

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

**SIMILITUD HIDROLÓGICA EN EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN
CUENCAS RURALES MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA
DISTRIBUIDA**

Hernán Stenta⁽¹⁾, Gerardo Riccardi⁽²⁾⁽⁴⁾ y Pedro Basile⁽³⁾⁽⁴⁾

*(1) Becario Doctoral CONICET, (2) Investigador CIC-CIUNR, (3) Investigador CONICET, (4) Profesor Adjunto
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.
Riobamba 245 bis, 2000 Rosario, Argentina
e-mail: hstenta@fceia.unr.edu.ar*

RESUMEN:

Se analizan los efectos del tamaño de grilla en la representación del relieve y de sus atributos derivados debido a los diferentes grados de discretización espacial en cuencas de llanura y se propone el escalamiento de parámetros en los esquemas agregados con la finalidad de obtener respuestas hidrológicas similares entre las diferentes discretizaciones para el escurrimiento superficial. Para el estudio se utiliza un modelo matemático cuasi-bidimensional basado en esquemas de celdas con aproximación de onda difusiva denominado CTSS8 (Riccardi, 2000). Se propone un procedimiento para el escalamiento de parámetros y se cuantifica el grado de similitud alcanzado entre las variables de flujo de las diferentes discretizaciones. La similitud entre esquemas se plantea para las variables de flujo: caudal, velocidad y alturas medias de agua en todo el dominio de la cuenca. Los parámetros a escalar son: i) el coeficiente de resistencia al flujo y ii) la geometría de almacenamiento y conducción en celda parametrizada por la pendiente transversal en celda (ITA). Los resultados obtenidos de las simulaciones hidrológicas indican que a medida que se incrementa el tamaño de la grilla es necesario incrementar el coeficiente de resistencia del flujo entre celdas o bien reducir el parámetro ITA para lograr similitud hidrológica. Se obtiene mayor similitud en la respuesta hidrológica mediante el escalamiento del parámetro ITA respecto al escalamiento de coeficiente de resistencia al flujo.

ABSTRACT:

The effects of grid-cell size on landscape representation and derived topographic attributes due to different spatial resolution levels in a basin are analyzed. The scaling of parameters in aggregated schemes is proposed to obtain similarity in hydrological response for surface runoff modeling between different degrees of spatial discretization. A distributed mathematical model quasi 2-D based in schemes of interconnected cells with diffusive wave approximation, denominated CTSS8 (Riccardi, 2000) is applied. A procedure to scale parameters is proposed and the degree of similarity in flow variables between different schemes is calculated. Flow variables analysed in the whole domain are: discharge, flow velocity and water depth. The parameters to scale are: i) the overland roughness coefficient and ii) the cell storage and discharge geometry parameterized by the transverse slope in cell. For the hydrological simulations, the results indicate that as the grid cell size is increased it is necessary to increase the overland roughness coefficient or reduce the transverse slope in cell to obtain similarity in hydrological response. The best results in hydrological similarity are achieved when the transverse slope in cell parameter is scaled in comparison to the scaling of the overland roughness coefficient.

PALABRAS CLAVES: cuencas rurales de llanura, modelación matemática distribuida, tamaños de grilla, escurrimiento superficial, similitud hidrológica.

INTRODUCCIÓN

El escurrimiento superficial constituye uno de los principales procesos del ciclo hidrológico y su conocimiento es de vital importancia para la planificación de los recursos hídricos a nivel de cuenca. Los primeros abordajes en la descripción de la respuesta hidrológica en cuencas estuvieron enfocados en la generación de información en las denominadas “secciones de control” o punto de salida de la cuenca, no determinándose en su interior parámetros de flujo físicamente reales como alturas, velocidades y caudales. A través del avance del conocimiento hoy día se cuenta con modelos y estructuras de simulación que permiten desagregar la mayoría de los procesos hidrológicos intervinientes en la transformación lluvia-caudal y en la propagación de flujo en unidades espaciales “pequeñas”. En este camino es posible describir los mecanismos predominantes en el escurrimiento superficial a nivel de parcelas rurales generando en las simulaciones hidrológicas-hidráulicas de la transformación lluvia caudal y en la propagación de flujo, no sólo información en el punto de salida sino, con igual precisión, información en todas las unidades de discretización de la cuenca. Esta potencialidad de descripción de los fenómenos es de fundamental importancia en las cuencas de llanura donde los problemas atinentes al control de inundaciones no sólo se presentan en los puntos de salida de las mismas, sino además en todo su interior, incluso en los sectores altos y de mayor pendiente (Riccardi et al., 2002).

En este sentido los modelos matemáticos de parámetros distribuidos de simulación lluvia-caudal y de propagación de flujo pueden ser considerados como herramientas valiosas para el estudio de gestión de drenaje. 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. 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 (Blöschl y Sivapalan, 1995).

La subdivisión de la cuenca en celdas 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 nivel aceptable y tipo de discretización de la cuenca (Goodrich et al., 2003).

A medida que aumenta el nivel de detalle (reducción del tamaño de grilla), se acepta que se logran reproducir con mayor exactitud los procesos involucrados en la transformación lluvia-caudal; como contrapartida se requiere mayor cantidad de información de entrada, mayores tiempos de cálculo y mayor cantidad de ocupación de espacio en disco; se remarca que existe un vínculo entre un adecuado nivel de detalle de la modelación y la información necesaria a manipular, compatibles con la utilidad y finalidad del modelo matemático.

Al modelar una cuenca con diferentes tamaños de grilla se producen modificaciones tanto en las características derivadas del relieve como en las respuestas hidrológicas del modelo. Esta situación 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. En general, a partir de la modificación de las respuestas hidrológicas debidas a los diferentes niveles de detalle en que se discretiza un sistema se plantea la aplicación de conceptos o criterios que permitan obtener, dentro de determinados rangos de aceptabilidad, similitud hidrológica entre discretizaciones. Los criterios más utilizados plantean la conservación de alguna propiedad característica de la cuenca, como por ejemplo el tiempo de equilibrio o el almacenamiento de equilibrio, mediante el escalamiento de parámetros (Wu et al., 1978; Goodrich, 1990; Zaghoul, 1983). En la mayoría de los trabajos reportados; vinculados con el estudio de los efectos del tamaño de grilla y similitud hidrológica en el escurrimiento superficial; los parámetros utilizados en el escalamiento son los coeficientes de resistencia al escurrimiento en valles y ríos; y en modelos de onda cinemática, la longitud del plano de escurrimiento.

Dooge (1986) remarcó que a diferencia de la teoría hidráulica, la cual cuenta con los números de Reynolds y Froude; en hidrología no existen principios de similitud para el comportamiento de una cuenca. Una relación de similitud podría permitir que los resultados del modelo sean aplicables a diferentes escalas manteniendo determinadas relaciones sobre un amplio rango de escalas.

OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo es analizar los efectos de la agregación espacial (por modificación del tamaño de grilla) en la modelación matemática distribuida del escurrimiento superficial en cuencas rurales mediante la aplicación de un modelo matemático cuasi-bidimensional basado en esquemas de celdas con aproximación de onda difusiva denominado CTSS8 (Riccardi, 2000). El estudio se focaliza en el mecanismo de propagación del flujo por lo cual no se consideran los efectos de la agregación espacial en los procesos hidrológicos involucrados en las pérdidas del escurrimiento como intercepción, almacenamiento superficial e infiltración. Los objetivos particulares del presente estudio comprenden:

- estudiar las alteraciones producidas en la representación de las características generales de la cuenca y en la representación del relieve y sus atributos derivados debido a los diferentes niveles de agregación espacial.
- proponer un procedimiento para el escalamiento de parámetros y cuantificar el grado de similitud alcanzado entre las variables hidrológicas de las diferentes discretizaciones. La similitud entre esquemas se plantea para las variables de flujo: caudales, velocidades y alturas de agua en todo el dominio de la cuenca. Los parámetros propuestos para el escalamiento son: i) el coeficiente de resistencia al flujo (n_v); ii) la pendiente transversal dentro de la celda (ITA) que define la geometría de almacenamiento en la misma e interviene en el proceso de almacenamiento y conducción de la celda (Stenta et al; 2008). La pendiente transversal en celda parametriza la variabilidad morfológica y de procesos dentro de la celda. Se utiliza el concepto de conservar el almacenamiento de equilibrio para obtener similitud hidrológica en las variables de flujo entre los diferentes esquemas mediante el escalamiento de los parámetros.

DESCRIPCION DE LOS TRABAJOS

El estudio de los efectos del tamaño de grilla se realiza sobre tres cuencas rurales; la cuenca del A° Ludueña Santa Fe, Argentina (700 Km²), la cuenca del A° Santa Catalina (135 Km²) Buenos Aires, Argentina y la cuenca del A° Saladillo (3128 Km²) Santa Fe, Argentina. Las cuencas estudiadas se discretizaron con cuatro tamaños de grilla cuadrangular abarcando un amplio rango de resoluciones espaciales. Se constituyó el modelo matemático para todos los tamaños de grilla y para las tres cuencas; incorporando los cursos de agua; sus características geométricas y los terraplenes y alcantarillas en los sectores que corresponde. Se analizaron las alteraciones, debido al efecto de modificación del tamaño de la grilla, de las características generales de las cuencas (área, pendiente media del curso principal, densidad de drenaje, entre otras) y de los atributos topográficos distribuidos espacialmente (como por ejemplo cotas y pendientes locales en celdas). Para los diferentes tamaños de grilla implementados se cuantificó la pérdida del contenido de información topográfica mediante la aplicación del concepto de entropía. En cada cuenca, a partir de la calibración del modelo para la discretización de menor tamaño de grilla, se simuló una lluvia neta, temporal y espacialmente uniforme, de intensidad constante y larga duración de modo de alcanzar el equilibrio completo en la misma. Se evaluó el almacenamiento de equilibrio en la cuenca y se escaló, conservando este valor para los tamaños de grilla más grandes: a) el coeficiente de resistencia del valle (n_v), por un lado y b) la pendiente transversal de la celda (ITA) por otro lado. Se simularon los eventos observados y una serie de eventos sintéticos y se cuantificó el grado de similitud entre las variables de flujo: caudales, velocidades y alturas máximas en todo el dominio entre el tamaño de grilla menor y los restantes tamaños de grilla. Para cuantificar el grado de similitud entre las respuestas se utilizó el coeficiente R^2N (Nash y Sutcliffe, 1970).

Cuenca del A° 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 (Provincia de Santa Fe, Argentina, Figura 1). El área de aporte es de 700 Km² y la elevación varía entre 71.5 m y 16 m sobre el nivel del mar. Su pendiente media es del orden del 0.11 %. La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. 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. La precipitación media anual sobre la región es de 980 mm y el caudal base del arroyo es de 0,50 m³/s.

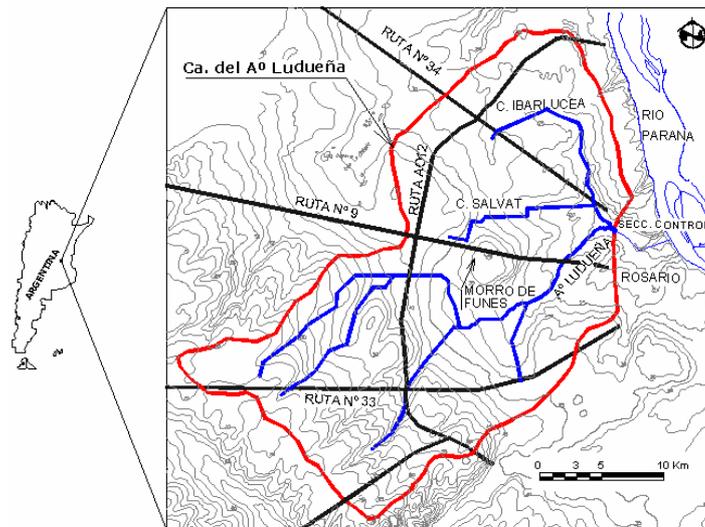


Figura 1.- Cuenca del A° Ludueña, Rosario, Santa Fe, Argentina

La cuenca se modeló con cuatro tamaños de grilla (TG) diferentes: 125 m (TG125) que corresponde al mayor nivel de detalle; 250 m (TG250); 500 m (TG500) y 1000 m (TG1000). La cantidad de celdas varió entre 44800 (TG125) y 7000 (TG1000); y la cantidad de vinculaciones entre celdas de 88985 (TG125) y 1317 (TG1000).

Un parámetro de utilidad para caracterizar la capacidad de la red de cursos que componen la cuenca es la relación entre el volumen de almacenamiento potencial en cursos por unidad de longitud de los mismos. Este parámetro es un indicador del grado de influencia que tiene la red de cursos en la dinámica de propagación del flujo. Valores elevados del mismo indican que la red de cursos tiene capacidad para almacenar y transitar caudales, lo que genera una mayor concentración de escurrimiento en los mismos reduciendo la influencia de los sectores aledaños a curso; es decir, de los sectores del valle de inundación. Por el contrario, cuencas donde dicha capacidad potencial de almacenamiento es reducida, el fenómeno de propagación del flujo superficial estará influenciado en mayor medida por el escurrimiento en sectores del valle de inundación. En el caso extremo de una cuenca con nula capacidad de almacenamiento la dinámica de escurrimiento superficial esta gobernada exclusivamente por el flujo sobre sectores valle.

En relación a las características generales a nivel de cuenca se observó que el área de la misma ($A=700$ km²) y la pendiente media sobre el curso principal ($S=1.15$ %) no sufrieron alteraciones. La longitud total de cursos modelada se redujo de 129 km (TG125) a 122 km (TG1000); y la densidad de drenaje se redujo de 0.184 km/km² (TG125) a 0.174 km/km² (TG1000). La capacidad de almacenamiento en cursos por unidad de longitud no sufrió modificaciones con el tamaño de grilla; dicha capacidad es de 10.1 m³/m.

Se cuantificaron las alteraciones debidas al efecto de modificación del tamaño de la grilla de los siguientes atributos topográficos distribuidos espacialmente: cotas y pendientes locales en celdas. Para ello se extrae; para cada TG, el valor de la cota y pendiente local en cada celda; luego se obtienen los valores máximos, mínimos y promedio. Los resultados se resumen en la Tabla 1.

Asimismo, para cada tamaño de grilla se cuantificó la pérdida del contenido de información topográfica mediante la aplicación del concepto de entropía. Dicho concepto, aplicado en el modelado hidrológico resulta útil para cuantificar los efectos de la agregación de datos para la extracción de parámetros del modelo hidrológico ya que en un modelo digital del terreno los valores numéricos de cada celda componen el contenido de información del sistema en estudio. Vieux (1993) indica que la entropía puede ser considerada como un indicador de la variabilidad espacial cuando el concepto es aplicado a superficies topográficas definidas por un formato raster del modelo digital del terreno. Es decir, la entropía puede utilizarse como una medida para cuantificar la variabilidad espacial ya que la cantidad total de incertidumbre, o de desorden, en datos topográficos puede interpretarse, indirectamente, como el contenido de información del modelo digital del terreno. El cálculo de la entropía (I) asociada a una determinada variable (por ejemplo: elevación o pendiente) se define mediante la expresión (Vieux, 1993):

$$I = - \sum_{i=1}^B P_i \log(P_i) \quad [1]$$

Donde, B = números de intervalos discretos y Pi = probabilidad de ocurrencia de la variable dentro del intervalo. Un incremento en la variabilidad de la información resulta en un incremento de la entropía. El logaritmo en base 10 expresa el contenido de información en unidades Hartleys; el signo menos delante de la sumatoria se asume por convención, de modo que un incremento en el contenido de información se traduce en un incremento de la entropía. En la Tabla 1 se resumen los valores de entropía en cotas y pendientes locales para cada tamaño de grilla y la pérdida relativa de entropía respecto al menor tamaño de grilla.

Tabla 1.- Cotras; pendientes locales en celdas y entropía asociada para los diferentes tamaños de grilla.

COTAS y PENDIENTES	COTAS [m]				PENDIENTES [m/m]			
	TG125	TG250	TG500	TG1000	TG125	TG250	TG500	TG1000
Máxima	71.36	71.29	71.00	70.46	0.0242	0.0151	0.0117	0.0099
Mínima	16.08	16.15	17.00	17.00	0.0	0.0	0.0	0.0
Promedio	39.7	39.8	39.8	39.8	0.00244	0.00239	0.00227	0.00213
Entropía [Hartleys]	2.50	2.49	2.44	2.33	1.98	1.95	1.88	1.81
Pérdida Relativa [%]	0.0	-0.71	-2.34	-6.74	0.0	-1.5	-5.1	-8.6

A partir de tres de eventos registrados en la cuenca (17/03/94; 03/04/94 y 01/05/94), con los que se cuenta con información de caudales en la sección de control y datos de lluvia se ha calibrado y validado el modelo para la discretización de mayor nivel de detalle (TG125). Los parámetros resultantes de la calibración resultaron: coeficiente de rugosidad en sectores valle: 0.12 s/m^{1/3}; coeficiente de rugosidad en cursos: 0.035 s/m^{1/3}; pendiente transversal de almacenamiento en celda: 0.025 m/m; coeficiente de descarga sobre terraplenes: 0.2; coeficiente de descarga alcantarillas: 0.8-0.9. En todos los casos los caudales máximos han sido reproducidos con un error máximo de 5 %; y el tiempo al pico con un error máximo del 20%.

Para la discretización de mayor nivel de detalle (TG125) con sus parámetros ya calibrados; se simuló una lluvia neta de 0.4 mm/h y de larga duración (t = 400 hs) distribuida uniformemente sobre toda la cuenca de modo de lograr un estado de equilibrio completo en la misma. Este estado de equilibrio completo es alcanzado cuando la duración de la lluvia en exceso (tr) es mayor al tiempo de equilibrio (te). El caudal de equilibrio en cada sección se obtiene conociendo el área de aporte aguas arriba de dicha sección y la intensidad de lluvia neta. En la sección de control el caudal de equilibrio resulta Q = i x A = 700 Km² x 0.4 mm/h = 77.8 m³/s. El almacenamiento de equilibrio se calcula sumando los

valores de almacenamiento en cada celda del modelo una vez que se ha alcanzado el equilibrio completo.

Para las demás discretizaciones (TG250, TG500 y TG1000) se simuló la misma lluvia neta de 0.4 mm/h uniforme espacialmente y con el mismo tiempo de duración de 400 hs. Por aproximación; para cada TG de menor resolución se escalan los parámetros: a) resistencia del valle (nv) y b) pendiente transversal en celda (ITA) (Tabla 2). El criterio de utilizado para el escalamiento de los parámetros es el de conservar el almacenamiento de equilibrio entre esquemas y la forma del hidrograma en la sección de control.

Tabla 2.- Escalamiento de parámetros (nv e ITA) para las diferentes discretizaciones.

	TG125	ESCALADO DE nv			ESCALADO DE ITA		
		TG250 _{nv}	TG500 _{nv}	TG1000 _{nv}	TG250 _{ITA}	TG500 _{ITA}	TG1000 _{ITA}
nv [s/m ^{1/3}]	0.120	0.140	0.200	0.275	0.120	0.120	0.120
ITA [m/m]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.019	0.011	0.009

A partir de los parámetros escalados del coeficiente de resistencia de valle y de la pendiente transversal en celdas (Tabla 2) se simularon los eventos observados y una serie de eventos sintéticos. Estos últimos fueron de las siguientes características: Duraciones de lluvia neta de 3 hs, 5 hs y 10 hs e intensidades de lluvia neta de 3 mm/h, 8 mm/h y 15 mm/h y duración de 20 hs e intensidades de 2 mm/h, 5 mm/h y 8 mm/h. Para los eventos sintéticos se consideró distribución espacial uniforme de la lluvia. Los eventos se simularon para la discretización de mayor nivel de detalle (TG125) y para las discretizaciones restantes (TG250, TG500, TG1000). Se realizaron un total de 105 simulaciones para todas las discretizaciones y todos los eventos (15 eventos por 7 simulaciones por evento abarcando todas las discretizaciones y las propuestas de escalar el coeficiente de resistencia del valle y la pendiente transversal en celda). El objetivo de realizar las simulaciones para eventos de corta duración se debe a que en la cuenca en estudio, las lluvias reales son de duración menor al tiempo de equilibrio de la misma; y por ende se alcanza en la misma un estado de equilibrio parcial y no un estado de equilibrio completo.

La comparación en términos de respuestas hidrológicas se realiza respecto al menor tamaño de grilla (TG125). Para cuantificar el grado de similitud alcanzado entre los diferentes tamaños de grilla se utilizó el coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970), ecuación [2]. La comparación se realizó sobre todo el dominio de la cuenca en términos de las variables de flujo de caudal máximo (Q) y velocidad máxima (Vel) en vinculaciones y altura de agua máxima (H) en celdas.

$$R^2 X = \frac{\sum_{i=1}^N (D_{det\ allej} - \bar{D}_{det\ allej})^2 - \sum_{i=1}^N (D_{det\ allej} - D_{agregadoj})^2}{\sum_{i=1}^N (D_{det\ allej} - \bar{D}_{det\ allej})^2} \quad [2]$$

Donde:

R² X: Coeficiente de eficiencia entre TC125 (detalle) y los esquemas agregados (TC250, TC500 y TC1000; 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 R²Q y R²Vel, y cantidad de celdas para el cálculo de R²H, del esquema agregado (TC250, TC500 y TC1000).

D_{detalle i}: Valor de la variable Q, Vel, o H de la discretización de mayor nivel de detalle (TC125).

$\bar{D}_{detalle i}$: Valor medio de las variables Q, Vel, o H de la discretización de mayor nivel de detalle (TG125).

D_{agregado i}: Valor de la variable Q, Vel, o H del esquema agregado (TC250, TC500 y TC1000).

La disminución del coeficiente R²X representa, en los términos aquí planteados, la pérdida en la similitud de respuesta hidrológica de las variables de flujo: caudal máximo, velocidad máxima y altura de agua entre el menor tamaño de grilla y los tamaños de grilla más grandes.

Como resultado del escalamiento del coeficiente de resistencia del valle; se obtuvo lo siguiente: Valores de R^2Q variando entre: 0.98 para TG125-TG250 (Evento de 3mm/h y 5hs) y 0.77 para TG125-TG1000 (Evento de 15mm/h y 10hs). Para las velocidades de flujo (R^2Vel) se obtuvieron valores máximos de 0.97 para TG125-TG250 (Evento de 3mm/h y 5hs) y valores mínimos de 0.71 para TG125-TG1000 (Evento de 8mm/h y 20hs). Respecto a las alturas de flujo (R^2H) se obtuvieron las mayores variaciones: 0.89 entre TG125-TG250 (Evento de 3mm/h y 5hs) y 0.20 al pasar de TG125 a TG1000 (15mm/h y 10hs).

Los resultados de similitud al escalar la pendiente transversal en celda son: R^2Q variando entre 0.98 al pasar de TG125 a TG250 (Evento 3mm/h y 3hs) y 0.85 para TG125-TG1000 (Evento 8mm/h y 20hs). Para los valores de R^2Vel se obtuvo 0.96 de máximo para TG125-TG250 (Evento 3mm/h y 3hs) y 0.69 para TG125-TG1000 (Evento 8mm/h y 20hs). La similitud en alturas de flujo arroja valores máximos de 0.94 para TG125-TG250 (Evento 3mm/h y 3hs) y mínimo de 0.87 para TG125-TG1000 (Evento 8mm/h y 20hs).

Los resultados expuestos anteriormente son los valores extremos obtenidos (máximos y mínimos) entre los diferentes tamaños de grilla; para todos los eventos simulados y mediante el escalamiento del coeficiente de resistencia del valle y la pendiente transversal en celda.

Los efectos producidos por la modificación del tamaño de grilla afectan las respuestas hidrológicas. Como ejemplo significativo, se presentan las relaciones obtenidas al vincular las pérdidas del contenido de información en términos de pendientes (Pérdida Relativa de Entropía - Tabla 1) con los valores de R^2H calculados para todos los eventos (Figura 2).

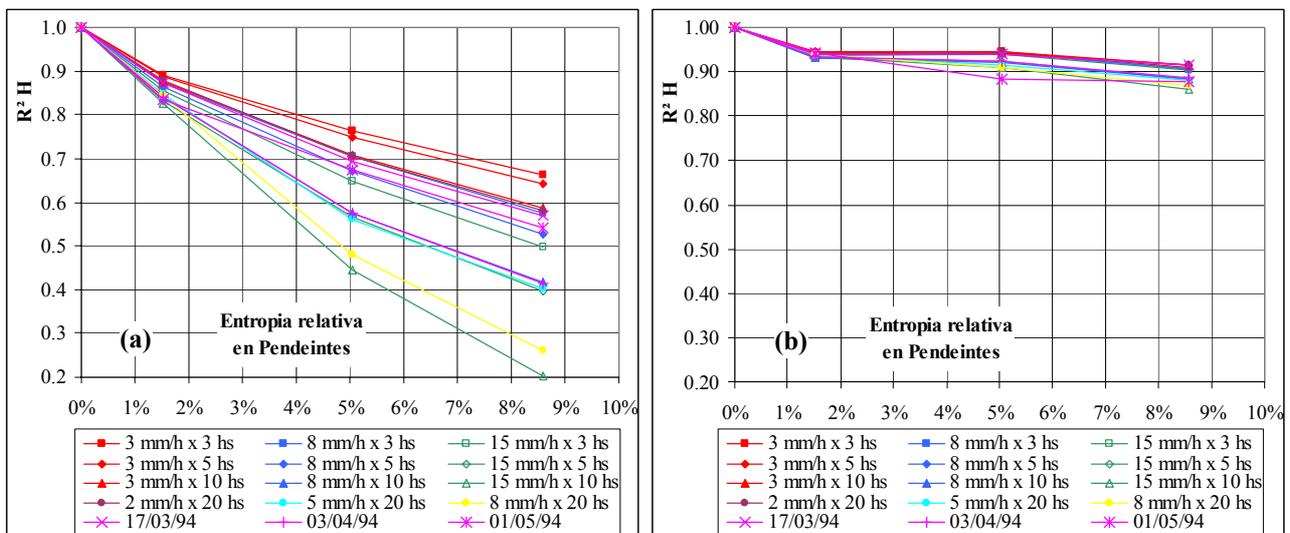


Figura 2.- Entropía Relativa en pendientes vs. R^2H . a) Escalando nv; b) Escalando ITA.

Cuenca del A° Santa Catalina.

La cuenca del A° Santa Catalina se encuentra ubicada en la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 3); entre los paralelos 36° 53' S y 37° 7' S y los meridianos 59° 47' O y 59° 56' O. Tiene una superficie de 135 Km² y una pendiente media sobre el curso de agua de mayor longitud de 3.8 %. Las elevaciones varían entre los 368 m y 152 m sobre el nivel del mar. La cuenca presenta, en su cabecera relieve con pendientes pronunciadas por ubicarse en un sector serrano; una zona de transición y una zona con pendientes suaves y líneas de escurrimiento difusas hacia la sección de control. La lluvia anual en la región es del orden de los 900 mm. (Casenave, 2006).

La cuenca se constituyó con cuatro tamaños de grilla (TG) cuadrangular de lado: 50 m (TG50) (mayor nivel de detalle), 100 m (TG100), 200 m (TG200) y 400 m (TG400). La cantidad de celdas varió entre

54208 (TG50) y 847 (TG400); y la cantidad de vinculaciones entre celdas de 107673 (TG50) y 1602 (TG1000).

Al igual que en el caso de la cuenca del A° Ludueña, en este caso se observó que no se modificaron los valores del área de la cuenca ($A = 135 \text{ km}^2$) y de la pendiente media sobre el curso principal ($S=3.30\%$). Respecto a la longitud total de cursos modelada; la misma se redujo de 60 km (TG50) a 57 km (TG400); y la densidad de drenaje se redujo de 0.441 km/km^2 (TG50) a 0.422 km/km^2 (TG400). No se produjo alteración de la capacidad de almacenamiento en cursos por unidad de longitud; arrojando un valor de $6.2 \text{ m}^3/\text{m}$ para las diferentes discretizaciones.

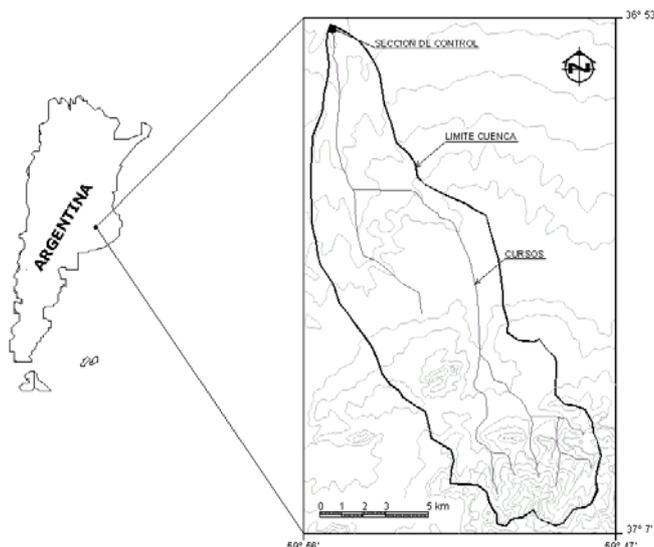


Figura 3.- Cuenca del A° Santa Catalina, Buenos Aires, Argentina

Las variaciones de los atributos distribuidos espacialmente (cotas y pendientes locales) y la pérdida en el contenido de información (entropía) debido al incremento del TG se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3.- Cotas; pendientes locales en celdas y entropía asociada para los diferentes tamaños de grilla.

COTAS y PENDIENTES	COTAS [m]				PENDIENTES [m/m]			
	TG50	TG100	TG200	TG400	TG50	TG100	TG200	TG400
Máxima	367.95	367.44	367.33	362.05	0.387	0.261	0.205	0.160
Mínima	152.35	152.38	152.42	152.49	0.0	0.0	0.0	0.0
Promedio	199.70	199.70	199.73	199.74	0.0184	0.0178	0.0162	0.0135
Entropía [Hartleys]	2.32	2.32	2.30	2.24	1.60	1.59	1.55	1.45
Perdida Relativa [%]	0.00	0.14	1.02	3.71	0.00	0.98	3.45	9.57

En base a cuatro eventos observados en la cuenca (Junio 2001, Mayo 2002, Agosto 2002 y Octubre 2002) se calibró y validó el modelo para la discretización de mayor nivel de detalle (TG50). Los parámetros resultantes de la calibración resultaron: coeficiente de rugosidad en sectores valle: $0.11 \text{ s/m}^{1/3}$; coeficiente de rugosidad en cursos: $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$; pendiente transversal de almacenamiento en celda: 0.20 m/m . En todos los casos los caudales máximos han sido reproducidos con un error máximo de 10 % y el tiempo al pico con un error máximo del 20%.

Para la discretización de mayor nivel de detalle para esta cuenca (TG50) se simuló una lluvia neta de 1.0 mm/h de larga duración ($tr = 90 \text{ hs}$). Posteriormente, en función del almacenamiento de equilibrio obtenido para TG50; se escalan los parámetros nv e ITA para los TG mayores (Tabla 4).

Tabla 4.- Escalamiento de parámetros (nv e ITA) para los diferentes tamaños de grilla.

	TG50	ESCALADO DE nv			ESCALADO DE ITA		
		TG100 _{nv}	TG200 _{nv}	TG400 _{nv}	TG100 _{ITA}	TG200 _{ITA}	TG400 _{ITA}
$nv \text{ [s/m}^{1/3}]$	0.110	0.205	0.370	0.550	0.110	0.110	0.110
$ITA \text{ [m/m]}$	0.20	0.20	0.20	0.20	0.085	0.038	0.019

Se simularon una serie de eventos observados y sintéticos. Los eventos observados corresponden a los utilizados en la calibración de TG50. Los eventos sintéticos han sido de las siguientes características: 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 sintéticos. Todos los eventos se simularon para la discretización de mayor nivel de detalle (TG50) y para las demás discretizaciones (TG100, TG200, TG400). Se realizaron un total de 91 simulaciones, correspondientes a 13 eventos por 7 simulaciones por evento.

La cuantificación del grado de similitud hidrológica se realiza respecto a TG50. Se aplicó sistemáticamente la ecuación [2] entre TG50 y los restantes tamaños de grilla; para las variables caudal máximo, velocidad y altura de agua en todo el dominio espacial.

El resultado del escalamiento del coeficiente de resistencia del valle arrojó los siguientes resultados en términos de similitud de respuestas: Valores de R^2Q variando entre: 0.97 para TG50-TG100 (Evento de 3mm/h y 5hs) y 0.65 para TG50-TG400 (Evento de 15mm/h y 10hs). Para las velocidades de flujo (R^2Vel) se obtuvieron valores máximos de 0.95 para TG50-TG100 (Evento de 3mm/h y 5hs) y valores mínimos de 0.88 para TG50-TG400 (Evento de 15mm/h y 10hs). Nuevamente, al igual que el la cuenca del A° Ludueña; respecto a las alturas de flujo (R^2H) se obtuvieron las mayores variaciones: 0.92 entre TG50-TG100 (Evento de 8mm/h y 5hs) y -0.75 al pasar de TG50 a TG400 (15mm/h y 10hs).

Al escalar la pendiente transversal en celda se obtuvieron los siguientes resultados: R^2Q variando entre 0.99 al pasar de TG50 a TG100 (Evento 3mm/h y 3hs) y 0.84 para TG50-TG400 (Evento 15mm/h y 10hs). Para los valores de R^2Vel se obtuvo 0.98 de máximo para TG50-TG100 (Evento 3mm/h y 3hs) y 0.85 para TG50-TG400 (Evento 15mm/h y 10hs). La similitud en alturas de flujo arrojó valores máximos de 0.97 para TG50-TG100 (Evento 3mm/h y 3hs) y mínimo de 0.87 para TG50-TG400 (Evento 15mm/h y 10hs).

En la Figura 4 se presentan las relaciones obtenidas al vincular las pérdidas del contenido de información en términos de pendientes locales (Pérdida Relativa de Entropía – Tabla 3) conjuntamente con el grado de similitud alcanzado en términos de R^2H .

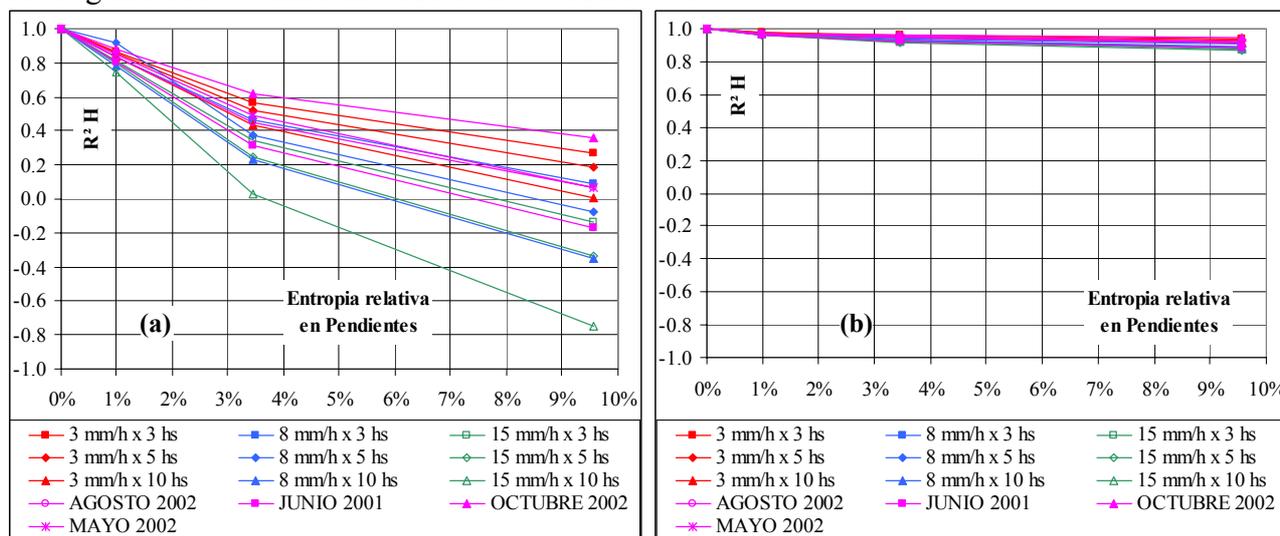


Figura 4.- Entropía Relativa en pendientes vs. R^2H . a) Escalando nv; b) Escalando ITA.

Cuenca del A° Saladillo.

La cuenca del A° Saladillo se encuentra situada entre los paralelos 32° 55' S y 33° 30' S y los meridianos 60° 35' O y 61° 55' O (Sur de la Provincia de Santa Fe, Argentina, Figura 5); ocupa parte de los departamentos de Rosario, San Lorenzo, Caseros, Constitución y General López. Posee aproximadamente 3144 km² de extensión superficial. La elevación varía entre 115.5 m y 18.5 m sobre el

nivel del mar. El curso principal tiene una longitud de 145 Km en dirección OSO (oeste – sudoeste) a ENE (este – noreste) y su pendiente media es de 0.57 m/ km. El A° Saladillo descarga sus aguas en el Río Paraná; aproximadamente 2 Km aguas arriba de su descarga en el Río Paraná existe una cascada que actúa como sección de control.

La cuenca se modeló con cuatro tamaños de grilla (TG) diferentes: 250 m (TG250) que corresponde al mayor nivel de detalle; 500 m (TG500); 1000 m (TG1000) y 2000 m (TG2000). La cantidad de celdas varió entre 50048 (TG250) y 782 (TG2000); y la cantidad de vinculaciones entre celdas de 99225 (TG250) y 1456 (TG2000).

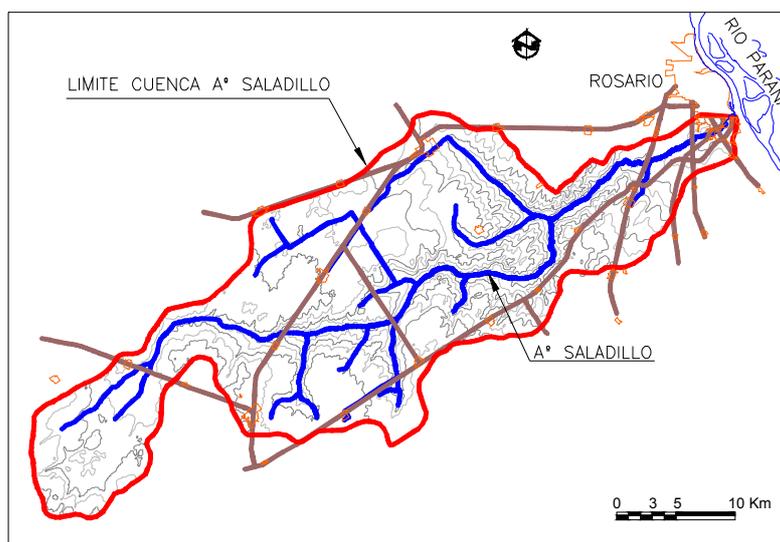


Figura 5.- Cuenca del A° Saladillo, Santa Fe, Argentina.

Respecto a las modificaciones de las características generales con el tamaño de grilla se observó que el área se mantiene constante ($A=3128 \text{ km}^2$); la longitud de cursos se redujo de 446 km (TG250) a 406 km (TG2000); la densidad de drenaje varió de 0.142 km/km^2 (TG250) a 0.130 km/km^2 (TG2000); y la pendiente media sobre el curso principal varió de 0.55 ‰ a 0.58 ‰. La capacidad de almacenamiento en cursos por unidad de longitud arrojó un valor de $45.1 \text{ m}^3/\text{m}$ para los diferentes tamaños de grilla.

Las variaciones de los atributos distribuidos espacialmente (cotas y pendientes locales) y la pérdida en el contenido de información debido al incremento del TG se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5.- Valores de cotas y pendientes locales en celdas; y entropía asociada para los diferentes tamaños de grilla.

COTAS y PENDIENTES	COTAS [m]				PENDIENTES [m/m]			
	TG250	TG500	TG1000	TG2000	TG250	TG500	TG1000	TG2000
Máxima	115.60	115.55	115.51	115.09	0.03656	0.02070	0.01488	0.00921
Mínima	18.01	20.04	20.73	21.00	0.0	0.0	0.0	0.0
Promedio	81.44	81.42	81.38	81.14	0.00342	0.00328	0.00295	0.00235
Entropía [Hartleys]	2.43	2.43	2.41	2.33	1.99	1.97	1.92	1.79
Pérdida Relativa [%]	0.00	0.23	1.06	4.08	0.00	0.87	3.77	10.10

En base a los resultados de la búsqueda de información relacionada a eventos de lluvia se han seleccionado, para la calibración y validación del modelo, dos eventos de importancia; un evento extraordinario ocurrido en Abril de 1986 y un último evento de importancia ocurrido en Marzo de 2007. En todos los casos los caudales máximos han sido reproducidos con un error máximo de 5 %; y el tiempo al pico con un error máximo del 10%. Los parámetros resultantes de la calibración resultaron: coeficiente de rugosidad en sectores valle: $0.10 \text{ s/m}^{1/3}$; coeficiente de rugosidad en cursos: $0.040 \text{ s/m}^{1/3}$; pendiente transversal de almacenamiento en celda: 0.025 m/m; coeficiente de descarga para desborde sobre terraplenes: 0.2; coeficiente de descarga alcantarillas: 0.8-0.9.

A partir de TG250 se simuló una lluvia neta de 0.5 mm/h y de larga duración ($t = 600 \text{ hs}$) para obtener

el almacenamiento de equilibrio. Para las demás discretizaciones (TG500, TG1000 y TG2000) se simuló la misma lluvia neta y se escalaron los parámetros nv e ITA (Tabla 6).

Tabla 6.- Escalamiento de parámetros (nv e ITA) para los diferentes tamaños de grilla.

	TG250	ESCALADO DE nv			ESCALADO DE ITA		
		TG500 _{nv}	TG1000 _{nv}	TG2000 _{nv}	TG500 _{ITA}	TG1000 _{ITA}	TG2000 _{ITA}
nv [s/m ^{1/3}]	0.100	0.115	0.130	0.175	0.100	0.100	0.100
ITA [m/m]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.021	0.019	0.016

Se simularon una serie de eventos observados y sintéticos. Los eventos sintéticos han sido de las siguientes características: Duraciones de lluvia de 3 hs, 5 hs 10 hs y 20 hs e intensidades de lluvia neta de 3 mm/h, 8 mm/h y 15 mm/h. Todos los eventos se simularon para la discretización de mayor nivel de detalle (TG250) y para las demás discretizaciones (TG500, TG1000, TG2000). Se realizaron un total de 84 simulaciones, correspondientes a 12 eventos por 7 simulaciones por evento. Se toma la discretización correspondiente a TG250 como base para la comparación en términos de similitud hidrológica. Para la cuantificación del grado de similitud en las respuestas obtenidas de las diferentes variables analizadas se utilizó el coeficiente de eficiencia R²X; ecuación [2].

El escalamiento del coeficiente de resistencia del valle arrojó los siguientes resultados: Valores máximos de R²Q de 0.99 para TG250-TG500 (Evento de 3mm/h y 3hs) y mínimos de 0.84 para TG250-TG2000 (Evento de 5mm/h y 20hs). Para las velocidades de flujo (R²Vel) se obtuvieron las siguientes similitudes: valores máximos de 0.97 para TG250-TG500 (Evento de 3mm/h y 3hs) y valores mínimos de 0.81 para TG250-TG2000 (Evento de 5mm/h y 20hs). Respecto a las alturas de flujo (R²H) se obtuvieron valores máximos de 0.97 entre TG250-TG500 (Evento de 3mm/h y 3hs) y 0.83 al pasar de TG250 a TG2000 (5mm/h y 20hs).

Los resultados de similitud al escalar la pendiente transversal en celda son: R²Q variando entre 0.99 al pasar de TG250 a TG500 (Evento 3mm/h y 3hs) y 0.84 para TG250-TG2000 (Evento 5mm/h y 20hs). Para los valores de R²Vel se obtuvo 0.97 de máximo para TG250-TG500 (Evento 3mm/h y 3hs) y 0.81 para TG250-TG2000 (Evento 5mm/h y 20hs). La similitud en alturas de flujo arrojó valores máximos de 0.98 para TG250-TG500 (Evento 3mm/h y 3hs) y mínimo de 0.83 para TG250-TG2000 (Evento 5mm/h y 20hs).

En la Figura 6 se presentan las relaciones obtenidas al vincular las pérdidas del contenido de información en términos de pendientes locales (Pérdida Relativa de Entropía-Tabla 5) conjuntamente con el grado de similitud alcanzado en términos de R²H.

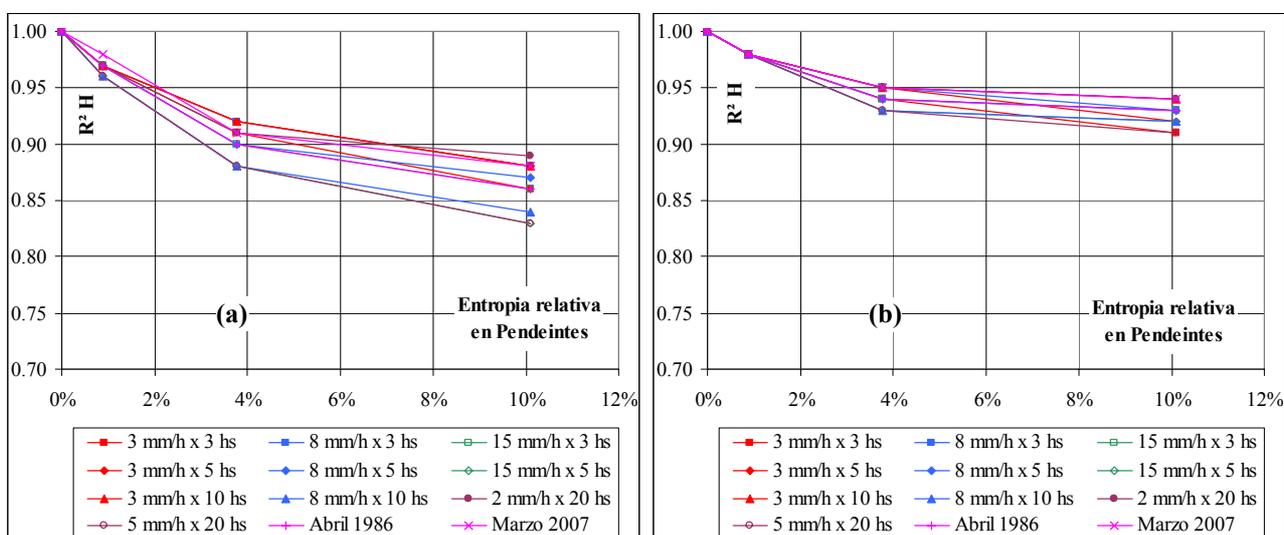


Figura 6.- Entropía Relativa en pendientes vs. R²H. a) Escalamo nv; b) Escalamo ITA.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Características generales a nivel de cuenca.

En las tres cuencas estudiadas se observa que el área de las mismas no se modifica con el tamaño de grilla; esto es debido a que el modelo permite definir explícitamente las celdas que definen la cuenca. Se adoptó como criterio conservar el área de la cuenca para las diferentes discretizaciones.

Respecto a la reproducción de la longitud de los cursos para los tamaños de grilla mayores; se observa que la misma disminuye al incrementarse el tamaño de grilla. Tal efecto se debe a que los tamaños de grilla mayores no permiten reproducir la sinuosidad de los cursos que conforman la red. La reducción de la densidad de drenaje al incrementarse el tamaño de grilla se debe a la reducción de la longitud representada de los cursos y a que no se produce alteración en la representación del área de la cuenca.

Respecto a la pendiente longitudinal sobre el curso principal no se observa una tendencia definida en función de los resultados obtenidos; la pendiente longitudinal media sobre el curso principal depende de la diferencia entre cotas extremas y de la longitud del mismo. Estos valores se modifican al incrementar el tamaño de la grilla. A medida que se incrementa el tamaño de grilla la diferencia entre cotas sobre el curso principal se reduce (por efecto de agregación topográfica) y que la longitud del curso principal también se reduce (por efecto de pérdida en la representación de las sinuosidades); pero el grado en que ambas se modifican no es el mismo; lo que resulta en que el valor de la pendiente media permanezca invariable o se modifique con el tamaño de grilla.

Los valores del almacenamiento potencial en cursos por unidad de longitud no se modifican con el tamaño de grilla. Se observan valores elevados en la cuenca del A° Saladillo respecto a los valores obtenidos en la cuenca del A° Santa Catalina.

Alteraciones en atributos distribuidos espacialmente y variación de entropía.

Es posible observar en las tres cuencas que por efecto del incremento del tamaño de la grilla se produce una disminución de la cota máxima y un incremento de la cota mínima. Este efecto es debido a que a medida que se incrementa el tamaño de la grilla se produce el agregamiento de los valores de cotas del terreno; obteniéndose una cota representativa del esquema de mayor tamaño de grilla con valores altimétricos intermedios sin poder reproducir los valores extremos del esquema de menor tamaño de grilla. En términos de las modificaciones en las pendientes locales en celdas para los diferentes tamaños de grilla es posible indicar que se encuentra la misma tendencia en los resultados para las tres cuencas. A medida que se incrementa el tamaño de la grilla se reduce el valor de la pendiente máxima y se reduce el valor promedio de las pendientes locales.

Al incrementarse el tamaño de grilla se reducen los valores de entropía en cotas y pendientes. Dicho resultados se conservan en las tres cuencas analizadas; a su vez, la pérdida relativa de entropía se incrementa al pasar de cotas a pendientes. Los resultados anteriores reflejan que el efecto de agregación del sistema se traduce en la reducción de la variabilidad espacial de los atributos analizados (cotas y pendientes); resultando en la pérdida de reproducción de los mismos y generando relieves en donde no es posible lograr el mismo grado de variación espacial a medida que se incrementa el tamaño de la grilla.

Escalamiento de parámetros y Similitud hidrológica.

En la Figura 7 se muestran las relaciones experimentales obtenidas como resultado del escalamiento de los parámetros en función del tamaño de grilla para las tres cuencas analizadas utilizando como criterio el de conservar el almacenamiento de equilibrio en la cuenca entre la discretización de mayor nivel de

detalle y los esquemas agregados (Tabla 2 cuenca del A° Ludueña, Tabla 4 cuenca del A° Santa Catalina y Tabla 6 cuenca del A° Saladillo). Respecto a los resultados del escalamiento de parámetros; en primer lugar se observa que resulta necesario incrementar los coeficientes de resistencia del valle 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. Los parámetros escalados (nv e ITA) para los tamaños de grilla más grandes son el resultado del efecto conjunto de la agregación, tanto de la topografía como de las relaciones de almacenamiento y traslado en cada celda del modelo.

Conjuntamente se presentan las ecuaciones que representan las curvas obtenidas en forma experimental para las tres cuencas y ambas alternativas de escalamiento de parámetros. Los mejores resultados se obtienen con el ajuste de una ecuación tipo lineal para el caso del escalamiento del coeficiente resistencia del valle y una ecuación tipo potencial para el caso del escalamiento de la pendiente transversal en celda.

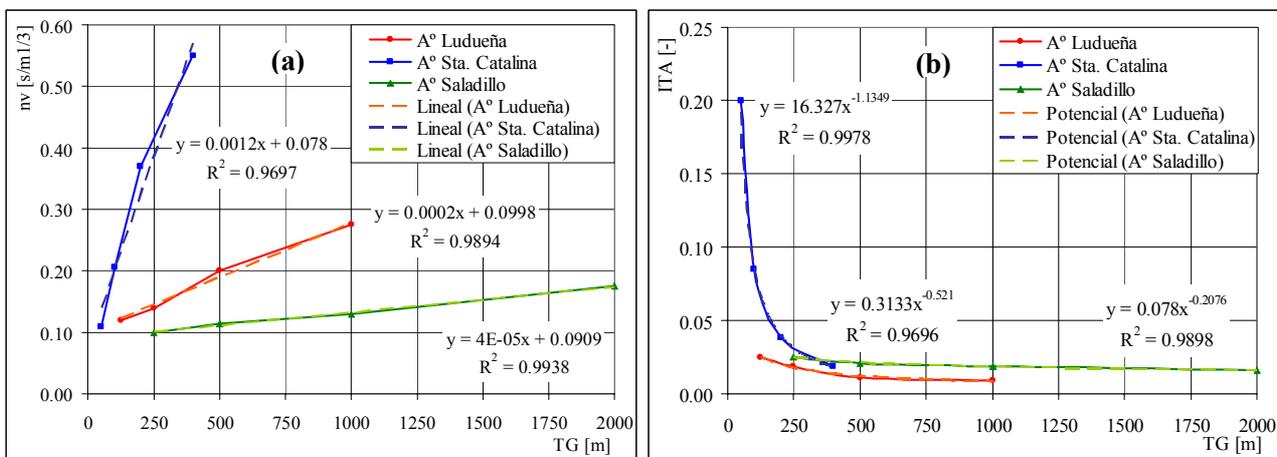


Figura 7.- Relaciones de escalamiento de parámetros para las tres cuencas analizadas y ecuaciones representativas. a) Escaleo del coeficiente de resistencia del valle (nv) y b) Escaleo de la pendiente transversal en celda (ITA).

Respecto al grado de similitud en las respuestas hidrológicas logrado entre el esquema de detalle y los esquemas agregados, mediante el escalamiento de los parámetros, cuantificado por el coeficiente R^2X , es posible indicar que en forma general para las tres cuencas se obtienen:

- resultados similares en términos de reproducción de caudales máximos en todo el dominio espacial mediante ambas propuestas de escalamiento; si bien los mejores resultados, en forma poco significativa, se obtienen mediante el escalamiento de la pendiente transversal de almacenamiento.
- resultados similares en términos de velocidades de flujo ya sea mediante el escalamiento del coeficiente de resistencia del valle como de la pendiente transversal en celda.
- mejores resultados en términos de alturas de agua en celdas mediante el escalamiento de la pendiente transversal en celda respecto al escalamiento del coeficiente de resistencia del valle. La diferencia en los resultados de similitud de alturas de agua obtenidas a partir del escalamiento del coeficiente de resistencia del valle respecto al escalamiento de la pendiente transversal en celda es notable en la cuenca del A° Santa Catalina; siendo dicha diferencia menos significativa en la cuenca del A° Saladillo.

El efecto expuesto precedente puede ser explicado teniendo en cuenta lo siguiente:

- El modelo matemático utilizado permite definir en forma explícita las características de los cursos de agua; es decir, es posible asignar en cada celda río las características geométricas e hidráulicas de la sección de escurrimiento del cauce principal. Esta definición no se modifica con el tamaño de la grilla;

por lo que en las diferentes discretizaciones espaciales las características geométricas e hidráulicas de los cursos se conservan. Según esta consideración al ingresar a una celda río un determinado caudal, la altura de agua asociada al mismo será similar en el esquema agregado independientemente de si se realizó el escalamiento del coeficiente de resistencia del valle o la pendiente transversal de almacenamiento. La afirmación precedente es válida si no existen desbordes masivos de las secciones de los cursos de forma tal que comience a tener influencia el sector valle aledaño al curso. De aquí surge, además, que el escalamiento de parámetros propuesto tiene efectos sobre la propagación del escurrimiento en los sectores del valle de la cuenca; y no afecta mayormente el escurrimiento dentro de los cursos de agua propiamente dicho.

- La cuenca del A° Saladillo; a diferencia de la cuenca del A° Santa Catalina, posee una elevada capacidad de almacenamiento en los cursos de agua que componen la red de escurrimiento.

Según lo expuesto, en la cuenca del A° Saladillo en comparación a la cuenca del A° Santa Catalina, tiene una influencia mayor la concentración de escurrimiento en los cursos de agua debido principalmente a su capacidad de conducción; lo que genera similares alturas de agua en los esquemas agregados ya sea mediante el escalamiento del coeficiente de resistencia del valle o la pendiente transversal de almacenamiento; y se traduce en diferencias menos significativas en términos del coeficiente R^2H entre ambas propuestas de escalamiento de parámetros.

El parámetro que cuantifica la capacidad de almacenamiento en cursos por unidad de longitud resulta un indicador, a priori, a la hora de caracterizar un determinado sistema hídrico, ya que según los resultados obtenidos en las cuencas analizadas, se observa que para valores elevados de esta propiedad (cuenca del A° Saladillo), los efectos del escalamiento de parámetros (nv o ITA) generan diferencias en términos de similitud de alturas de agua menos significativas que en el caso de valores más reducidos (cuenca del A° Santa Catalina).

CONCLUSIONES

La agregación del sistema a modelar, mediante la modificación del tamaño de grilla, genera alteraciones tanto de las características derivadas del relieve como de las respuestas hidrológicas.

El efecto primario de la agregación (incremento del tamaño de grilla) sobre las características derivadas de la topografía es la de generar una representación más atenuada del relieve, con pendientes locales máximas y medias menores y una reducción de las longitudes de cursos a medida que aumenta el tamaño de grilla. La cuantificación de la pérdida de información topográfica se traduce en una reducción de la entropía al incrementarse el tamaño de grilla.

Respecto a la similitud en las respuestas hidrológicas, mediante el escalamiento de los parámetros, en términos de caudales, velocidades y alturas de agua se observa que la pérdida de información debido al proceso de agregamiento espacial por aumento del tamaño de grilla se traduce, inevitablemente, en la reducción del grado de similitud alcanzado (disminución del coeficiente R^2N).

Aplicando el concepto de conservar alguna propiedad característica de la respuesta hidrológica de la cuenca entre los diferentes niveles de resolución espacial, como por ejemplo el almacenamiento de equilibrio, es posible proceder al escalamiento de los parámetros.

En las cuencas analizadas, los resultados indican que a medida que aumenta el tamaño de la grilla es necesario incrementar los valores de resistencia del valle (nv) o bien disminuir los valores de la pendiente trasversal en celdas (ITA). El escalamiento de la pendiente trasversal en celda permite obtener mejores resultados en términos de similitud hidrológica, principalmente en términos de alturas de agua en celda entre los diferentes esquemas, respecto al escalamiento del coeficiente de resistencia

del valle. Asimismo permite preservar el concepto físico del coeficiente de resistencia al escurrimiento; el cual es ampliamente utilizado y puede ser obtenido de tablas de uso habitual.

Una adecuada 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 alturas de aguas en celdas permite, por ejemplo, representar apropiadamente la extensión de superficies inundadas; como así también representar adecuadamente procesos de erosión-sedimentación espacialmente distribuidos. Efectivamente, el valor de altura de flujo es una variable importante en la formulación de procesos tales como la disgregación de suelo por impacto de gotas de lluvia, disgregación por flujo sobre el terreno, transporte, etc.

La relación entre el almacenamiento potencial en cursos por unidad de longitud es indicativa de la influencia de la red de cursos sobre las respuestas hidrológicas. El escalamiento del coeficiente de resistencia al escurrimiento en esquemas agregados no resultó adecuado para obtener similitud en términos de alturas de agua en celdas en cuencas donde la capacidad de almacenamiento en cursos por unidad de longitud es reducida (valores menores a 6.2 m³/m), como el caso de la cuenca del A° Santa Catalina.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el financiamiento parcial en equipamiento, viajes y viáticos e insumos proveniente de los Proyectos PICTO 2004 N° 23187 del FONCYT y PIP N° 5308 del CONICET.

La información topográfica e hidrológica correspondiente a la cuenca del A° Santa Catalina fue brindada por el Instituto de Hidrología de Llanuras (Buenos Aires, Argentina).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blöschl, G. and M. Sivapalan** (1995). "Scale issues in hydrological Modelling: A Review". *Hydrological Processes*. Vol. 9, pp. 251-290.
- Cazenave, G.** (2006). *Modelación Numérica del Escurrimiento Superficial de la cuenca del A° del Azul: Aplicación de Modelos Agregados y Distribuidos*. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos en Zonas de Llanura. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. 114 p.
- Dooge, J.** (1986) "Looking for hydrologic laws." *Water Resources Research*. Vol. 22. (9). pp 46S-58S.
- Goodrich, D.** (1990). "Basin Scale and Runoff Model Complexity." Technical Report HWR 91-010(1990). Technical Reports Natural Resources Systems. Tucson, Arizona, 1990.
- Goodrich, D., Grayson, R., Willgoose, G., Palacios-Valez, O. and Blöschl, G.** (2003) "The Effect of Catchment Discretization on Rainfall-Runoff Model Predictions." *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 5, pp. 12551.
- Nash, J. and J. Sutcliffe** (1970). "River flow forecasting through conceptual models, I-A discussion of principles". *Journal of Hydrology* Vol. 10, pp. 282-290.
- 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, pp. 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. Villa Carlos Paz, Argentina. CD-ROM ISBN 987-20378-1-7. Cap. Hidrología Superficial y Subterránea. T33. pp. 1-10.
- Stenta, H., Riccardi, G. y Basile, P.** (2008). "Influencia del Grado de Discretización Espacial en la Respuesta Hidrológica de una Cuenca de Llanura mediante Modelación Matemática Distribuida." *Ingeniería Hidráulica en México*. ISSN-0186-4076. Volumen XXIII, Num. 3, Julio-Setiembre 2008.
- Vieux, B.** (1993). "DEM aggregation and smoothing effects on surface runoff modelling." *Journal of Computing in Civil Engineering*. Vol. 7, No. 3. pp 310-338.
- Wu, Y., Yevjevich, J. y Woolhiser, D.** (1978) "Effect of Surface Roughness and Its Spatial Distribution on Runoff Hydrographs." Hydrology Paper N° 93. Colorado State University, Fort Collins, CO, 1978.
- Zaghloul, N.** (1983). "Sensitivity análisis of the SWMM runoff-transport parameters and the effects of catchment discretization." *Advances Water Resources*, Vol. 6, Dec. 1983. pp. 214-223.