



MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA AMENAZA POR CRECIENTES EN EL RÍO CHICO DE NONO

Bupo, Matías^{a,b}, Weber Juan F.^{b,a}, Barbieto Osvaldo L.^{b,c}

^a Facultad Regional Córdoba Universidad Tecnológica Nacional. Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina,
mbupo@civil.frc.utn.edu.ar – jweber@civil.frc.utn.edu.ar, <http://www.frc.utn.edu.ar>

^b Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Av. Vélez Sarsfield 1611,
<http://www.efn.uncor.edu>

^c Instituto Nacional del Agua – Centro de la Región Semiárida CRSA. Ambrosio Olmos 1142 – 1° piso,
<http://www.ina.gov.ar/> – coyabarbeito@gmail.com

RESUMEN

El objetivo fue determinar a través de una modelación hidráulica del río Chico de Nono, qué caudal genera la situación de máxima amenaza establecida por Giambastiani (1993), mediante el uso de diferentes herramientas de cálculo hidráulico y análisis de imágenes. Se trabajó en el tramo comprendido entre el Hotel Nono y el puente sobre Ruta Nacional N° 20, donde se determinó a través de diferentes técnicas geomorfológicas la carta de amenaza por crecientes en dicha zona. Se tuvo en cuenta la influencia del río Los Sauces, para la determinación de los niveles de inundación. La geometría de los ríos se obtuvo de la combinación de un modelo digital de elevación del terreno (SRTM) e imágenes Google georeferenciadas. La modelación hidráulica se realizó para una combinación de diez caudales y para tres situaciones de n de Manning. Se compararon las áreas de inundación correspondientes a las tres situaciones observando una diferencia menor al 6% en todos los casos, y finalmente se determinó cualitativa y cuantitativamente qué combinación de caudales define un área inundada similar a la de la carta de amenaza.

ABSTRACT

Work was done on the stretch of Nono's River Chico in the area between the Nono's Hotel and the bridge over National Route N° 20, where it was determined through different geomorphological techniques the threatening letter for growing in the area. The purpose was to determinate through a hydraulic modeling of the river, which flow generates the situation of maximum threat established by Giambastiani (1993), by using different calculation tools and hydraulic analysis of images. It was considered the influence of the River Los Sauces, for the determination of flood levels. The geometry of the rivers was obtained from the combination of a digital model of the elevation of the ground (SRTM) and images Google georeferenced. The hidraulic modeling was performed to a combination of ten flows, for three Manning's n situations. There were compared the floods areas corresponding to the three situations observing a difference less than 6% in all cases, and finally it was determined qualitatively and quantitatively which combination of flow defines a flooded area similar to the threatening letter.

INTRODUCCIÓN

La determinación de las áreas inundables que sufre una zona ante la ocurrencia de una crecida es de gran importancia en los problemas ingenieriles. El cálculo aproximado de los niveles de inundación resulta de utilidad para determinar sectores en los que es necesario realizar protecciones, en proyectos de urbanización, etc.. Existen múltiples y variadas metodologías para la estimación de estas áreas, una de las posibilidades es la aplicación de modelos numéricos que en general se basan en la solución numérica de las ecuaciones generales del movimiento de agua (es decir las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento). Los mismos se aplican a un tramo de río que incluya la zona de interés. Existen varios modelos matemáticos que realizan estos cálculos, uno de los más utilizados es HEC-RAS.

Otra posibilidad es mediante la aplicación de diferentes técnicas geomorfológicas, tales como las que se utilizaron en el presente estudio, y se detallan más adelante.

El objetivo que aquí se plantea es determinar el caudal que genera la situación de máxima amenaza por creciente establecida por Giambastiani (1993) en el Río Chico de Nono (tramo Hotel Nono – Puente sobre Ruta N N° 20), mediante el uso un modelo digital del terreno (SRTM) con una resolución de tres segundos de arco, para la determinación de la geometría del río, imágenes satelitales (Google) para la estimación de los correspondientes n de Manning y una herramienta para los cálculos hidráulicos tal como HEC-RAS.

CASO DE ESTUDIO

La zona de estudio se sitúa en la localidad de Nono, ubicada en la provincia de Córdoba, a 7 kilómetros de la ciudad de Mina Clavero y unos 150 kilómetros de Córdoba Capital.

El sector que se desea estudiar está comprendido entre la confluencia de los ríos Chico y Los Sauces hasta unos 4.5 kilómetros aguas arriba por el río Chico y unos 3.5 kilómetros aguas arriba por el río de Los Sauces (Figura 1).

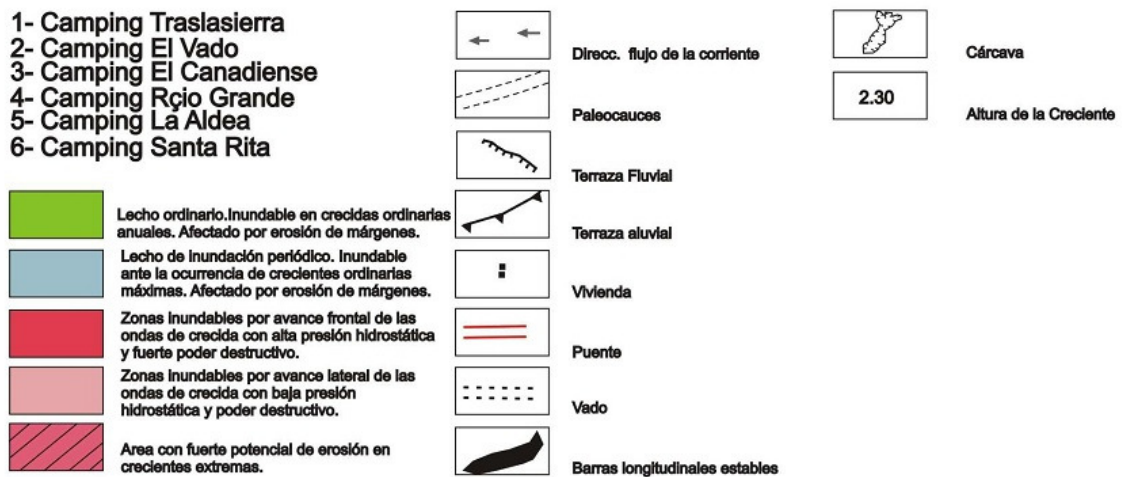
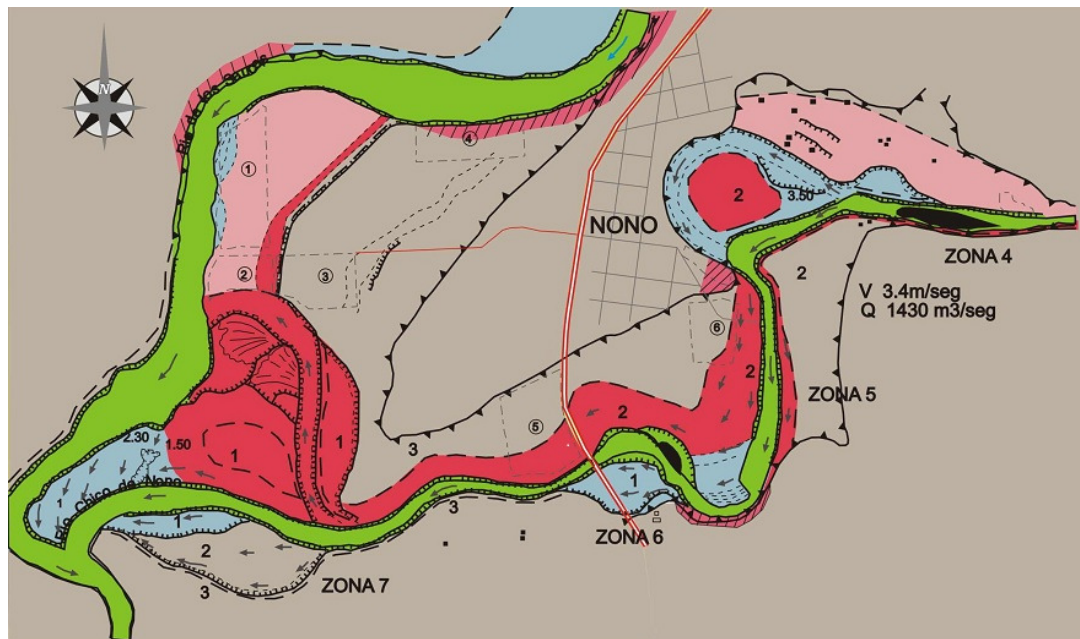


Figura 2.- Carta geomorfológica del río Chico de Nono

Tendencia de la cuenca hidrográfica a la generación de crecientes repentinas

La tendencia a la generación de crecientes repentinas del río Chico de Nono está condicionada por la conjunción de factores de carácter permanente, entre los que se destacan la naturaleza geológica, la morfología y la vegetación natural y factores transitorios, en donde el clima, es el condicionante de primer orden de acuerdo a las características de las precipitaciones (tipo, intensidad distribución, etc.)

La cuenca alta de montaña o de recepción, constituye por su potencial hidrológico, el sector en el que se generan las crecientes repentinas de magnitud, que significan una amenaza de consideración.

Naturaleza geológica:

La cuenca alta de recepción del sistema hidrográfico responsable de la captación y conducción de la escorrentía de mayor potencial hidrológico, en su total extensión, se compone de rocas ígneas graníticas masivas que soportan cubiertas residuales someras derivadas de su meteorización. Estas se distribuyen en forma discontinua alternando con porcentajes de roca

desnuda próximos al 70%. Tal condición rige baja permeabilidad de carácter secundario por fracturación y diaclasado.

Morfología:

La morfología de acuerdo a la energía de las pendientes naturales, su distribución y las formas planimétricas de la cuenca (forma, perímetro, área, etc.), juegan un rol fundamental en la concentración y distribución de los caudales de crecida.

La cuenca alta de recepción del río Chico de Nono, tiene desarrollo en la pendiente occidental de las cumbres de Achala, que conforman un lineamiento norte-sur de bloques de basamento rocoso elevados a partir de fallamiento regional en forma fuerte hacia el oeste y en forma más tendida y escalonada, hacia el este.

En respuesta a esta génesis las pendientes naturales definen relieve fuerte con valores medios superiores al 30%, en donde se da la alternancia de geoformas como quebradas profundas, frecuentes cornisas y laderas de fuerte inclinación.

La red de drenaje en respuesta a la naturaleza geológica, es de alta densidad por baja permeabilidad de la roca granítica y las cubiertas residuales derivadas de su meteorización (suelos someros y discontinuos) y de diseño dendrítico con frecuentes tramos rectos regidos por el trazo de fallas, fracturas y diaclasas y confluencias en ángulos agudos.

En su conjunto la cuenca de recepción presenta forma planimétrica casi circular, lo que significa similares tiempos de concentración de los distintos tributarios que la componen, lo que significa la generación de ondas o picos de crecida de magnitud (Índice de Gravelius).

El drenaje excesivo condicionado por la baja permeabilidad del material geológico y la fuerte energía del relieve, condiciona una fuerte capacidad de carga y competencia de la corriente, hecho evidente en el tamaño de los bloques rodados que se incluyen en el lecho ordinario.

Vegetación natural:

La vegetación natural cumple un papel preponderante en el control de las crecidas actuando como interceptora de las precipitaciones a nivel superficial, y facilitando la infiltración y el sostén del suelo a nivel subterráneo, en una medida que es dependiente de su fisonomía y densidad de cubierta.

Las formaciones vegetales presentan las características del matorral y arbolado semidesértico xerófilo que cohabita con pastizales distribuidas según tres pisos, cuya existencia, amplitud y elevación, están condicionados por la altitud, latitud y exposición y orientación geográfica.

Clima:

De los factores climáticos las precipitaciones constituyen el parámetro de mayor peso en el flujo superficial y en la generación de crecientes repentinas.

El clima de tipo estacional con inviernos fríos y relativamente secos y veranos lluviosos, implica la concentración de las lluvias en el periodo noviembre-marzo asociadas a procesos de carácter frontal, convectivo y orográfico.

En la baja cuenca los promedios anuales fluctúan entre 500 mm y 700 mm y en la alta, entre 700 mm y 1100 mm.

Los eventos de origen convectivo y orográfico debido a la altitud que alcanza el macizo de las Cumbres de Achala (+2.000 m.s.n.m.), son los que tienen incidencia en la generación de crecidas repentinas de magnitud, por cuanto significan lluvias localizadas pero de altas intensidades y en corto tiempo.

Condiciones geológicas y geomorfológicas del río Chico de Nono en el tramo considerado

El lecho ordinario definido por orillas claras, corre encajado en el eje del valle ocupando una zona restringida con un canal de estiaje en partes de diseño de escurrimiento único y en partes, entrelazado.

Desde la salida del macizo de las Cumbres de Achala probablemente por control estructural en profundidad, presenta trazos rectos alternantes con sectores de diseño meandriforme moderado, situación que en la zona de estudio cambia a 1 km aguas abajo de la confluencia con el A° Los Sanjuaninos, para adoptar un franco diseño meandriforme a la altura del Hotel Nono (Figura 3).

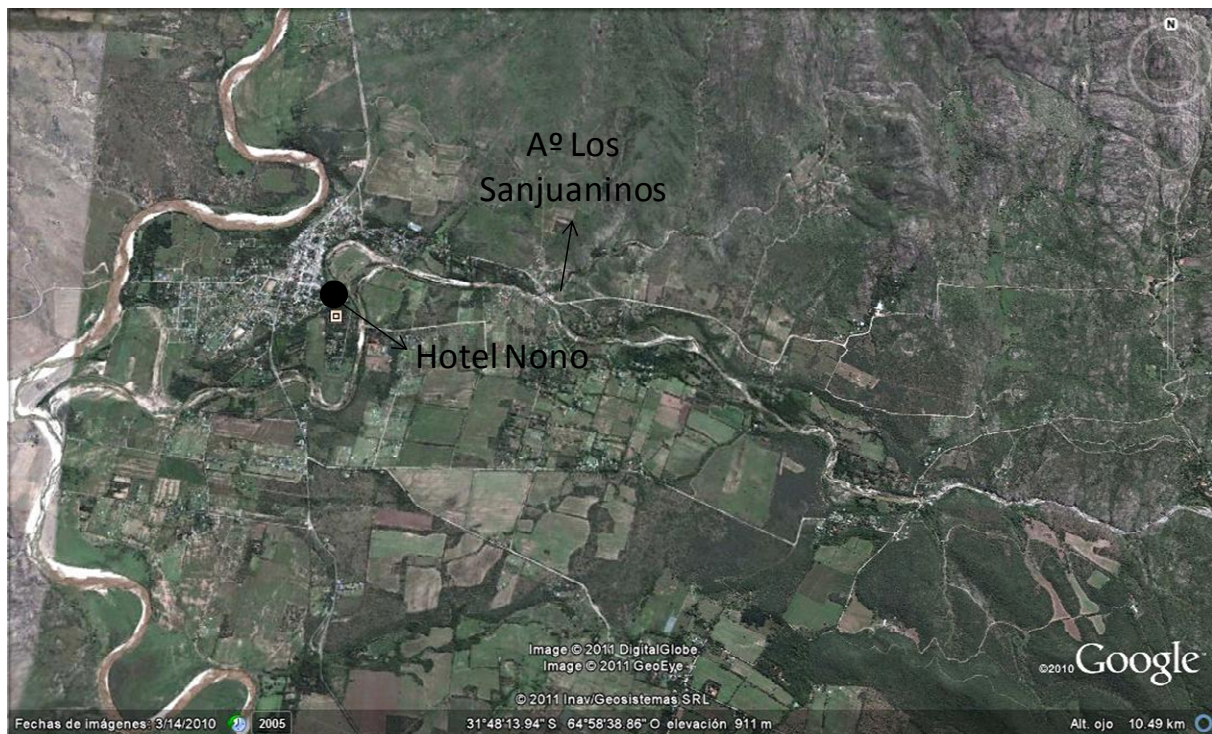


Figura 3.- Geología y morfología del tramo considerado

El diseño significa disminución de pendiente, adoptando el curso trazo variable por erosión de márgenes, con una hidrodinámica caracterizada por erosión en las partes externas de la curva y deposición en las internas, involucrando además, el sobrepaso de las curvas por ondas de crecida, lo que determina una nueva dirección de flujo y un progresivo avance de las curvas en el sentido de la corriente.

El proceso de erosión de márgenes a más de depender del diseño meandriforme, se rige por la magnitud de las crecidas y la naturaleza geológica del márgenes condicionantes de su estabilidad.

El curso con anterioridad a la creciente repentina del 11/11/1993 describía hacia la margen derecha un amplio meandro que en dicha ocasión, fue afectado por erosión de márgenes y sobrepasado por las ondas de crecida, adoptando el curso trazo recto, menor recorrido y mayor velocidad.

Unidades hidrogeomorfológicas que componen el ámbito fluvial y su relación con el alcance y dinámica de las inundaciones

La dinámica y la inundabilidad de un valle fluvial, dependen de las características de las unidades hidrogeomorfológicas que lo componen, destacándose por su actividad hidrológica

el *lecho ordinario*, el lecho de inundación *periódico* y el lecho *episódico*, definidos tanto por sus características geológicas en función a la naturaleza de los materiales que los componen, como por su morfología derivada de la actividad fluvial.

El lecho ordinario, también llamado lecho aparente o lecho menor, representa la unidad de mayor actividad hídrica del ambiente fluvial (recurrencia anual), definido por orillas claras desde el punto de vista geomorfológico y por la presencia de materiales aluvionales actuales de alta energía (bloques, gravas y arenas).

Cuando los caudales de crecida sobrepasan la capacidad de conducción del lecho ordinario, se activa el lecho de inundación periódico, con actividad ligada a inundaciones ordinarias máximas.

Ante la ocurrencia de crecidas extremas superada la capacidad de conducción del lecho periódico, se activa el lecho episódico o lecho histórico, en forma total o parcial de acuerdo a los valores de lluvia-intensidad en la cuenca de recepción, conformado en el sector, por gran parte del único nivel de terraza del ámbito fluvial del río Nono

INFORMACIÓN DISPONIBLE

Para la generación de modelo hidráulico se utilizó información de diferentes fuentes.

Como modelo digital del terreno, para determinar la geometría de las secciones intervinientes, se utilizaron las imágenes del SRTM (Farr et. al 2007).

La misión topográfica de radar a bordo del transbordador (acrónimo en inglés SRTM, de Shuttle Radar Topography Mission) es una misión para obtener un modelo digital de elevación de la zona del globo terráqueo entre 56 °S a 60 °N, de modo que genere una completa base de cartas topográficas digitales de alta resolución de la Tierra.

El SRTM consiste en un sistema de radar especialmente modificado que voló a bordo del transbordador espacial Endeavour durante los 11 días de la misión STS-99 de febrero de 2000.

Los modelos de elevación se arreglan en píxeles de 1° de latitud por 1° de longitud, nombrados de acuerdo a sus esquinas sudoestes. Entonces "n45e006" es igual a 45°00'N 6°00'E a 46°00'N 7°00'E y "s45w006" es igual a 45°00'S 6°00'O a 44°00'S 5°00'O.

La resolución de las celdas de los datos fuente es de 1 segundo de arco, sobre Estados Unidos y en el resto del mundo, 3 segundos de arco. Cada parte de tres segundos de arco tienen 1201 filas, y cada fila consiste en 1201 celdas de 16 bits bigendiano.

La Misión Topográfica Shuttle Radar es un proyecto internacional entre la Agencia Nacional de Inteligencia-Geoespacial, NGA, y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, NASA.

Para el caso en estudio se tomó un sector del modelo correspondiente a la zona en estudio (Figura 4)

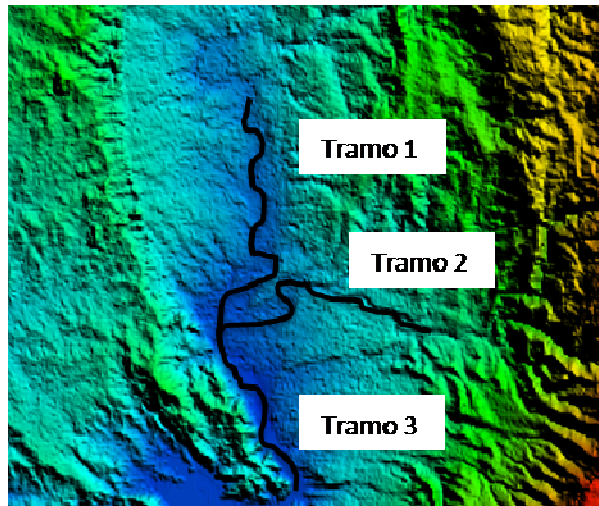


Figura 4.- Modelo digital del terreno – Zona de análisis

Para la definición de los posibles valores del n de Manning que serán impuestos al cauce y sus planicies, se utilizaron imágenes satelitales del sector en estudio a través de Google Earth (Figura 5).



Figura 5.- Imagen de Google Earth – Zona de análisis

Google Earth es un programa informático similar a un Sistema de Información Geográfica (SIG), creado por la empresa Keyhole Inc., que permite visualizar imágenes en 3D del planeta, combinando imágenes de satélite, mapas y el motor de búsqueda de Google que permite ver imágenes a escala de un lugar específico del planeta.

La imagen satelital del sector en estudio (Figura 5), está compuesta en un 90% por imágenes obtenidas por el satélite Geoeye y el 10% restante por el satélite QuickBird de DigitalGlobe.

MODELACIÓN HIDRÁULICA

La modelación hidráulica, consta de dos grandes partes, la primera que es la generación del modelo, y la segunda los cálculos hidráulicos intervinientes.

Para estas tareas se utilizaron herramientas tales como ArcGis, HEC-GeoRAS y HEC-RAS.

Con el modelo digital del terreno (Figura 4), se genera un TIN (Triangulated Irregular Network) del mismo, a partir del cual se obtendrá la topología del sector en estudio (Figura 6), sobre el cual se dibuja la línea del cauce principal, superponiendo una imagen de Google Earth georeferenciada como complemento.

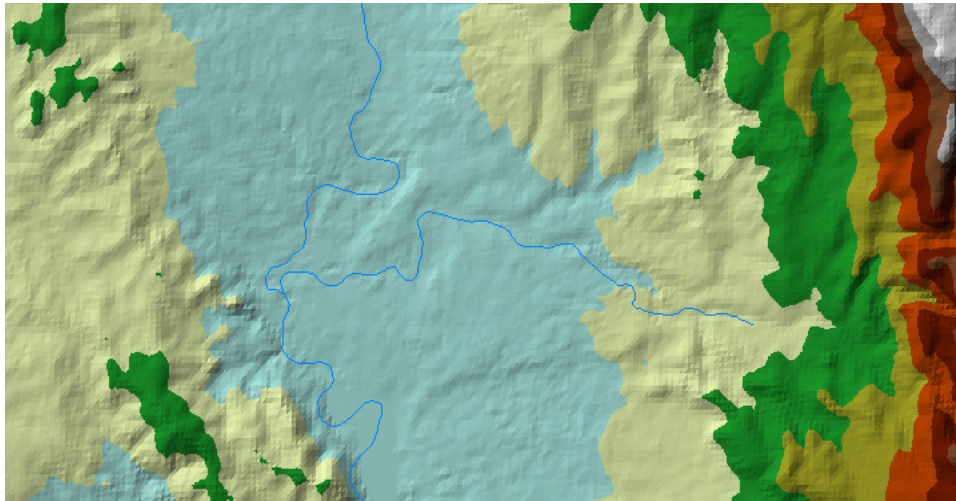


Figura 6.- TIN – Zona de estudio

Una vez trazado el cauce con sus correspondientes planicies de inundación, se definen las secciones intervinientes (Figura 7) que posteriormente serán exportadas a HEC-RAS para realizar los cálculos hidráulicos.

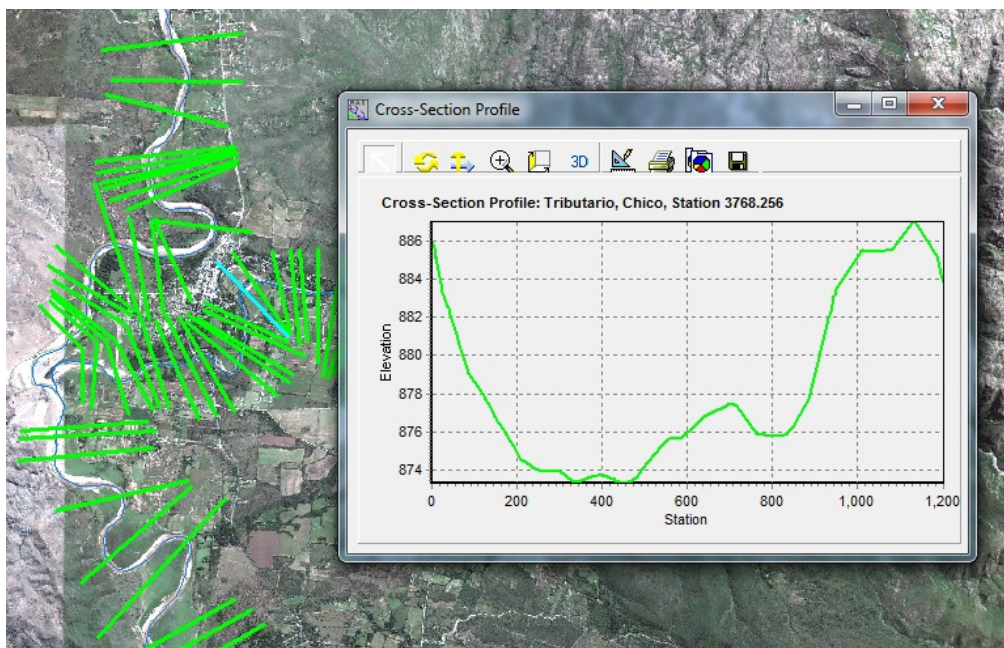


Figura 7.- Secciones intervinientes

PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Con la evaluación de las imágenes satelitales, se definieron los valores de n de Manning según una clasificación que se corresponde con las diferentes zonas y tipos de vegetación (Tabla 1).

Tabla 1.- Clasificación de los n de Manning

Zona	Valores
Vegetación herbácea	0.035
Monte	0.060
Zona urbana	0.075
Cauce de río Chico	0.028
Cauce río Los Sauces	0.021

Definido este parámetro se generó un mapa representativo (Figura 8) de la Tabla 1, con el cual se le asignaron los valores de rugosidad a las diferentes secciones intervinientes, teniendo en cuenta la intersección de las mismas con el mapa.

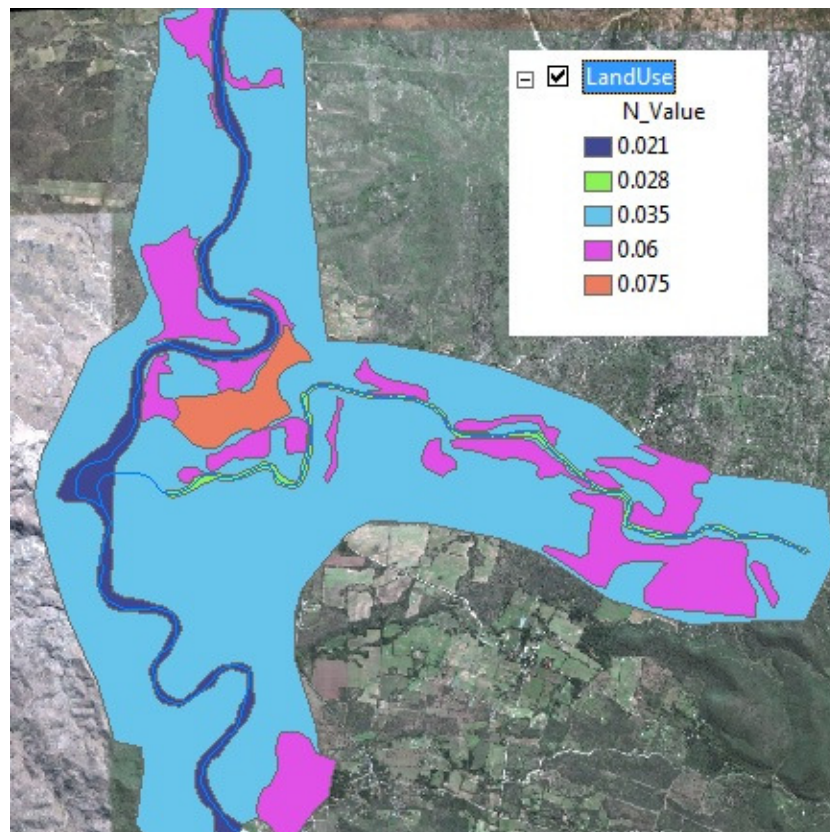


Figura 8.- Mapa de rugosidades

Estas tareas se realizaron utilizando la herramienta GIS ArcGis y el pre procesador del complemento HEC-GeoRAS, el cual permite exportar toda la información a HEC-RAS.

CAUDALES ANALIZADOS

En HEC-RAS, y, previo a la modelación hidráulica es necesario realizar ajustes sobre la información importada de ArcGis y HEC-GeoRAS

Para obtener un mapa de inundación lo mas continuo posible, se realizó una interpolación entre las secciones suficientemente densa, donde posteriormente se ajustaron los puntos que

indican el comienzo de las planicies de inundación (left overbank y right overbank) y establecieron las barreras (leeves) para indicar las áreas inicialmente inundables (Figura 9).

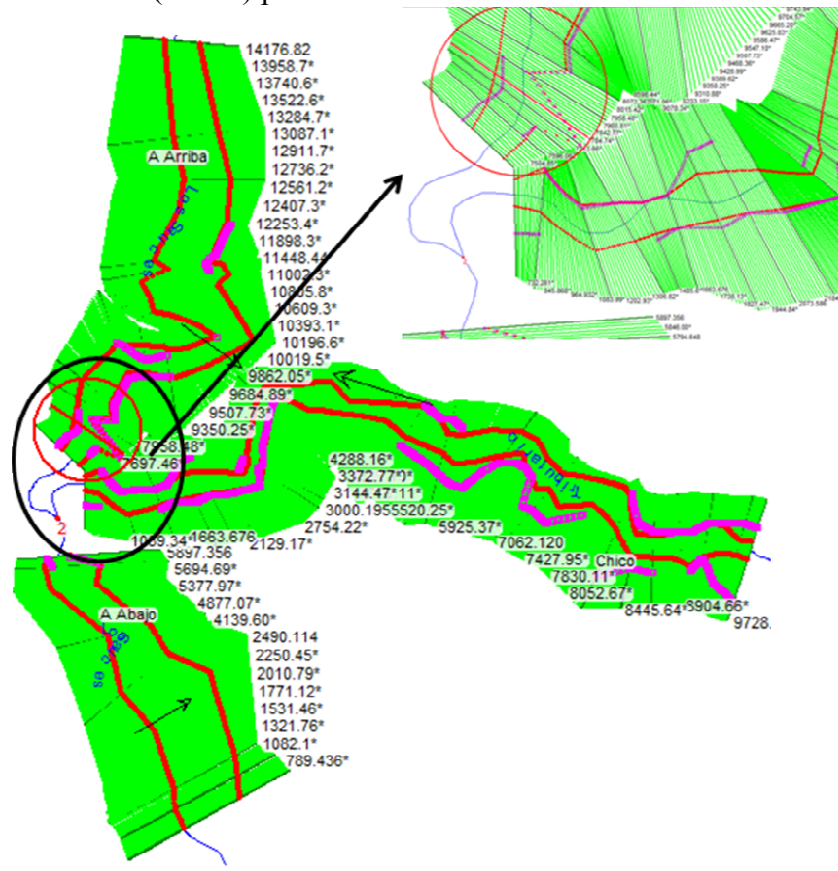


Figura 9.- Geometría en HEC - Ras

La modelación hidráulica se realizó para una combinación de caudales estimados a partir de los valores típicos de la región (Tabla 2), con los cuales se corrió el modelo hidráulico para tres situaciones del n de Manning, la situación 1 para los valores de n de Manning anteriormente determinados, y las situaciones 2 y 3 para valores de $\pm 15\%$ respectivamente, en torno a los valores de referencia.

Tabla 2.- Caudales analizados (m^3/s)

Escenario	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
1	100	50	150
2	200	100	300
3	400	200	600
4	600	300	900
5	1000	500	1500
6	1200	850	2050
7	1200	1000	2200
8	1500	1250	2750
9	1800	1500	3300
10	2300	2000	4300

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los resultados de la modelación, realizada para las tres situaciones de n de Manning, se obtuvieron las áreas inundadas por las crecientes producidas por cada escenario establecido en la Tabla 2.

La Figura 10, muestra las áreas inundadas obtenidas por los escenarios 1, 5 y 10 respectivamente.

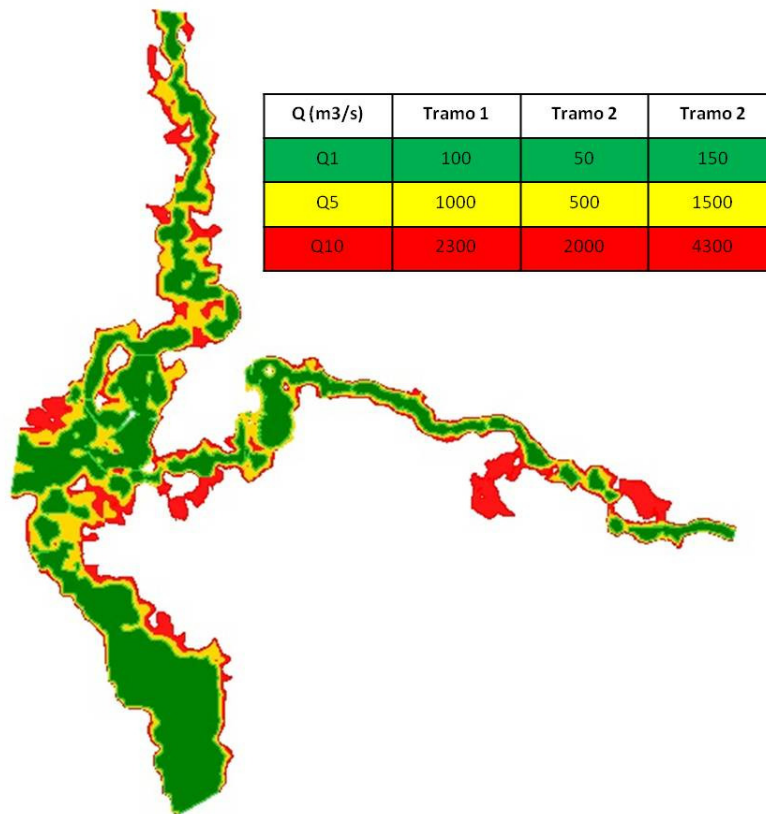


Figura 10.- Áreas inundadas por los escenarios 1, 5 y 10

Con el objetivo de determinar las diferencias entre las áreas de inundación generadas por los distintos escenarios, para las tres situaciones del n de Manning establecidas, se calcularon las áreas correspondientes a la situación 2 y 3, y se las comparó con la situación 1 de referencia (Tabla 3).

Tabla 3.- Áreas Calculadas para las distintas situaciones de n de Manning

	E-1 (Km2)	E-2 (Km2)	E-3 (Km2)	E-4 (Km2)	E-5 (Km2)	E-6 (Km2)	E-7 (Km2)	E-8 (Km2)	E-9 (Km2)	E-10 (Km2)
0.85 n	3.56	4.08	4.78	5.22	5.96	6.33	6.48	6.71	7.05	7.65
n	3.59	4.33	4.98	5.43	6.13	6.52	6.6	6.99	7.27	7.86
1.15 n	3.76	4.34	5.01	5.48	6.18	6.73	6.69	7.15	7.53	8.07

Como es de esperarse las áreas correspondientes a un valor de n de Manning incrementado en un 15% son mayores a las obtenidas para el valor de referencia ya que para igualdad de caudal, la resistencia al flujo es mayor, y, por lo tanto, el tirante debe aumentar. Exactamente lo contrario ocurre para los valores de n de Manning disminuidos en un 15%.

Las diferencias entre las áreas calculadas no superan el 6% en ningún caso (Figura 11), por lo que un error de $\pm 15\%$ en la estimación del parámetro de Manning no introduce errores significativos en el caso de estudio.

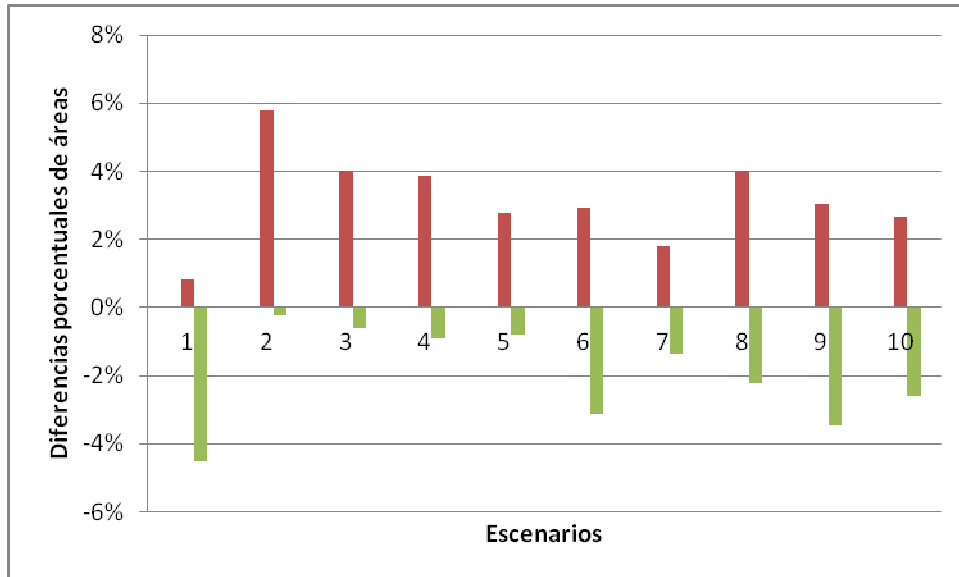


Figura 11.- Diferencias porcentuales entre las áreas inundadas obtenidas para las situaciones 2 y 3 respecto de la situación 1
 En una herramienta CAD, se georreferenció la carta geomorfológica del río Chico de Nono (Figura 2) donde se delimitó el área correspondiente al grado de amenaza más severo, con el fin de determinar cuál de los escenarios propuestos es el que más se asemeja (Figura 12).

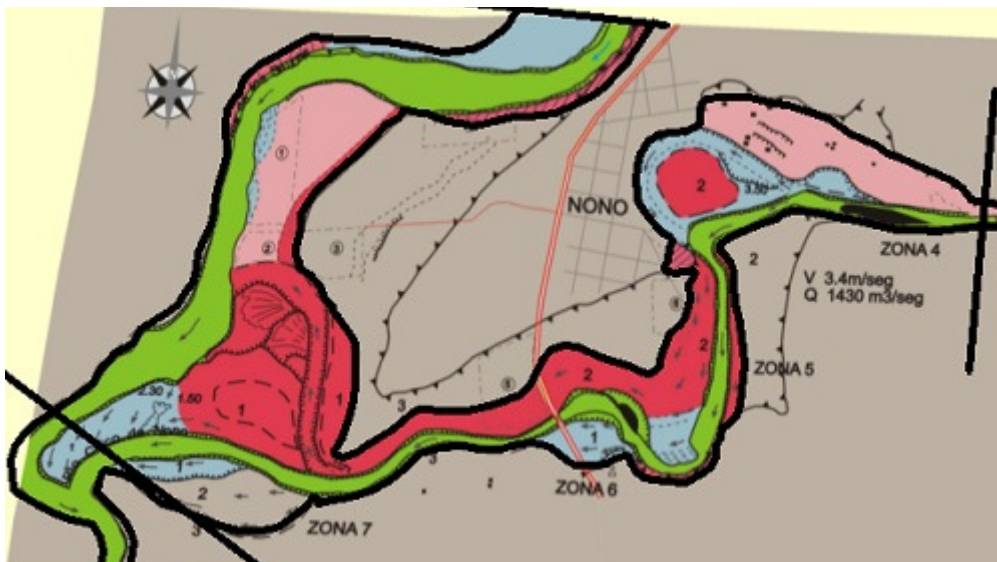


Figura 12.- Delimitación de área de inundación correspondiente al grado mas severo

Lo mismo se realizó para las áreas de inundación generadas por cada uno de los escenarios, correspondientes a la situación 1 del n de Manning, ya que como se muestra en la Figura 11, las diferencias observadas no superan el 6 %.

Comparando cualitativamente entre el área delimitada en la Figura 12, con las correspondientes a cada escenario, se observa que la mejor aproximación la realizan el 4, 5, y 6 (Figura 13).



Figura 13.- Determinación cualitativa de los posibles escenarios

Las diferencias existentes entre las áreas de inundación obtenidas con el modelo hidráulico y las que surgen de la carta de amenaza por crecientes (Figura 2), se adjudican a dos causas. La primera se debe a errores de georeferenciación de la imagen a partir de la cual se trazó el cauce y sus planicies, y la segunda a la calidad del modelo digital del terreno, ya que como se mencionó, el mismo tiene un valor de altura por cada pixel cuadrado de 90mx90 m.

Finalmente se realiza una comparación cuantitativa entre las áreas de los tres escenarios seleccionados y la correspondiente al mapa de amenazas (Tabla 4), donde se observa una gran aproximación del escenario 6.

Tabla 4.- Comparación cualitativa entre áreas

Escenario	Área (Ha)	Diferencia en %
E-4	183.6	21.85
E-5	228.2	2.87
E-6	232.0	1.27
Mapa	235	67890

Se observa que las áreas calculadas anteriormente (Tabla 3) no se corresponden con estas últimas (Tabla 4), esto se debe a que las primeras corresponden a toda el área de análisis, mientras que las segundas solo a la zona de interés.

CONCLUSIONES

Para el caso de estudio, las diferencias más importantes entre los resultados son adjudicables a los problemas de georeferenciación y a la baja calidad del modelo digital del terreno (SRTM), y no así a la estimación del valor de n de Manning.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, es posible representar en forma aproximada un mapa de amenazas por crecientes combinando un modelo digital del terreno (SRTM) y un modelo hidráulico como HEC-RAS.

Finalmente se concluye en que los caudales que generan un área de inundación similar a los del mapa de inundación por crecidas son los correspondientes a los del escenario 6 de la Tabla 2.

Como objetivo a futuro, se pretende estimar el orden de magnitud del período de recurrencia asociado a la combinación de caudales determinada.

***Agradecimiento.** Se agradece a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba, por el apoyo en el marco del proyecto de investigación “Evaluación geomorfológica e hidrológica de inundaciones extremas y desastres”, Años 2010-2011, SECyT 214/10*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Farr, T. G. et al. (2007) “The Shuttle Radar Topography Mission”. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. Pasadena, CA.

Giambastiani, M. (1993) “Carta preliminar por amenaza por crecientes repentinas del Río Chico de Nono”. Trabajo final. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Córdoba.

US Army Corps of Engineers, Institute of Water Resources, Hidrologic Engineering Center (HEC). (2009). *HEC GeoRAS. Gis tools for support of HEC – RAS using ArcGis. User’s Manual.* Davis, CA.

US Army Corps of Engineers, Institute of Water Resources, Hidrologic Engineering Center (HEC). (2010). *HEC-RAS. River Analysis System User’s Manual (Version 4.1).* Davis, CA.

Toutin , Th. Et al. (2002) A Milestone for High-Resolution Mapping, Earth Observation Magazine. Vol XI Art N° 4.

Vicknair, L.M y Poole, A. (2008) “Out of chaos comes order” GeoEye, 12076 Grant Street, Thornton, Colorado 80241. www.geoeye.com

Hiller, A. (2007) “ArcGis 9.3 manual” University of Pennsylvania, School of Design, Cartographic Modeling Lab. http://works.bepress.com/amy_hillier/17

ONU (1976). “Prevención y Mitigación de los Desastres Naturales. Compendio de los Conocimientos Actuales. Volumen II”



Instituto de Recursos Hídricos



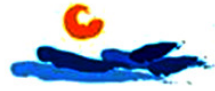
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



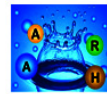
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA S.A. INGENIERIA CIVIL E HIDRÁULICA

