

El coeficiente de Manning y el cambio de precisión de los MDT en la simulación hidráulica

INTRODUCCIÓN

El archipiélago cubano se encuentra situado en el Mar Caribe y próximo al límite oriental del Golfo de México perteneciente a la cuenca oceánica del Atlántico Norte. Esta zona geográfica clasifica en el cuarto lugar mundial en cuanto a la formación de ciclones tropicales, lo que provoca importantes escurrimientos que se convierten en avenidas, uno de los más importantes fenómenos naturales que padece Cuba. En el país existe una relación directa e inmediata entre intensidad y duración de las lluvias y magnitud de las avenidas correspondientes, situación que evidencia la gran influencia de estos fenómenos atmosféricos en la formación de una crecida.

En la actualidad, con los modelos matemáticos de simulación hidráulica de inundaciones, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que nos ofrezcan cierto grado de confianza y seguridad a la hora de tomar decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a nuestros ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. No obstante, una amplia investigación bibliográfica relacionada con el tema demuestra que la forma de la superficie del agua depende, en gran medida, del valor de la pendiente del fondo, la geometría de la superficie del terreno y la estimación del n de Manning.

Este último, se considera como el principal parámetro que se debe calibrar en la simulación, ya que no existe ningún método exacto para su selección, pues depende de muchos elementos que están relacionados entre sí, como son: rugosidad superficial, vegetación, irregularidad del canal, alineación del canal, sedimentación y socavaciones, obstrucciones, tamaño y forma del canal, nivel de agua y caudal, cambios estacionales, material en suspensión y carga del fondo.

Resumen / Abstract

Se analizó el efecto combinado de la variación del coeficiente "n" de Manning y la escala de los planos en la simulación hidráulica. Se crearon cuatro Modelos Digitales del Terreno (MDT): tres, a partir de cartografía vectorial de curvas de nivel a varias escalas, y uno, obtenido de un levantamiento con GPS y una Estación Total. Se generaron doce casos diferentes de simulación, combinando los cuatro MDT con tres coeficientes "n": máximos, medios y mínimos. La variación del coeficiente "n" tiene mayor influencia en los resultados cuanto más resolución presenta el modelo cartográfico, pues se observó mayor desigualdad al utilizar la cartografía más precisa (GPS y Estación Total), y menor influencia empleando MDT a escala 1: 100 000.

Palabras clave: coeficiente de Manning, HEC-RAS, simulación hidráulica, inundaciones, SIG, MDT.

The effect over hydraulic simulation due to the combined variation of Manning's coefficient and the map scale was studied in this research. Four Digital Elevation Models (DEM) were created from different sources: three of them based on maps of different scales and the other one derived from surveying with GPS and a Total Station. Twelve different simulation cases were generated by combining the four DEM with three different "n" values: maximum, mean and minimum. According to the study, the variation of the "n" values has a greater influence on the simulation results for those maps presenting a greater resolution, say, a greater quality of detail was got when the more precise model was used (GPS and a Total Station) and less influence for maps built to 1:100 000 scale.

Keywords: Manning's coefficient, HEC-RAS, hydraulic simulation, floodings, GIS, DEM.

En este sentido León (2000) menciona una interesante encuesta llevada a cabo por Burham en 1990 a ochenta profesionales con diez situaciones diferentes para calcular n . Como caso positivo se menciona que el 54% de ellos recomendaron valores de n entre 0,01 y 0,02, el 46%, entre 0,02 y 0,03; y como caso más discrepante, aquel en que los resultados variaron entre 0,01 y 0,1. Es por esa razón que debe, en todos los casos posibles, estimarse n por varios métodos y llegar a una conclusión final con una valoración técnica y económica de lo que implica uno u otro valor.

Existe gran cantidad de trabajos con importantes valoraciones sobre la estimación de un valor de n representativo. Entre ellos se pueden citar los trabajos de León (2000), León y Estopiñán (1989), Chanson (1999), Amemiya y Echávez (2004) y Weber (2003), en los que se exponen muchas de las tablas, ecuaciones y métodos gráficos más utilizados para estimar la n de Manning, así como sus limitaciones. En estos se evidencia que dicho valor depende de la fórmula propuesta según cada autor y de las características particulares de las corrientes (ancho, granulometría, pendiente, etc.), ya que en algunos casos, la n es muy sensible a la pendiente y, en otros, al radio hidráulico o a la granulometría de fondo. Pero definitivamente lo más utilizado en la práctica son las tablas de Chow (2004) y las fotos expuestas por Barnes (1967), ya que el especialista lee la descripción que aparece en las tablas o, en el segundo caso, observa las fotos representativas del canal y la descripción del mismo y puede así identificar los valores que mejor se ajustan a su caso.

Por otro lado, diversas investigaciones abordan el efecto de la resolución espacial en modelos de simulación de inundación como los de Werner (2001), Bates y De Roo (2000), Marks y Bates (2000), Hardy et al. (1999), Horritt y Bates (2001b), Omer et al. (2003), Horritt (2000), y Casa et al. (2005). En general en ellos se manifiesta que la influencia de la topografía, tanto del cauce como de la llanura de inundación, constituye el factor limitante más importante en la modelación hidráulica y su representación como variable de entrada al modelo determina en gran medida la hidráulica de la crecida modelada y la extensión del área inundada. Es, por tanto, necesario, llevar a cabo un análisis de la influencia que ejerce en la simulación hidráulica de inundaciones fluviales la variación del coeficiente n de Manning en combinación con el uso de diversas bases cartográficas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La investigación se desarrolló en el tramo del río Baconao comprendido entre el afluente el Indio y la estación hidrométrica Trucucú. La cuenca que tributa al río, se localiza al este de la ciudad de Santiago de Cuba, en la

vertiente norte de la Sierra de la Gran Piedra. Limita al norte y al este con la cuenca del río Guantánamo; al noroeste, con la cuenca del río Guaninicún; al oeste, con la cuenca del río San Juan y al sur, con el río La Anita, afluente del propio Baconao (figura 1).



Figura 1. Ubicación del tramo de río en estudio.

El tramo de río en estudio, presenta una longitud de 642 m con una pendiente media del cauce de 0,0018 m/m. El cierre de la estación se encuentra ubicado en las coordenadas Norte: 152.1 y Este: 637.7; hasta este punto la cuenca presenta una superficie de 167.8 km², perímetro de 84.68 km y una pendiente media de 343 ‰. El tramo de río exhibe una topografía empinada, donde se define, a simple vista, el límite entre el cauce principal y las llanuras de inundación. El caudal máximo registrado en dicha estación, ocurrió el 4 de Octubre de 1963, durante el paso del ciclón Flora, con un valor de 1109 m³/s, y elevó el nivel del agua a una altura de 6.7 m.

Estimación del coeficiente de Manning

A partir de la observación de una imagen de satélite geo-referenciada de la zona (figura 2), de los apuntes y fotos de campo, tablas tomadas de Chow (2004) e imágenes de Barnes (1967) se procedió a estimar los valores de la n de Manning.

La imagen del satélite, los apuntes y fotos de campo, se utilizaron para definir la frontera entre el cauce principal y las llanuras de inundación, y así determinar los tramos donde las características del río variaron de forma significativa. Hecho esto se decidió dividir el río en dos tramos, con el objetivo de poder determinar los valores de n en cada uno.

Para estimar los valores de n de cada tramo y definir valores máximos, normales y mínimos que se deben tener en cuenta en la simulación, se relacionaron las tablas de Chow (2004) con los apuntes y fotografías de campo, como se muestra a continuación (tablas 1 y 2).



Figura 2. Representación de la frontera entre las llanuras de inundación y el cauce principal.

Tabla 1. Valores de *n* de Manning en el tramo I. Fuente Chow (2004).

tramo I	mínimo	normal	máximo	descripción
Cauce	0.025	0.030	0.033	Cauce limpio, recto y sin pocetas.
Ll izq.	0.025	0.030	0.035	Valle con pasto corto y sin arbustos.
Ll der.	0.025	0.030	0.030	Valle con pasto corto y sin arbustos.

Tabla 2. Valores de *n* de Manning en el tramo II. Fuente Chow (2004).

tramo II	mínimo	normal	máximo	descripción
Cauce	0.030	0.035	0.040	Recto con piedras y bancos de arena.
Ll izq.	0.040	0.060	0.080	Pocos matorrales y árboles en verano.
Ll der.	0.040	0.060	0.080	Pocos matorrales y árboles en verano.



Figura 3. Imágenes de las llanuras de inundación, derecha e izquierda respectivamente, del tramo I

Para poder corroborar estos valores se aplicó un segundo método: se estableció una comparación de imágenes del tramo de estudio con fotos de ríos obtenidas del libro «Roughness characteristics of natural channels» de Barnes (1967). Estas imágenes, recolectadas de diferentes fuentes, muestran una breve descripción del río y son presentadas en orden ascendente con respecto a la magnitud de los valores de n . Al establecer la comparación de las fotografías del río correspondientes al tramo I (figura 3) con las imágenes propuestas por Barnes que más se asemejan a dicho tramo (figura 4), se puede apreciar que el valor mínimo de n conseguido en las tablas concuerda con el que se expone en las fotos de Barnes.

Cuando se estimó el valor medio de n mediante las fotos, se obtuvo como resultado un coeficiente de 0.026 y, a través de las tablas, aumentó a 0.030. Por lo que se decidió escoger un valor de 0.028 en el cauce para garantizar que la rugosidad fuera menor que en las llanuras de inundación. El valor máximo que puede esperarse utilizando el método de comparación fotográfica es de 0.032, el cual se encuentra ligeramente por debajo del que se obtiene a través del uso de tablas que, en este caso, es de 0.033 en el cauce y de 0.035 en las llanuras; no obstante, se decidió emplear estos últimos.

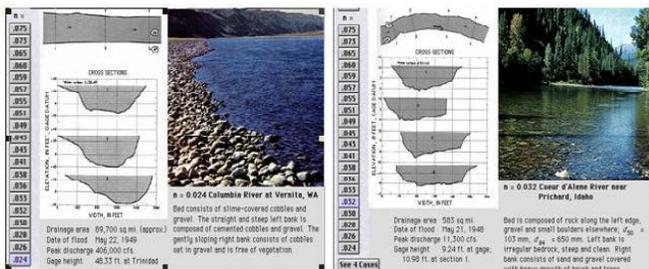


Figura 4. Fotografías extraídas de Barnes (1967), semejantes al tramo I, con valores de n mín y máx.

Realizando la misma comparación en el tramo de estudio II (figura 5), se puede reconocer que el valor mínimo de la tabla coincide también con el que se alcanzaría mediante la comparación de fotos (figura 6).



Figura 5. Imágenes de las llanuras de inundación, derecha e izquierda respectivamente, del tramo II.

En este caso, el valor medio encontrado en las fotografías es 0.051 y mediante la utilización de las tablas se obtiene prácticamente el mismo valor (0.0518). Se destaca además que dicho resultado es el que mejor se ajusta a las condiciones del tramo al tener en consideración las semejanzas visuales y las descripciones del lugar. Por otra parte, esta situación no se manifiesta igual al buscar el valor máximo de n , pues mediante la comparación de fotografías da 0.055, resultado que es mucho menor que el que aparece en las tablas. Por tanto, se determinó reducir el valor de las tablas correspondiente a las llanuras de inundación de 0.08 a 0.07 para garantizar un valor de rugosidad acorde con el estimado a partir de las fotos.

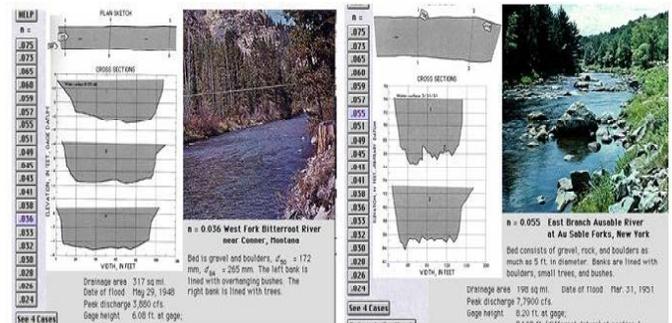


Figura 6. Fotografía extraída de Barnes (1967), semejantes al tramo II, con valores de n mín y máx.

Finalmente los valores estimados en ambos tramos quedaron reflejados en las tablas 3 y 4

Tabla 3. Valores de n de Manning estimados en el tramo I.

Tramo I	mínimo	normal	máximo
Cauce	0.025	0.028	0.033
Ll izq.	0.025	0.030	0.035
Ll der.	0.025	0.030	0.035

Tabla 4. Valores de n de Manning estimados en el tramo II.

Tramo II	mínimo	normal	máximo
Cauce	0.030	0.035	0.040
Ll izq.	0.040	0.060	0.070
Ll der.	0.040	0.060	0.070

MODELACIÓN DEL TERRENO

Como ya se ha explicado, en la mayoría de las fuentes consultadas sobre temas relacionados con el cálculo de curvas superficiales en conducciones libres, se enfatiza en la importancia de la adecuada estimación de la n de Manning como un factor determinante en los resultados. Sin embargo, con este trabajo se ha evidenciado que otro elemento de vital relevancia en estos cálculos, lo constituye la precisión del Modelo Digital del Terreno (TIN) que se utilice para representar el cauce del río y las llanuras de inundación, por lo que sería conveniente conocer la

influencia de la n de Manning en los resultados de la simulación, específicamente en el cálculo de la altura que alcanza el agua con respecto al fondo de río a medida que se varían los caudales y se disminuye la escala de la cartografía vectorial de curvas de nivel empleada para representar el terreno. Con ese propósito se construyeron tres TIN para representar el relieve, a partir de las cartografías más utilizadas en Cuba: 1: 10 000, 1: 25 000 y 1: 100 000. Estas se obtuvieron en la empresa GeoCuba Oriente Sur a través de la agencia Catastro.

Es importante resaltar que cualquier proceso de generalización manual introduce errores en los mapas tradicionales, los cuales se trasladan posteriormente a los sistemas de información geográfica (SIG) cuando son convertidos al formato digital. El origen de estos errores puede ser muy diverso; los mismos pueden estar provocados por los procesos de generalización cartográfica, por la vectorización y rasterización de datos; por los cambios de escala, entre otros.

Tal posibilidad hace necesario conocer la precisión de los planos con que se trabaja, pues, como los errores son consustanciales a los propios datos, obviamente, los SIG no pueden obtener resultados con una resolución de salida mejor que la de entrada.

Por todo lo antes expuesto, se construyó un quinto TIN, para establecer un análisis más preciso al que se obtendrían por la utilización de los cuatro modelos del terreno antes mencionados. Con este objetivo se escogieron como datos de entrada, los puntos obtenidos en un levantamiento de alta resolución, con GPS en conjunto con una Estación Total en el tramo de río en estudio para garantizar la precisión que se requería, (figuras 7 y 8). Dicho levantamiento se llevó a cabo por la Agencia Catastro, en el que se utilizó un GPS Leyca sr20 en modo diferencial y una Estación Total Leyca tps 805, con un alcance 1500/2000 m y una precisión 10 mm ppm + 2 mm.

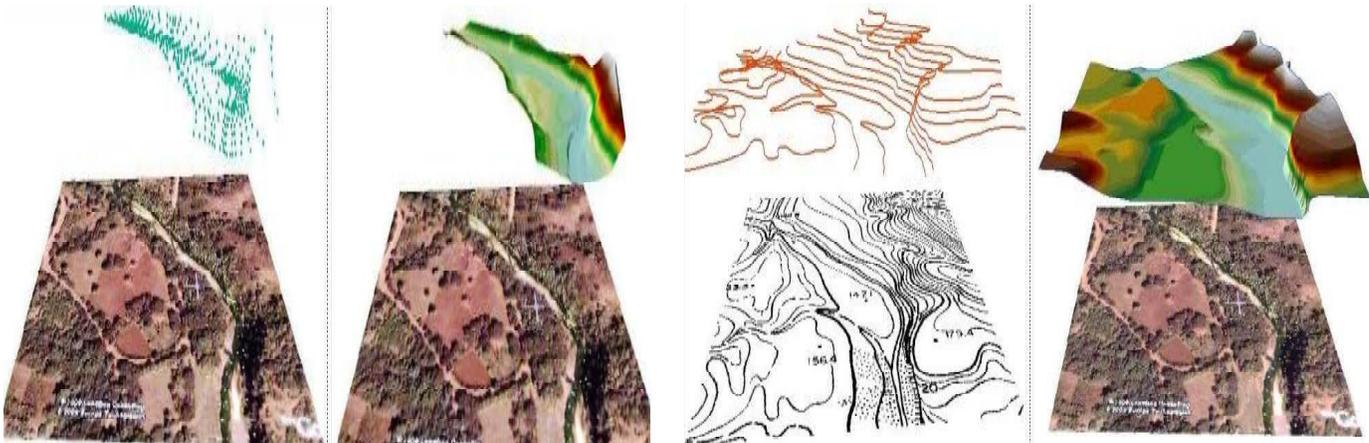


Figura 7. Puntos medidos con el GPS y la Estación Total, y curvas de nivel del plano 1: 10 000 así como los Modelos Digitales del Terreno contruidos a partir de ellos.



Figura 8. Curvas de nivel de los planos 1:25 000 y 1: 100 000 así como los Modelos Digitales del Terreno contruidos a partir de ellos.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para realizar este tipo de estudio fue necesario generar doce casos diferentes de simulación, los cuales fueron obtenidos de la combinación de los cuatro TIN con los tres coeficientes de n de Manning (máximos, medios y mínimos). Finalmente, se establecieron comparaciones entre los resultados alcanzados en la simulación cuando se emplearon los valores máximos y mínimos de n de Manning, con los obtenidos al utilizar los valores medios, recurriendo en cada caso a un mismo modelo cartográfico, así como a los caudales al 1%, 5% y al 20% de probabilidad de ocurrencia.

Como se puede distinguir en la tabla 5, cuando se escogieron valores máximos de n de Manning (equivalentes a un 14% y 17% por encima del valor de n medio aproximadamente) y se empleó el TIN construido a partir de los datos de campo (GPS y Estación Total), se produjo la mayor divergencia entre estos valores de altura del agua (entre un 15% y 19%) con respecto a los calculados cuando se utilizaron los valores de n medios y las mismas condiciones. Sin embargo, resalta el hecho de que el EMC fue disminuyendo paulatinamente a medida que se redujo la precisión de los planos empleados para representar el terreno, hasta llegar a obtenerse un error mínimo de 0.00 m para los tres caudales con el uso del TIN proveniente del plano 1: 100 000.

Tabla 5. Error Medio Cuadrático (m) en la determinación de la altura del agua al emplear valores de n máximos y caudales al 20, 5 y 1% de probabilidad.

Q (m ³ /s)	Cartografía			
	GPS	1: 10 000	1: 25 000	1: 100 000
436	0.15	0.06	0.02	0.00
714	0.17	0.06	0.02	0.00
1022	0.19	0.07	0.03	0.00

En una segunda parte de este análisis se efectuó la comparación de la altura de la lámina de agua calculada al utilizar valores de n de Manning medios y mínimos, (estos últimos estuvieron entre un 15% y 30% por debajo de los n medios) y, como era de esperarse, se encontró el mismo comportamiento en la tendencia de los resultados. Una vez más, las mayores diferencias (entre un 17% y 25%) se produjeron cuando se empleó el TIN elaborado con los datos obtenidos del levantamiento con GPS y Estación Total. Asimismo, los menores errores se fueron provocando al usarse los planos de menores escalas, hasta el punto de obtenerse nuevamente un error de 0,00 m cuando se utilizó el 1:100 000.

A la vez se evidencia nuevamente que al aumentar el caudal se incrementó el EMC solamente cuando se trabajó con el levantamiento con GPS y Estación Total pues, como se demostró anteriormente, a medida que se utilizaron los TIN menos precisos, este se fue reduciendo

hasta hacerse cero. Dicho planteamiento se puede corroborar al analizar los datos expuestos en la tabla 6, donde se aprecia claramente que al utilizar el MDT más preciso y aumentar el caudal de 436 m³/s hasta 1022 m³/s se produjo el mayor incremento del error (de 0.17 hasta 0.25 m). Sin embargo, con el uso de las cartografías vectoriales de curvas de nivel, dicho error se mantuvo constante ante la variación del caudal; solamente la pérdida de resolución del plano utilizado forzó su disminución.

Es importante resaltar que en el caso de emplear el MDT más preciso (GPS y Estación Total), el por ciento del EMC en la determinación de la altura del agua varió en correspondencia con el por ciento en que aumentó o disminuyó la n de Manning, pues con n entre un 15% y 30% (n mínimo) aproximadamente por debajo de los n medios, se obtuvo un error entre un 17% y 25%, y cuando se emplearon valores de n entre 14% y 17% (n máximo) por encima del valor de n medio, se obtuvo un error alrededor de un 15% y 19%.

En general se puede afirmar que, independientemente del caudal utilizado, una modificación del coeficiente de Manning tiene mayor influencia en los resultados de la simulación cuanto más resolución presente el modelo cartográfico empleado, pues se observó una mayor variación en el cálculo de la altura del agua al utilizar la cartografía elaborada a partir de los datos de campo (GPS y Estación Total), pero, al emplear los TIN construidos con la cartografía vectorial de curvas de nivel, el error fue disminuyendo a medida que la precisión de los planos se redujo. De esta manera se revela que tiene más importancia en los resultados de la simulación la precisión del TIN que la estimación del coeficiente de Manning.

Tabla 6 Error Medio Cuadrático (m) en el cálculo de la altura del agua para un valor de n mínimo y caudales con probabilidades al 20, 5 y 1%.

Q (m ³ /s)	Cartografía			
	GPS	1: 10 000	1: 25 000	1: 100 000
436	0.17	0.07	0.03	0.00
714	0.21	0.07	0.03	0.00
1022	0.25	0.07	0.03	0.00

CONCLUSIONES

1. Se realizó una recopilación bibliográfica lo más amplia posible sobre el tema, y se conformó un documento que incluye trabajos destacados con relación a los métodos y técnicas más empleados hoy día para estimar la n de Manning. Se considera que esta recopilación es útil para lograr una amplia perspectiva de los diversos modos de analizar el problema.

2. En general puede observarse que para cualquier caudal, una misma modificación del coeficiente de Manning tiene mayor influencia en los resultados de la simulación cuanto más detalle presente el modelo

cartográfico empleado. Entre los TIN utilizados, se ha observado mayor desigualdad en la cartografía elaborada a partir del levantamiento hecho con GPS y Estación Total (EMC ~ 0,25 m) y una menor influencia en el modelo construido a partir de curvas de nivel a escala 1: 100 000 (ECM ~ 0,00 m). lo que señala que tiene más relevancia en los resultados de la simulación la precisión del MDT que la estimación del coeficiente de Manning.

3. Es importante resaltar que en el caso de emplear el MDT más preciso (GPS y Estación Total), el por ciento del EMC en la determinación de la altura del agua varió en correspondencia con el por ciento en que aumentó o disminuyó la n de Manning, pues con n entre un 15% y 30% (n mínimo) aproximadamente por debajo de los n medios, se obtuvo un error entre un 17% y 25%, y cuando se emplearon valores de n entre 14% y 17% (n máximo) por encima del valor de n medio, se obtuvo un error alrededor de un 15% y 19%.

■ REFERENCIAS

1. **Amemiya, Michiko y Echávez, Gabriel (2004).** «Análisis de la sensibilidad de la n de Manning en cauces aluviales». Sao Pedro, Brasil.
2. **Barnes, H. H., (1967).** «Roughness Characteristics of Natural Channels». U.S. Geological Survey, Water Supply Paper No. 1849, U. S. Government Press.
3. **Bates, P.B., y De Roo, A.P.J. (2000).** «A simple raster-based model for flood inundation simulation». Journal of Hydrology, 236, pp.54-77.
4. **Casa, A.; Benito, G. et al. (2005).** «Efectos de las Fuentes Cartográficas en los resultados de la modelación hidráulica de crecidas». /s.e/, (12 páginas).
5. **Chow, V. T. (2004):** Hidráulica de los canales abiertos. Editorial Nomos S. A. Santafé de Bogotá, Colombia.
6. **Hardy, R.J., Bates, P.D. y Anderson, M.G. (1999).** «The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments». Journal of Hydrology, 216, pp. 124-136.
7. **Horritt, M.S. (2000).** «Development of physically based meshes for two-dimensional models of meandering channel flow». International Journal for numerical methods in engineering, 47, pp. 2019-2037.
8. **Horritt, M.S., Bates, P.D. (2001).** «Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow». Journal of Hydrology, 253, pp. 239-249.
9. **León A. y Estopiñan A. (1989):** Hidráulica de Canales. Editorial Pueblo y Educación. Cuba.
10. **León Alcides (2000):** Hidráulica de las conducciones libres. Editorial Pueblo y Educación. Cuba.
11. **Marks, K., Bates, P. (2000).** «Integration of high resolution topographic data with floodplain flow models». Hydrological Processes, 14, pp. 2109-2122.
12. **Morad, Munir y Treviño, Alejandro (2001).** «Sistemas de Información Geográfica y modelizaciones hidrológicas: Una aproximación a las Ventajas y Dificultades de su Aplicación». Boletín de la A.G.E., Volumen, No. 31, pp. 23-46.
13. **Omer, C.R., Nelson, E.J. y Zundel, A.K. (2003).** «Impact of varied data resolution on Hydraulic Modeling and Floodplain Delineation». Journal of the American Water Resources Association, pp. 467-475.
14. **Weber, Juan F. (2003):** Modelación integrada uni y bidimensional de flujo en planicies de inundación. Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención en Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
15. **Werner, M.G.F. (2001).** Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model. Phys.Chem.Earth (B), Vol. 26, No 7-8, pp.517-522.