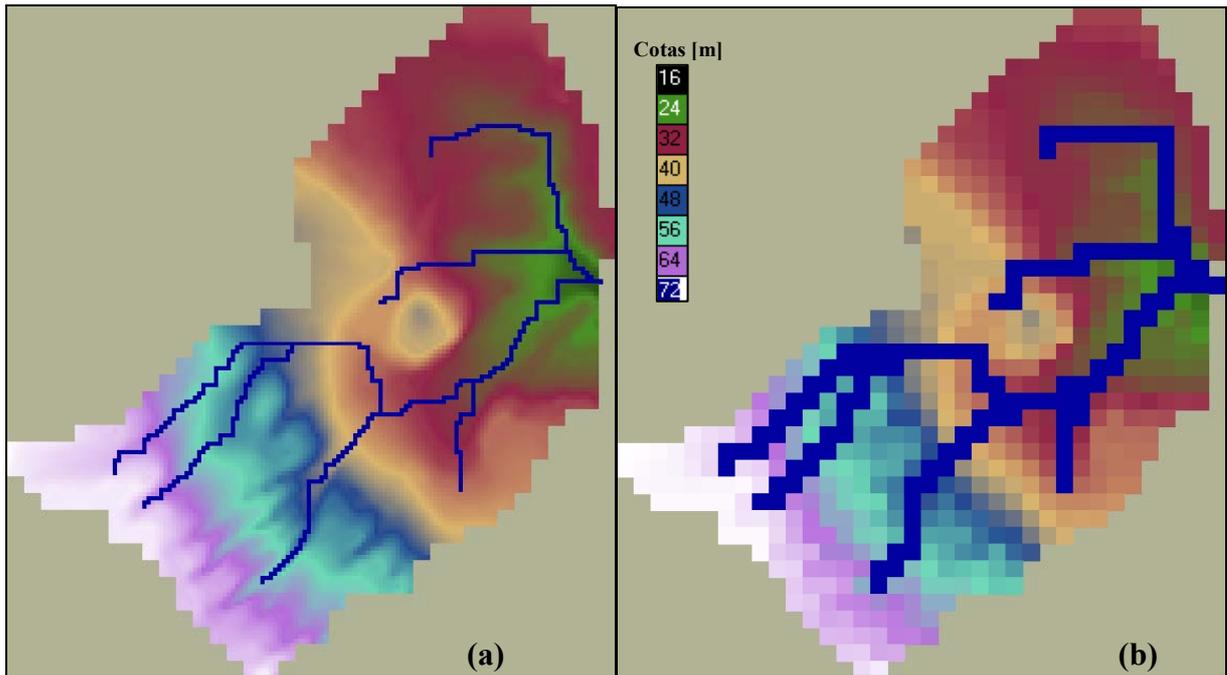


Figura 2. Discretización y relieve de la cuenca para: a) TG 250 m; b) TG 1000 m.

Como resultado del modelado de la cuenca con diferentes niveles de detalle se obtienen características propias en la representación de la topografía. Los valores máximos, medios, mínimos y el desvío estándar para las cotas y las pendientes locales se resumen en la Tabla 2. Las figuras 3.a y 3.b muestran la distribución espacial sobre el dominio de la cuenca de las pendientes locales para los tamaños de grilla TG 250 m y TG 1000 m; respectivamente.

Tabla 2. Características en la representación de la topografía de la cuenca para los diferentes tamaños de grilla.

	COTAS [m]		
	TG 250	TG 500	TG 1000
Mínima	16.12	17.00	17.00
Máxima	71.29	71.00	70.46
Media	39.77	39.78	39.75
Desv. Stand.	14.92	14.96	14.99
$\Delta Z (Z_{\max} - Z_{\min})$	55.17	54.00	53.46
	PENDIENTES LOCALES [%o]		
	TG 250	TG 500	TG 1000
Mínima	0.00	0.00	0.00
Máxima	16.48	14.26	12.15
Promedio	2.37	2.13	1.90
Desv. Stand.	1.90	1.74	1.47

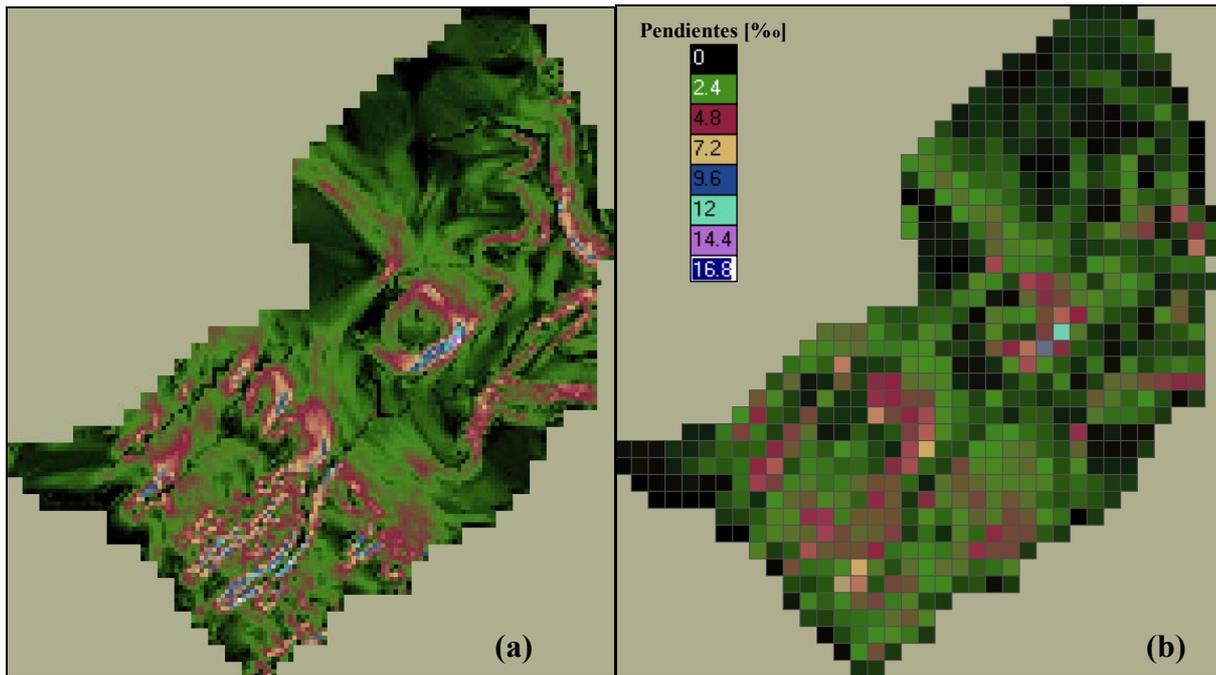


Figura 3. Distribución espacial de pendientes locales: a) TG 250; b) TG 1000 m.

Partiendo de la discretización TG250 (mayor nivel de detalle) con sus parámetros ya calibrados; se simuló una lluvia neta de 0.5 mm/h y de larga duración distribuida uniformemente sobre toda la cuenca de modo de lograr un estado de equilibrio completo en la misma. Bajo estas condiciones se obtiene el almacenamiento de equilibrio en la cuenca; el cual depende de la intensidad de la lluvia y de las características propias de la cuenca.

Para las demás discretizaciones (TG500 y TG1000) se simuló la misma lluvia neta de 0.5 mm/h de modo de lograr el estado de equilibrio completo en la cuenca y se ajustaron los parámetros de resistencia del valle (nv) y de los cursos (nr); por un lado; y la pendiente transversal de almacenamiento (ita) por el otro, de modo de ajustar el almacenamiento de equilibrio correspondiente a la discretización TG250. En la tabla 3 se muestran los valores de los parámetros ajustados bajo las consideraciones anteriores.

Tabla 3. Ajuste de parámetros (nv, nr e ita) para TG500 y TG1000 manteniendo el almacenamiento de equilibrio de TG250 para 0.5 mm/h.

	TG 250	TG500		TG1000	
		TG500a ^(*)	TG500b ^(*)	TG1000a ^(*)	TG1000b ^(*)
nv (resistencia valle)	0.110	0.145	0.110	0.160	0.110
nv (resistencia curso)	0.040	0.050	0.040	0.060	0.040
Ita	0.020	0.020	0.010	0.020	0.0085
Almac. de Equil [Hm³]	22.07	22.04	21.78	22.37	22.11
Error Porc. [%]	-	-0.14	-1.31	1.36	0.18

(*) El caso **a**, tanto para TG500 y TG1000, corresponde a la modificación de los coeficientes de resistencia del valle y de los cursos e igual valor de ita que para TG250; el caso **b** corresponde a la modificación de ita para TG500 y TG1000 y coeficientes de resistencia iguales a los de TG250.

A partir de los parámetros ajustados de nv, nr (TG500a y TG1000a) e ita (TG500b y TG1000b) bajo condiciones de equilibrio completo sobre la base de mantener en la cuenca el mismo almacenamiento de equilibrio que el correspondiente a la discretización de TG250, se

simularon una serie de eventos observados e hipotéticos. Estos últimos para duraciones de lluvia de 3 hs, 5 hs y 10 hs e intensidades de lluvia neta de 3 mm/h, 8 mm/h y 15 mm/h; con lo que se tiene un total de 9 eventos. Los eventos anteriores se simularon para la discretización de mayor nivel de detalle (TG250) y para TG500a, TG500b, TG1000a y TG1000b. En total se tienen 55 simulaciones realizadas.

Tabla 4. Características de los eventos simulados.

Evento simulado	Intens. lluvia neta [mm/h]	Duración [hs]	Lluvia Neta [mm]
E 1 (Obs)	27 (máx.)	30	38
E 2 (Obs)	28 (max.)	60	107
E 3	3	3	9
E 4	8	3	24
E 5	15	3	45
E 6	3	5	15
E 7	8	5	40
E 8	15	5	75
E 9	3	10	30
E 10	8	10	80
E 11	15	10	150

(Obs) Corresponde a eventos observados, los restantes son eventos hipotéticos.

Para la comparación de las respuestas hidrológicas entre las dicretizaciones TG500 y TG1000 con TG250 se utilizó el coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970), ecuación (1). La comparación se realizó sobre todo el dominio de definición de la cuenca en términos de las variables de flujo de caudal máximo (Q) y velocidad máxima (Vel) entre vinculaciones y altura de agua máxima (H) en celdas.

$$R^2_X = \frac{\sum_{i=1}^N (D_{\text{detalle}_i} - \bar{D}_{\text{detalle}_i})^2 - \sum_{i=1}^N (D_{\text{detalle}_i} - D_{\text{agregado}_i})^2}{\sum_{i=1}^N (D_{\text{detalle}_i} - \bar{D}_{\text{detalle}_i})^2} \quad (1)$$

Donde:

R^2_X : Coeficiente de Nash-Sutcliffe entre TG250 (detalle) y TG500 (agregado) y entre TG250 y TG1000 (agregado); X indica la variable de flujo sobre la que se realiza el cálculo: X = Q, Vel o H.

N: Cantidad de vinculaciones para el cálculo de R^2_Q y R^2_{vel} , y cantidad de celdas para el cálculo de R^2_H , del esquema agregado (TG500 y TG1000).

D_{detalle_i} : Valor de la variable Q, Vel. o H de la discretización de mayor nivel de detalle (TG250).

$\bar{D}_{\text{detalle}_i}$: Valor medio de las variables Q, Vel. o H de la discretización de mayor nivel de detalle (TG250).

D_{agregado_i} : Valor de la variable Q, Vel. o H del esquema agregado (TG500 y TG1000).

Como resultado de la aplicación de la formulación anterior (ec.1) para los diferentes eventos planteados (E1 a E11) se obtienen los valores de los coeficientes R^2_X que se resumen en la tabla 5. Allí mismo se presenta la suma de dichos coeficientes. Suponiendo un peso igual para cada coeficiente, los valores mayores de la suma corresponden a las mejores correspondencias entre la discretización de mayor nivel de detalle y el esquema agregado. Una correspondencia perfecta corresponde a un valor de $R^2_X = 1$; y por ende la suma adquiere un valor máximo de Suma $R^2_X = 3$.

El subíndice *a* para TG500a y TG1000a corresponde a los sistemas agregados con valores de resistencia del valle y curso ajustados; en cambio el subíndice *b* para TG500b y TG1000b corresponde a los sistemas agregados con valores ajustados de la geometría de almacenamiento.

Tabla 5: Coeficientes R^2_Q , R^2_{Vel} y R^2_H para los diferentes eventos estudiados.

EVENTO E1				
	R^2_Q	R^2_{Vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{Vel} y R^2_H
TG500a	0.952	0.925	0.894	2.771
TG1000a	0.906	0.815	0.778	2.499
TG500b	0.952	0.948	0.960	2.860
TG1000b	0.938	0.901	0.954	2.793
EVENTO E2				
	R^2_Q	R^2_{Vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{Vel} y R^2_H
TG500a	0.939	0.896	0.869	2.704
TG1000a	0.861	0.754	0.712	2.327
TG500b	0.929	0.928	0.958	2.815
TG1000b	0.869	0.836	0.947	2.652
EVENTO E3				
	R^2_Q	R^2_{Vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{Vel} y R^2_H
TG500a	0.967	0.924	0.915	2.806
TG1000a	0.954	0.841	0.799	2.594
TG500b	0.964	0.942	0.957	2.863
TG1000b	0.948	0.907	0.935	2.790
EVENTO E4				
	R^2_Q	R^2_{Vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{Vel} y R^2_H
TG500a	0.967	0.919	0.894	2.780
TG1000a	0.940	0.825	0.762	2.527
TG500b	0.961	0.935	0.956	2.852
TG1000b	0.930	0.893	0.934	2.757
EVENTO E5				
	R^2_Q	R^2_{Vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{Vel} y R^2_H
TG500a	0.953	0.917	0.876	2.746
TG1000a	0.926	0.81	0.702	2.438
TG500b	0.950	0.935	0.954	2.839
TG1000b	0.895	0.875	0.916	2.686
EVENTO E6				
	R^2_Q	R^2_{Vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{Vel} y R^2_H
TG500a	0.970	0.926	0.913	2.809
TG1000a	0.957	0.833	0.806	2.596
TG500b	0.966	0.947	0.965	2.878
TG1000b	0.953	0.906	0.949	2.808
EVENTO E7				
	R^2_Q	R^2_{Vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{Vel} y R^2_H
TG500a	0.954	0.929	0.894	2.777
TG1000a	0.937	0.825	0.757	2.519
TG500b	0.952	0.945	0.963	2.860
TG1000b	0.930	0.889	0.945	2.764

Continuación Tabla 5. Coeficientes R^2_Q , R^2_{vel} y R^2_H para los diferentes eventos estudiados.

EVENTO E 8				
	R^2_Q	R^2_{vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{vel} y R^2_H
TG500a	0.941	0.907	0.870	2.718
TG1000a	0.866	0.786	0.693	2.345
TG500b	0.938	0.938	0.961	2.837
TG1000b	0.837	0.858	0.937	2.632
EVENTO E 9				
	R^2_Q	R^2_{vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{vel} y R^2_H
TG500a	0.956	0.927	0.891	2.774
TG1000a	0.947	0.828	0.775	2.550
TG500b	0.958	0.943	0.955	2.856
TG1000b	0.950	0.880	0.944	2.774
EVENTO E 10				
	R^2_Q	R^2_{vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{vel} y R^2_H
TG500a	0.940	0.880	0.860	2.680
TG1000a	0.862	0.748	0.685	2.295
TG500b	0.936	0.896	0.948	2.780
TG1000b	0.865	0.816	0.931	2.612
EVENTO E 11				
	R^2_Q	R^2_{vel}	R^2_H	SUMA R^2_Q , R^2_{vel} y R^2_H
TG500a	0.915	0.861	0.819	2.595
TG1000a	0.716	0.681	0.545	1.942
TG500b	0.919	0.874	0.939	2.732
TG1000b	0.679	0.798	0.905	2.382

En la figura 4 se muestra la variación del coeficiente R^2_H en función del tamaño de la grilla para algunos de los eventos simulados (E1, E2, E3, E7 y E11) y para las discretizaciones de TG500 y TG1000 con valores de resistencia ajustados (subíndice a) y para la geometría de almacenamiento ajustada (subíndice b). Se asume un valor de $R^2_H = 1$ para el TG250 ya que el mismo es el menor tamaño de grilla adoptado. En la figura 5 se muestra la variación del coeficiente R^2_Q para los mismos eventos.

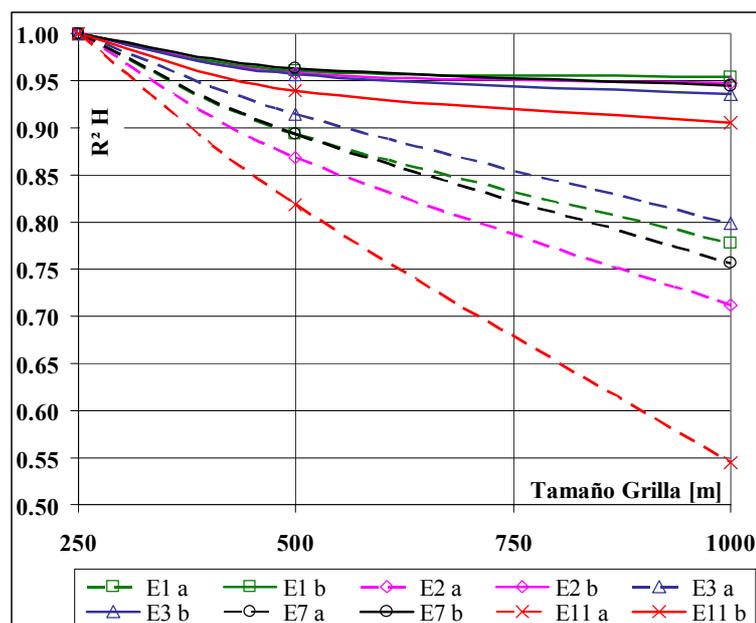


Figura 4: Variación del coeficiente R^2_H para los eventos E1, E2, E3, E7 y E11.

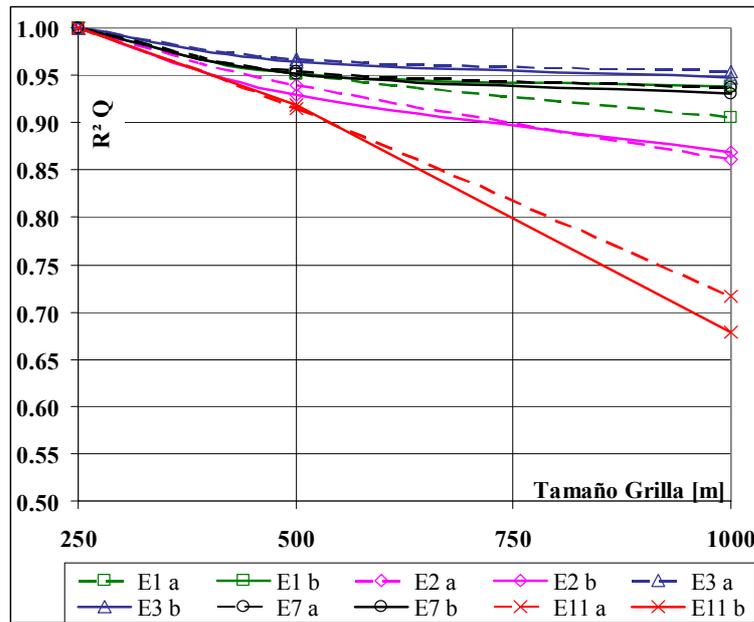


Figura 5: Variación del coeficiente R^2_Q para los eventos E1, E2, E3, E7 y E11.

A modo de ejemplo, en las figuras 6 y 7 (Evento E1 y E7 respectivamente) se presenta la correlación obtenida entre las alturas máximas de agua en la grilla de TG250 y las correspondientes a la grilla TG500, para el caso del ajuste de los coeficientes de resistencia (TG500a) y para el caso del ajuste de la geometría de almacenamiento (TG500b). En las figuras 8 y 9 se muestra la misma correlación en términos de caudales máximos para el evento E1 y E7, respectivamente.

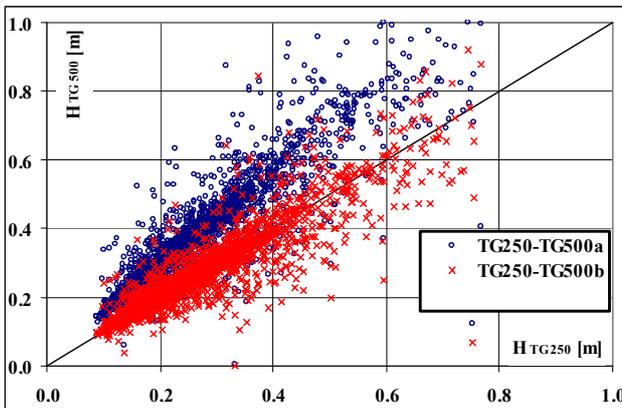


Figura 6: Correlación entre TG250 y TG500 en términos de alturas máximas para el evento E1.

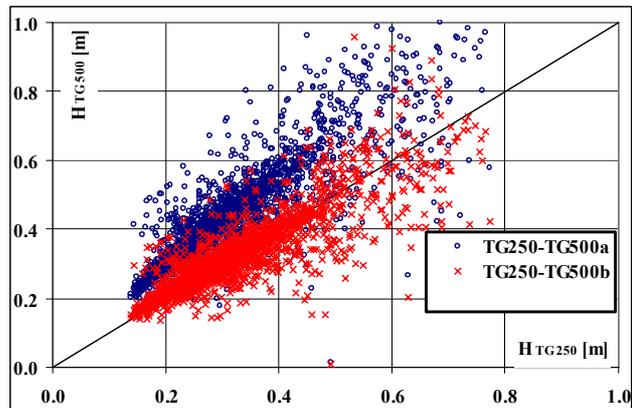


Figura 7: Correlación entre TG250 y TG500 en términos de alturas máximas para el evento E7.

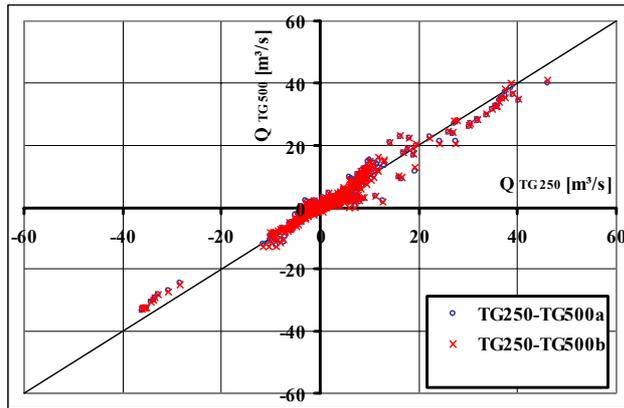


Figura 8: Correlación entre TG250 y TG500 en términos de caudales máximos para el evento E1.

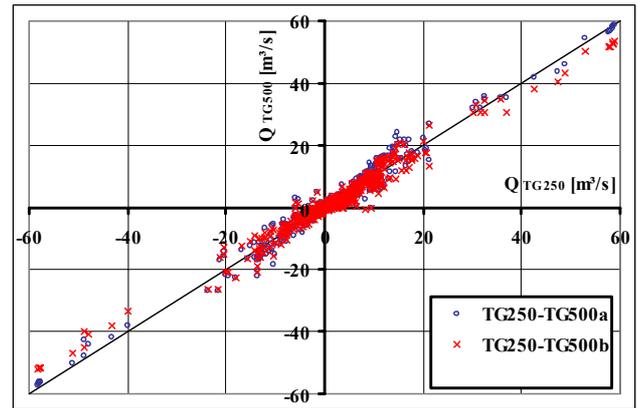


Figura 9: Correlación entre TG250 y TG500 en términos de caudales máximos para el evento E7.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En cuanto a las características de representación de la topografía se observa que a medida que el tamaño de la grilla aumenta se generan relieves más atenuados. Lo anterior se observa (Tabla 2) debido a que se obtienen pendientes locales máximas y valores medios menores a medida que aumenta el tamaño de la grilla. Asimismo se aprecia en la figura 3 la menor variación espacial de pendientes locales dentro de la cuenca para la discretización de mayor tamaño de grilla.

En general se obtienen valores de cotas máximas menores, cotas mínimas mayores; y por ende diferencias (ΔZ) menores a medida que aumenta el tamaño de la grilla; permaneciendo casi invariable el valor promedio de las cotas.

En cuanto a las respuestas hidrológicas, se observa en primera medida que resulta necesario incrementar los coeficientes de resistencia del valle y curso o bien disminuir el valor de la pendiente transversal de almacenamiento (ita) a medida que aumenta el tamaño de grilla para lograr reproducir el almacenamiento de equilibrio entre la discretización de mayor nivel de detalle y los esquemas agregados.

Se observa que en términos de caudales máximos y velocidades máximas sobre todo el dominio de definición de la cuenca el ajuste de los parámetros de resistencia (Caso a - Tabla 5) o de la pendiente transversal de almacenamiento (Caso b - Tabla 5) generan respuestas similares caracterizadas por medio del coeficiente de Nash-Sutcliffe (R^2_x) entre los diferentes niveles de detalle de la cuenca. Así, las tendencias encontradas a la hora de comparar Q_{max} y Vel_{max} no son significativamente diferentes debido al ajuste de los parámetros n_v y n_r ó ita. A modo de ejemplo en la figura 5 se muestra esta tendencia para 5 de los eventos estudiados en términos de Q_{max} . El valor mínimo de R^2_Q al agregar de TG250 a TG500 es de 0.915 (caso a) y 0.919 (caso b) y al agregar de TG250 a TG1000 es de 0.716 (caso a) y 0.679 (caso b). En términos de velocidades máximas el valor mínimo de R^2_{Vel} al agregar de TG250 a TG500 es de 0.861 (caso a) y 0.874 (caso b) y al agregar de TG250 a TG1000 es de 0.681 (caso a) y 0.798 (caso b). Todos los valores anteriores corresponden al evento E11 (Tabla 5).

Al comparar alturas máximas para diferentes niveles de detalle en todo el dominio de la cuenca se observa la mayor diferencia en términos del coeficiente R^2_H al ajustar parámetros de resistencia (Caso a) o pendiente transversal de almacenamiento (Caso b); lográndose con el ajuste de esta última los valores más altos de dicho coeficiente.

Lo anterior se observa en la figura 4, donde las líneas de trazo discontinuo corresponden a los valores de R^2_H para el caso a y las líneas continuas corresponden el caso b. Allí se observa una tendencia hacia valores de R^2_H más rápidamente decrecientes con el aumento del tamaño de la grilla como resultado del ajuste de n_v y n_r en comparación con los resultados logrados por el ajuste de i_{ta} . El valor mínimo de R^2_H al agregar de TG250 a TG500 es de 0.819 (caso a) y 0.939 (caso b) y al agregar de TG250 a TG1000 es de 0.545 (caso a) y 0.905 (caso b). Se observa la mayor diferencia en términos de R^2_H cuando se produce al agregamiento de TG250 a TG1000.

Para todos los eventos analizados se observa (a modo de ejemplo se muestran en las figuras 6 y 7 para E1 y E7) que el ajuste de parámetros de resistencia “genera” valores de alturas máximas mayores en el sistema agregado en comparación con el sistema de detalle. Lo anterior se explica partiendo de la base de que el volumen en cada celda del sistema agregado en comparación con el volumen en las celdas correspondientes al sistema de detalle se mantiene; de esta forma al ajustarse (disminuir) la pendiente transversal de almacenamiento en el sistema agregado se reproduce el mismo volumen con alturas menores, las cuales se correlacionan adecuadamente con las alturas en las celdas del sistema de detalle. En cambio, al mantenerse el mismo valor de i_{ta} entre los diferentes tamaños de grilla se requieren alturas mayores en los sistemas agregados para igualar los volúmenes entre los distintos esquemas.

Resulta de lo anterior que el ajuste de los parámetros de resistencia no produce una adecuada correlación en términos de alturas máximas de agua al producirse el agregamiento del sistema a modelar.

Teniendo en cuenta los valores de la suma de los coeficientes R^2_x (tabla 5) se observa que los valores mayores (los cuales representan un mejor ajuste entre las respuestas hidrológicas para diferentes niveles de detalle) se obtienen ajustando adecuadamente el parámetro i_{ta} , en comparación con el ajuste de n_v y n_r .

Las mayores variaciones entre las respuestas hidrológicas entre el sistema de detalle y los sistemas agregados se observan para los eventos de mayor importancia (Evento E2, 107 mm de lluvia neta y evento E11, 150 mm de lluvia neta).

CONCLUSIONES

Se ha modelado una cuenca de llanura con diferentes niveles de detalle de discretización espacial y se han comparado las respuestas hidrológicas en términos de caudales, velocidades y alturas máximas en todo el dominio de la cuenca entre los diferentes niveles agregados y el mayor nivel de detalle. Para ello se han ajustado en las discretizaciones más gruesas los parámetros de resistencia del valle (n_v) y curso (n_r), por un lado, y la geometría de almacenamiento en la celda (i_{ta}) por el otro.

Como resultado del agregamiento del sistema a modelar se observa que a medida que el tamaño de la grilla aumenta se generan relieves más “suavizados”; fundamentalmente con menores valores de pendientes locales sobre el dominio de discretización.

A medida que el tamaño de la grilla aumenta se requiere aumentar los valores de resistencia del valle y de los cursos o bien disminuir los valores de la pendiente trasversal de almacenamiento. El ajuste en los esquemas agregados de los parámetros de resistencia del valle y de los cursos producen respuestas similares a las que se obtienen con el ajuste de la pendiente trasversal de almacenamiento en términos de caudales y velocidades máximas; en cambio los mejores resultados

en términos de alturas máximas de agua se obtienen con el ajuste de la pendiente transversal de almacenamiento.

Una buena correlación entre alturas máximas de agua en celdas entre un alto nivel de detalle y un esquema agregado resulta de suma utilidad e importancia. Lograr reproducir adecuadamente valores físicos como son las alturas de aguas en celdas redundan en resultados adecuados a la hora de la utilización de dichas variables; por ejemplo para la determinación de superficies inundadas; o en la utilización en modelos matemáticos de erosión-sedimentación, ya que el valor de altura de flujo es una variable importante en la formulación de este proceso.

Los eventos de mayor importancia resultan más sensibles a los procesos de agregación del sistema si se analizan variables de flujo tales como caudales, velocidades y alturas máximas de agua sobre todo el dominio de definición de la cuenca.

Las ventajas de los modelos de parámetros distribuidos se traducen en la posibilidad de la representación espacial de las variables que intervienen en el proceso de transformación lluvia-caudal. A su vez estos modelos requieren gran cantidad de información de entrada, tiempo de cálculo y espacio en disco para los resultados; por lo tanto el efecto de obtener respuestas hidrológicas similares entre diferentes niveles de detalle implica reducir esta cantidad de información de entrada y el tiempo de cálculo al permitir implementar discretizaciones menos detalladas y sobre las cuales se obtienen respuestas hidrológicas similares a la de mayor nivel de detalle. Lo anterior está también íntimamente ligado con el nivel de detalle deseado a la hora de implementar el modelo matemático.

BIBLIOGRAFÍA

- Blöschl, G. y Sivapalan, M.** (1995). "Scale issues in hydrological Modelling: A Review". Hydrological Processes. Vol. 9, 251-290.
- Goodrich, D.; Grayson, R.; Willgoose, G; Palacios-Valez, O.; Blöschl, G.** (2003). "The Effect of Catchment Discretization on Rainfall-Runoff Model Predictions. Geophysical Research Abstracts". Vol. 5, 12551.
- Haile, A. T. y Rientjes, T. H. M.** (2005). "Effects of LIDAR DEM Resolution in flood modeling: A Model sensitivity study for the City of Tegucigalpa, Honduras". ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser Scanning 2005", pp 168-173. Enschede, The Netherlands.
- Nash, J. and Sutcliffe, J.** (1970). "River flow forecasting through conceptual models, I-A discussion of principles." Journal of Hydrology 10, 282-290.
- 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 Esguerrimiento 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.
- Shrestha, R.; Tachikawa, Y.; Takara, K.** (2006) "Input Data Resolution Analysis for Distributed Hydrological Modeling". Journal of Hydrology 319, 36-50.
- Stenta, H. y Riccardi, G.** (2005). "La Modificación de la Respuesta Hidrológica en Cuencas de Llanura ante la Variación del Tamaño de la Grilla". XXº Congreso Nacional del Agua 2005 y IIIº Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. ISBN 987-22143-0-1. CD-ROM Cap. Hidrología. T 75. pp 1-13. Mendoza, Argentina.
- Stenta, H.; Riccardi, G.; Basile, P.** (2006) "Respuestas Hidrológicas en la Modelación del Esguerrimiento en Cuencas de Llanura con Diferentes Niveles de Detalle". XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 53-H55-S3117. Ciudad Guayana, Venezuela.