



Implementación de un modelo matemático distribuido de escurrimiento superficial en la cuenca del Río Tercero - Carcarañá

Implementation of a distributed mathematical model of surface runoff in the Tercero - Carcarañá river basin

Stenta, Hernán ^{1,2} ✉ - Riccardi, Gerardo ^{1,2,3} - Basile, Pedro ^{1,2} - Trivisonno, Franco ^{1,4}

Recibido: 10 de diciembre de 2014 • Aceptado: 26 de diciembre de 2014

Resumen

Se presenta la implementación y calibración preliminar de un modelo matemático distribuido, hidrológico-hidráulico físicamente basado en la cuenca del río Tercero-Carcarañá (provincias de Córdoba y Santa Fe). La cuenca tiene una superficie de aproximadamente 61.454 km² y su principal curso es el río Tercero - Carcarañá, con descarga al río Coronda a la altura de Puerto Gaboto. Se utilizó como modelo digital del terreno la información proveniente de la misión SRTM, con agregamiento en celdas de 900 m x 900 m. Adicionalmente se contó con información de red de cursos desde cartas topográficas del IGN, imágenes Google Earth ©; recorridas de campo y proyectos existentes. El modelo quedó constituido con 75.870 celdas y una red de cursos de 1.705 km y fue calibrado preliminarmente con información hidrológica e hidráulica de tres eventos extraordinarios. Para avanzar en el conocimiento de la mecánica de propagación del escurrimiento una primer aplicación consistió en la determinación de la incidencia de los aportes superficiales provenientes de unidades areales elementales en 17 puntos característicos de la red de cursos principales. Si bien se evidencia un severo déficit de información, los primeros resultados obtenidos en la transformación lluvia caudal y propagación de escurrimiento superficial son aceptables.

Palabras Clave: grandes cuencas de llanura, modelación matemática distribuida, río Carcarañá-Tercero.

1. Departamento de Hidráulica - Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA- Universidad Nacional de Rosario). Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina.

✉ hstenta@fceia.unr.edu.ar

2. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA - Universidad Nacional de Rosario) Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina.

3. Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina.

4. Becario Doctoral Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas Riobamba 245 bis. (2000) Rosario.

Abstract

The implementation and calibration of a physically-based and spatially-distributed quasi-2D mathematical model in the basin of Tercero - Carcarañá river (Córdoba and Santa Fe Provinces) is presented. The basin area is approximately 61454 km² and its main stream is the Tercero - Carcarañá

river, whose outlet is in the Coronda River, near Puerto Gaboto. The information from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) was used as digital terrain model (DTM) with cells of 900 m x 900 m. Additional information about river network was obtained through the IGN topographic maps, Google Earth®, local topographic data and existing projects. The mathematical model was implemented with 75870 cells and a river network of 1705 km (1895 cells) and was preliminarily calibrated with hydrological and hydraulic data from three extraordinary events. To advance the understanding of the mechanics of runoff propagation one first application was to determine the incidence of surface contributions from elemental areal units in 17 characteristic points of the network of main courses. While evidence of a severe lack of information, the first results obtained in the rainfall - runoff transformation and propagation of surface runoff are acceptable.

Keywords: flatland basins, distributed mathematical modeling, Tercero - Carcarañá river.

INTRODUCCIÓN

En la cuenca hidrográfica de los ríos Tercero-Carcarañá se han realizado diferentes estudios y trabajos orientados a la descripción general de sus características más relevantes desde el punto de vista de los recursos hídricos, aspectos ambientales y socio-políticos.

Paoli *et al.* (2000) realizan una descripción general del área perteneciente a la cuenca del río Carcarañá, pero con el detalle descriptivo de la cuenca del Plata y subcuencas de los ríos Paraguay y Paraná. Los autores realizan una descripción general de las características físicas, geológicas, geomorfológicas y climatológicas de las cuencas de aporte al tramo medio del río Paraná, entre las cuales se encuentra la cuenca del sistema Tercero-Carcarañá.

Giacosa *et al.* (2000) realizan una caracterización hidrológica a nivel general del tramo medio del río Paraná donde se incluye a la cuenca del río Carcarañá como área de aportes. Asimismo realizan una caracterización hidrométrica del río Carcarañá, realizando un trabajo estadístico sobre caudales anuales y mensuales a partir de la información existente de la estación Pueblo Andino.

La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRHN, 2014) presenta un reporte descriptivo de las cuencas hídricas de la República Argentina, entre la que se encuentra la cuenca del río Carcarañá. En dicho trabajo se realiza la descripción general de aspectos físicos-naturales, hidrológicos y socio-económicos de dicha cuenca; remarcando que resultan aspectos descriptivos.

Venencio (2007) realizó una detallada caracterización física regional de la cuenca del río Carcarañá en la provincia de Santa Fe con el principal objetivo de investigar la vinculación regional entre la variabilidad climática y la respuesta del acuífero libre y para estimar cuantitativamente la recarga natural al acuífero libre debido a la lluvia a través de aplicación de diferentes metodologías. Se abordan aspectos de la geología e hidrogeología, geomorfología, dinámica hídrica superficial, características de suelos y cobertura vegetal, hidroquímica y caracterización de la precipitación.

FCEIA (2011); Riccardi *et al.* (2013 a y 2013 b) y Basile *et al.* (2013) llevaron a cabo estudios de prefactibilidad para el aprovechamiento del río Tercero-Carcarañá como ruta fluvial navegable. Se realizó una amplia recopilación de antecedentes y se llevaron a cabo estudios básicos incluyendo la caracterización del área en estudio, la caracterización climática, los estudios de niveles hidrométricos y de caudales, las características generales de la traza actual del río Carcarañá y obras de arte principales.

Barchiesi *et al.* (2013) reportan los resultados obtenidos durante las campañas de monitoreo del río Carcarañá (hasta su desembocadura en el río Coronda) y sus principales tributarios (ríos Tercero y Saladillo), que incluyen la determinación de caudales y parámetros hidráulicos como profundidad y velocidades media, pendiente de la superficie libre, entre otras en distintas secciones.

La revisión del estado del arte indica que no se ha avanzado en profundidad respecto a modelación matemática distribuida del escurrimiento superficial en todo el ambiente hidrográfico de la cuenca de los ríos Tercero-Carcarañá. En este trabajo se comienza a implementar un modelo matemático de escurrimiento superficial, de parámetros distribuidos en toda la cuenca. Se ha avanzado en la constitución del área de modelación construyendo el MDT, la definición de la red de cursos de mayor importancia y la definición de las obras de arte de mayor importancia en la zona de la cuenca baja. El modelo fue calibrado preliminarmente y aplicado a los efectos de analizar áreas de incidencias sobre caudales máximos en una serie de puntos sobre la red de drenaje principal.

DESCRIPCION DE LOS TRABAJOS

El trabajo se compone de una breve descripción del modelo matemático utilizado; se describe la constitución del modelo matemático distribuido en la cuenca del río Tercero-Carcarañá y se presenta un proceso de pre-calibración o calibración preliminar en función del avance logrado hasta la fecha respecto a la disponibilidad de datos existentes para tres eventos extraordinarios. Por último se describe una aplicación donde se analiza la incidencia sobre caudales máximos aportados desde una serie de áreas elementales en que fue sectorizada la cuenca.

Debido a la extensión superficial del sistema físico a modelar, a la dificultad de acceder a datos tales como registros de niveles, caudales, lluvias y dimensiones de obras de arte, se remarca que aquí se presenta un primer avance.

Posteriores artículos estarán orientados a mejorar la información y características del sistema hídrico en estudio (definición de puentes carreteros y ferroviarios, diferentes tipos de suelos para extracción de lluvia neta; etc.) y a simular una serie de eventos y crecidas observadas que permitan realizar la calibración y validación del modelo implementado. Se proyecta a mediano plazo desarrollar una herramienta tecnológica de simulación aplicada al sistema Tercero-Carcarañá orientado a aportar a la solución de las diversas problemáticas que actualmente producen los excedentes hídricos superficiales de la cuenca, como así también aportar soporte tecnológico de simulación de escurrimiento para futuros estudios de factibilidad de navegabilidad y posibles miniaprovechamientos hidroeléctricos entre otros posibles usos del río.

Descripción del Modelo Matemático

El modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional empleado es el VMMHH 1.0 (Riccardi *et al.*, 2013 *c*). Esta herramienta tecnológica es la última actualización de la fusión entre el modelo matemático hidrológico-hidráulico CTSS8 (Riccardi, 2000) y la plataforma en sistema de ventanas para pre y post procesamiento de información y resultados SIMULACIONES (Stenta *et al.*, 2005). El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). El sistema permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. Para la información necesaria de lluvia neta en cada celda se plantea la utilización de las metodologías reconocidas de Green y Ampt o del Servicio de Conservación del Suelo de EEUU (Chow *et al.*, 1994). El escurrimiento resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación. Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos y alcantarillas. Las ecuaciones gobernantes consideradas son la de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas. La distribución espacial de los parámetros y variables hidrológicas se realiza mediante la subdivisión de la cuenca en celdas de igual tamaño (cuadrangulares) interconectadas entre sí que definen el dominio del sistema hídrico a modelar. Las celdas pueden ser tipo valle o río, que representan el flujo superficial y en canal respectivamente. De esta forma las celdas tipo río representan cursos de agua permanente y/o transitorios de importancia y las celdas tipo valle representan las áreas tributarias a estos.

Descripción de la Cuenca del río Tercero-Carcaraña

La cuenca del río Tercero-Carcaraña se encuentra limitada entre los paralelos 31° 32' S y 34° 09' S y los meridianos 64° 58' O y 60° 44' O (Figura 1). Abarca a las provincias de Córdoba y Santa Fe (República Argentina).

Entre las localidades de mayor importancia se encuentran: Río Tercero, Río Cuarto, Villa María, Bell Ville, Laboulaye, Marcos Juárez, Cruz Alta y Corral de Bustos (Prov. de Córdoba) y Armstrong, Cañada de Gómez, Pueblo Andino, Carcaraña, Las Parejas y Puerto Gaboto (Prov. de Santa Fe).

Los cursos de agua de mayor importancia dentro de la provincia de Córdoba son el río Tercero (o Ctlamochita); río Cuarto (o Chocancarava) y río Saladillo; además existen numerosos arroyos, cañadas, bañados y lagunas. (A° Cabral, A° Carnerillo, A° de Tegua, A° Chato, Laguna La Salada, bañado del Saladillo, Cañada Santa Lucía).

El río Carcaraña nace en la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo en la Pampa Norte cordobesa. El río Tercero, o Ctlamochita, es el principal de los dos, con varios afluentes caudalosos de las Sierras Grandes y Comechingones que resultan en caudales medios de cerca de 27 m³/s. Al entrar en la llanura, el caudal disminuye considerablemente por infiltración, llegando a 17 m³/s en Bell Ville y 72 m³/s en Andino. La creciente ocurre en marzo con 111 m³/s, y la bajante en agosto con 46,1 m³/s (Giacosa *et al.*, 2000).

En la provincia de Santa Fe ingresa el río Carcaraña a la altura de Cruz Alta y recibe los aportes de diferentes cursos de agua: A° Tortugas; A° Leones; Cañada de Gómez; entre otros. Finalmente el río Carcaraña desemboca en el riacho Coronda, brazo del río Paraná a la altura de Puerto Gaboto.

La cuenca tiene su parte elevada (límite oeste) en la provincia de Córdoba en el límite con la provincia de San Luis en la sierra de Comechingones (cota máxima aproximada de 2884 m IGN) y una cota mínima en la desembocadura en el río

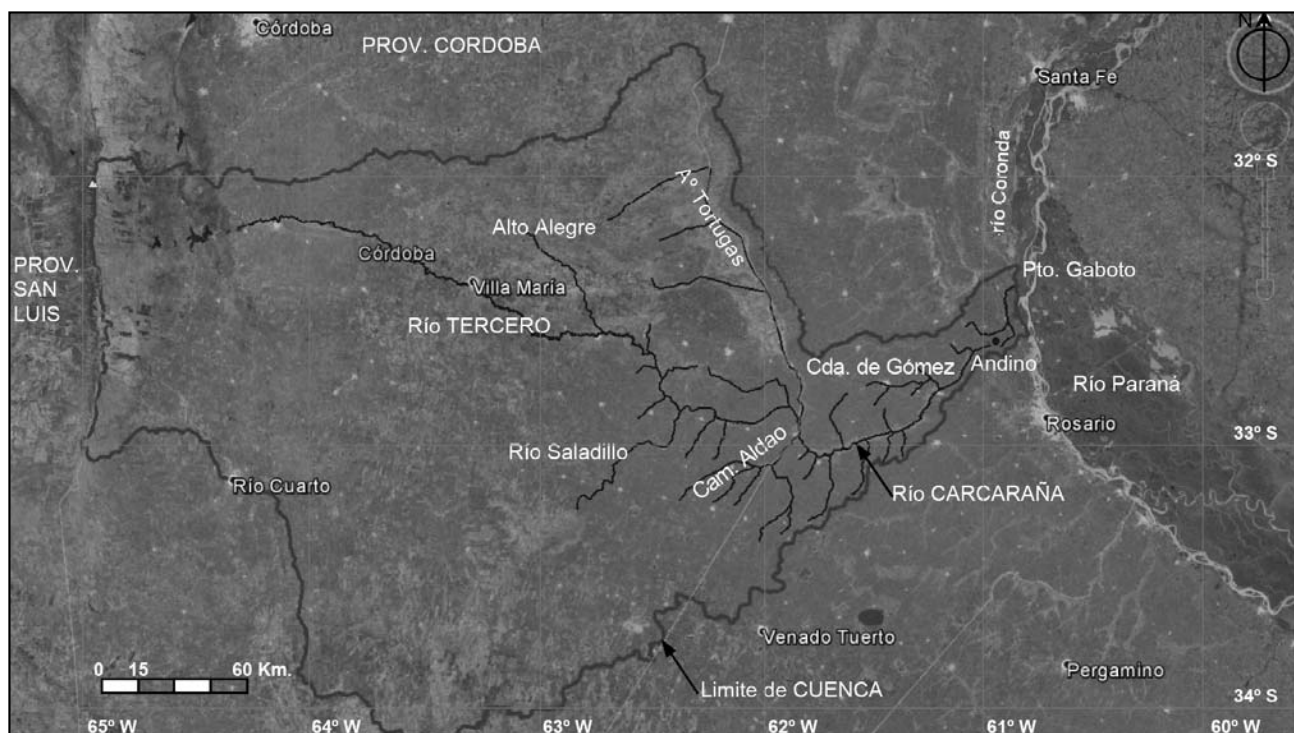


Figura 1. Cuenca del río Carcaraña - Tercero o Ctlamochita. Imagen de fondo Google Earth ©.

Coronda de 11,3 m IGN. La cuenca de aportes superficiales tiene un área estimada de aproximadamente 61.454 km².

En la cuenca se presenta un régimen térmico templado. La isoterma media anual de los 16,5°C pasa dentro de la misma. Las isohietas en el área de estudio tienen cierta disposición N-S, con disminución de E a W, entre las de 1.000 mm y 700 mm aproximadamente (FCEIA, 2011).

Los suelos son resultado de la sedimentación continua cuyos sedimentos superficiales son continentales y de procesamiento eólico. Son muy ricos para la actividad agropecuaria (SSRH, 2014).

La disponibilidad y existencia de datos de precipitación y niveles de agua resulta escasa. Las estaciones activas de registro de niveles operadas por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación son: río Carcarañá - Pueblo Andino, río Chocancharava - Tincunaco, río El Durazno - La Florida, río Grande - Ume Pay y río Coronda - Puerto Gaboto. En función de los objetivos generales de este trabajo de modelación hidrológica-hidráulica resultan de mayor utilidad las estaciones de río Carcarañá - Pueblo Andino (01/04/1980 a 31/12/2013) y del río Coronda - Puerto Gaboto (01/06/1984 al 31/01/2010). En el primer sitio para poder realizar procesos de calibración validación y en el segundo sitio para definir condiciones de borde de aguas abajo del modelo.

Las estaciones de precipitaciones que opera la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación se encuentran en la parte elevada de la cuenca, en el río Grande (Cerro Blanco, El Manzano, La Puente, Lutti, Pampichuela, Yacanto) y El Durazno (La Florida). En tanto que las estaciones de registros de precipitaciones que opera el Servicio Meteorológico Nacional en el área de influencia de la cuenca se sitúan en la provincia de Córdoba: Córdoba Observatorio, Río Cuarto, Laboulaye y Marcos Juárez y en la provincia de Santa Fe: El Trébol, Venado Tuerto y Rosario.

Respecto al régimen de caudales se verifican máximos superiores a 1.200 m³/s en crecidas extraordinarias. No obstante, la curva de duración de caudales medios diarios corresponde a un régimen de crecidas de corta duración y esporádicas, con caudales superiores a los 200 m³/s en no más del 5% de los días del año; también indica caudales superiores a 100 m³/s en no más del 20% de los días del año (FCEIA, 2011). Esta característica observada del régimen de caudales hace factible la simulación por eventos en la cuenca.

IMPLEMENTACIÓN, CALIBRACIÓN Y EXPLOTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Implementación del modelo matemático en la cuenca del río Tercero-Carcarañá

Generación del modelo digital del terreno

El modelo digital del terreno (MDT) se constituyó en base a la utilización de los datos correspondientes a la misión SRTM (Nasa, 2006) con cotas de terreno equiespaciadas cada 90 m.

En función de la capacidad de información a ser manejada que permita operar computacionalmente al modelo matemático se adoptó un nivel de discretización espacial de celdas de 900 m x 900 m. Los datos originales del SRTM fueron procesados con un software específico que permitió recortar los datos dentro del límite de la cuenca; realizar la unificación de los mismos; realizar la proyección plana a Gauss-Krüger (GK)

- faja 4 Argentina Posgar 94, Datum WGS 84 y finalmente realizar el agrupamiento en valores equidistantes de 900 m x 900 m.

Para la delimitación de la cuenca se utilizaron las curvas de nivel obtenidas del MDT agregado de 900 m x 900 m y se realizó el trazado considerando la divisoria de aguas topográfica. Se complementó el trazado utilizando las herramientas específicas del software *ILWIS (2005)* tales como la determinación de las direcciones de escurrimiento, la determinación de la red de drenaje, la determinación de las áreas de aportes correspondiente y, finalmente, la delimitación de la cuenca completa. Estas operaciones se utilizaron para complementar, corroborar o modificar la divisoria de aguas obtenida mediante el trazado sobre las curvas de nivel.

Se consideró como sección de control de la cuenca la desembocadura del río Carcarañá en el río Coronda a la altura de Puerto Gaboto.

Modelación de la red hídrica y puentes.

Para la incorporación de la red de cursos se utilizaron diferentes fuentes de información con la finalidad de obtener tanto la definición de la traza como las características hidráulicas y geométricas más representativas de los diferentes tramos de los cursos. Dichas fuentes fueron: Google Earth ©, relevamientos y estudios previos existentes en el DH-CURIHAM (FCEIA, UNR). En esta primer etapa se realizó la incorporación de los principales cursos. A la fecha no ha sido incorporado a la constitución del modelo la red lagunar del río Cuarto o Chocancharava por no contar aún con la información; sin embargo debe dejarse en claro que a los efectos de estas primeras aplicaciones, donde se focaliza la descripción de crecidas extremas en la cuenca baja del sistema hídrico, la evidencia empírica indica que la respuesta hidrológica en términos de caudales producida por la red del río Cuarto, o Chocancharava, no está directamente en fase con la generación de ondas de crecidas de relevancia en la cuenca baja. Tampoco se constituyó aún el grupo de embalses y presas ubicado en la cuenca alta.

Se realizó el trazado de los cursos en el software Google Earth© y desde allí se exportaron y se realizó el tratamiento correspondiente para obtener la red de cursos georreferenciada en formato DXF. Luego se importaron en la plataforma visual SIMULACIONES 2.0 y se definieron las celdas ríos y sus características en el modelo matemático.

Cada celda río posee las siguientes características: base de fondo, talud, profundidad, coeficiente de rugosidad de Manning en río y en valle y cota de fondo. Estas características debieron ser ingresadas al modelo para cada celda. Se cargaron un total de 1.895 elementos río, generando una extensión de 1.705 km de cursos. En esta primera etapa se incorporó solamente el puente vial de la ruta provincial 10 y el puente ferroviario ubicado aguas abajo de dicha ruta que se encuentran en correspondencia con la sección de registro de niveles y caudales en la cercanía de la localidad de Pueblo Andino.

El modelo se constituyó con un tamaño de grilla (TG) cuadrangular de 900 m de lado (Figura 2), conformado por 75.870 celdas (73.975 celdas tipo valle y 1.895 celdas tipo río) y 150.688 vinculaciones entre celdas.

Calibración preliminar

Una primera calibración del modelo se llevó a cabo a partir de la simulación de 3 eventos extraordinarios ocurridos en

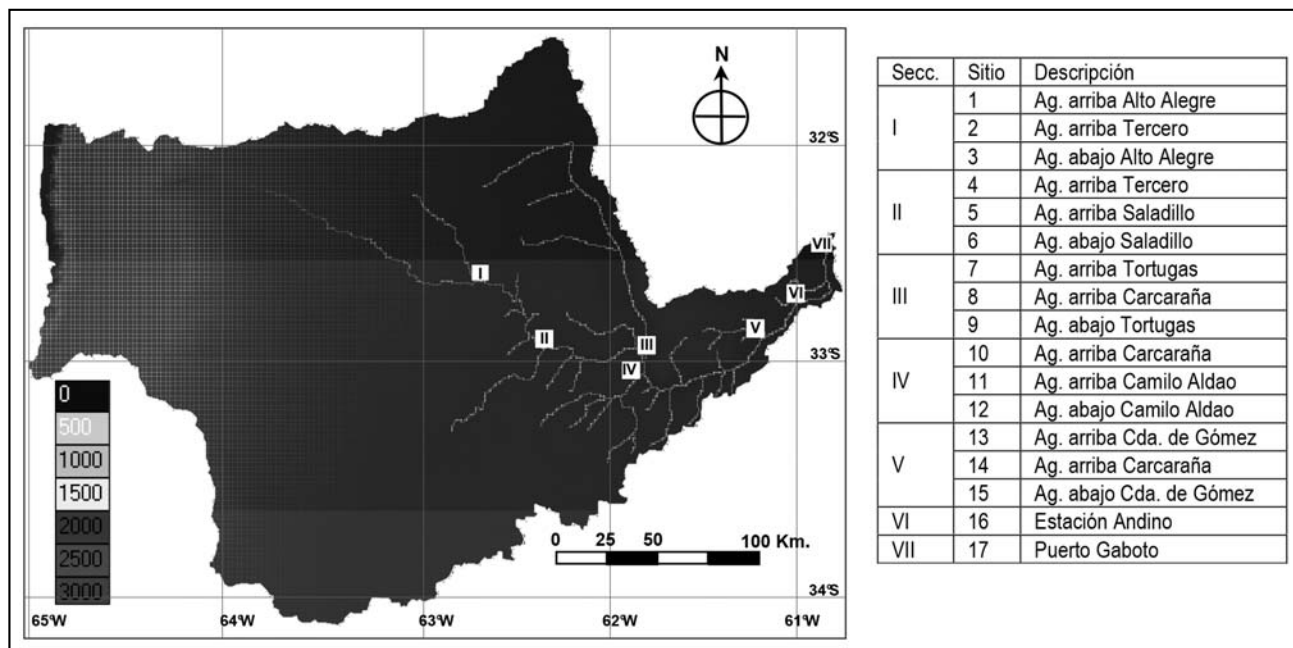


Figura 2. MDT y constitución del modelo matemático. Cuenca del río Tercero o Ctlamochita-Carcaraña.

diciembre de 2000, marzo de 2007 y diciembre de 2013. En todos los casos se partió de la lluvia diaria total registrada en las estaciones del SMN, se determinó la lluvia neta a partir de la técnica del número de curva y luego se corrió el modelo de simulación de escurrimiento. En el borde aguas abajo se consideró la cota de agua respectiva del río Coronda. Se contrastaron volúmenes de escurrimiento, caudales máximos e hidrogramas y limnigramas calculados en la estación Pueblo Andino. En la calificación del ajuste se utilizó la diferencia porcentual en el caso de valores puntuales, en tanto que BIAS, PBIAS y coeficiente de correlación de Pearson R y R2 en el caso de comparación de curvas observadas con calculadas. Esta primer etapa de calibración se focalizó en determinar el rango de rugosidades en el escurrimiento por valle y encausado, como así también en la proposición de la sección transversal de conducción y almacenamiento en las celdas valle.

La distribución espacial de la lluvia se realizó mediante la técnica de los polígonos de Thiessen para las estaciones del SMN. Dado que la información es diaria se hipotetizó una distribución temporal en barros concentrados de 6 h, con el 70 % las primeras 6 h, el 30 % las segundas 6 h. La determinación de la lluvia neta se realizó mediante el método del número de curva CN del SCS (*Chow et al., 1994*). La definición de CN en condición media se hizo de acuerdo a la clasificación de los mismos a partir de los mapas de suelos del INTA. La determinación de los hietogramas netos para cada tormenta se realizó

fijando el CN en el inicio de cada tormenta, considerando una condición antecedente de acuerdo a la lluvia verificada en días previos.

A partir de contar con los valores observados de alturas de agua y de la curva H-Q; lo que permitió obtener los hidrogramas observados en la sección de Pueblo Andino (*SSRHN, 2013*) se realizaron las diferentes corridas para los tres eventos analizados con la finalidad de obtener los parámetros de resistencia en este proceso de calibración preliminar. Los valores resultantes del coeficiente de rugosidad de Manning en cursos se valorizaron en el rango 0,03 - 0,04 s/m^{1/3}. La rugosidad en valle se ajustó en el rango entre 0,06 - 0,08 s/m^{1/3} y las características geométricas de la sección transversal de conducción y almacenamiento dentro de cada resultó en sección triangular, inclinación: 0,02 V: 1 H. Una síntesis de la comparación de las variables en la calibración se presenta en la Tabla 1 y Figura 3. En la Tabla 1 corresponde PBIAS: error porcentual del sesgo (BIAS), EP: error porcentual. Los caudales son inferidos a partir de relación H-Q determinada desde datos de *SSRH (2014)*.

Adicionalmente, en el sitio de la estación Andino, se llevó cabo una comparación entre la curva H-Q observada y la curva inferida desde el modelo en los 3 eventos de calibración. Se determinó un valor del coeficiente R² igual a 0,99 entre la curva H-Q observada y calculada.

Tabla 1. Comparación de variables en sitio Pueblo Andino.

Evento	Hmax	Qmax	Vol	PBIAS	PBIAS	R ²	R ²	EP en	EP en	EP
	(m)	(m ³ /s)	(hm ³)	H (%)	Q(m ³ /s)	H	Q	Hmax	Qmax	vol
Dic. 2000	7,55	692	165	15,72	-21,36	0,67	0,66	-19,64	-26,8	-21,88
Marzo 2007	10,74	974	645	34,51	40,89	0,78	0,77	-2,08	7,92	59,79
Dic. 2013	11,75	1088	763	8,56	8,09	0,81	0,83	-10,66	0,55	8,25

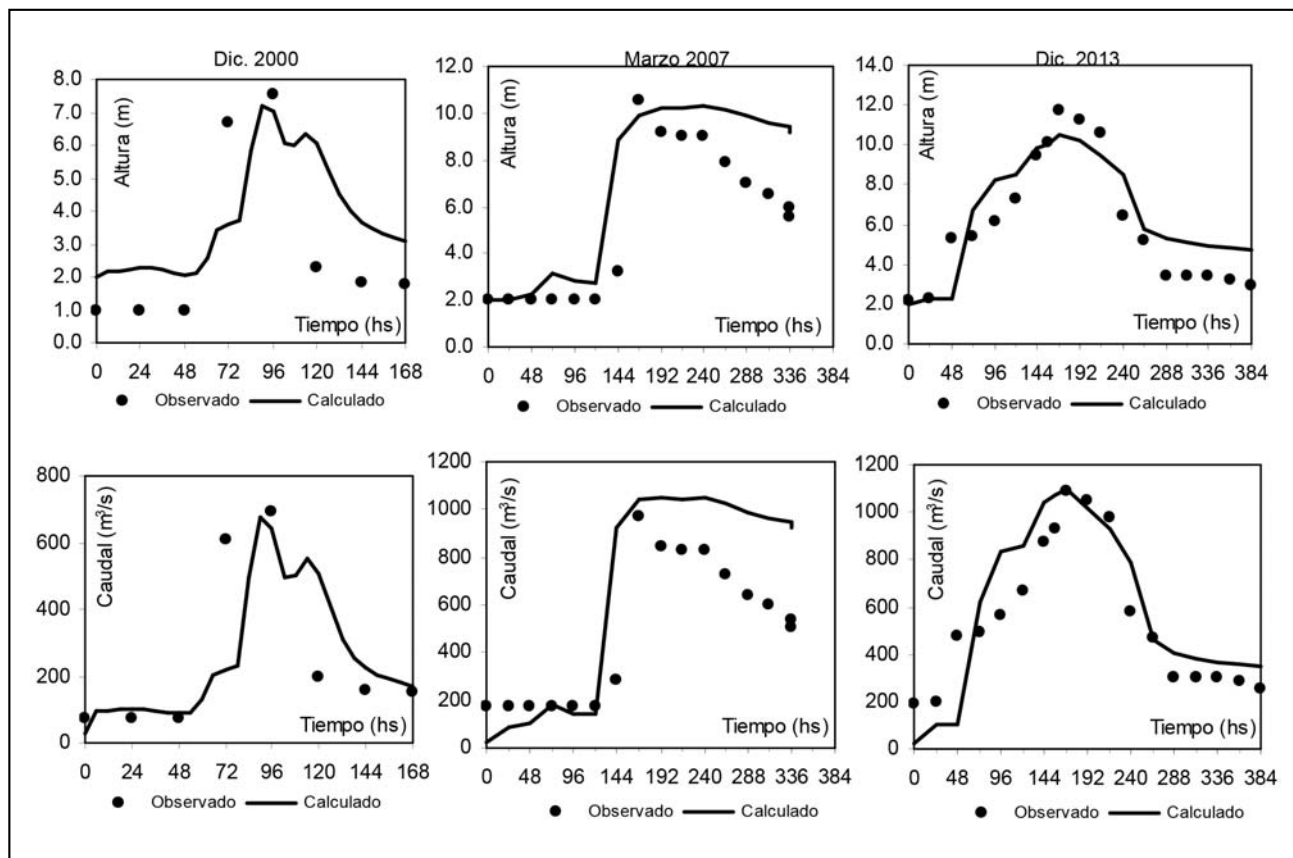


Figura 3. Limingramas e Hidrogramas resultantes en calibración preliminar en Estación Andino.

Aplicación del modelo para análisis de incidencia

Una primer aplicación del modelo fue llevada a cabo para la determinación de la incidencia de los aportes superficiales provenientes de cada una de unidades areales elementales (UAE) en que fue subdividida la cuenca. En diversos problemas asociados con mitigación de inundaciones, en particular, y con el control y aprovechamiento de los recursos hídricos, en general, resulta de interés establecer la incidencia sobre los caudales máximos generados en un determinado punto de un sistema hidrográfico, de cada uno de los aportes tributarios provenientes de los distintos sectores espaciales elementales en que se puede desagregar una cuenca de aportes.

Es claro que la incidencia en cada evento dependerá de la variabilidad espacial y temporal de los múltiples procesos hidrológicos predominantes: lluvia, interceptión, infiltración almacenamiento superficial, dinámica de escurrimiento superficial como así también del estado de humedad antecedente, estado de la cobertura y estado inicial del perfil de humedad de los suelos y de los niveles de los cursos de agua y almacenamientos existentes en el sistema. Este trabajo se focaliza en la determinación de la incidencia sobre caudales máximos de los aportes provenientes desde áreas elementales a partir del único análisis de la dinámica de escurrimiento superficial. Se trata de captar, mediante la simulación de escurrimiento, la esencia de los mecanismos predominantes en la dinámica propagatoria sobre las distintas superficies por donde transita la onda de crecida.

La metodología consistió en subdividir la cuenca en 328 UAE de 160 km² cada una y analizar el aporte de cada área

tributaria sobre los hidrogramas generados por escurrimiento directo en 17 puntos características de la red de cursos principales. La extensión superficial de cada UAE se corresponde con el área media en que se han presentado ciertas tormentas convectivas de elevadas intensidades y láminas en la cuenca (Cañada de Gómez en año 2000, Serodino, 2002 entre otras), especialmente dentro del territorio de Santa Fe. La influencia de cada área tributaria elemental se determinó mediante el análisis de los hidrogramas generados a partir de cada UAE. Los sitios donde se ha analizado la incidencia de aportes se muestran en la Figura 1.

Primeramente se determinó el área máxima tributaria en cada uno de los sitios característicos, cargando el modelo con una lluvia extremadamente larga de modo de alcanzar un estado cercano al equilibrio. Posteriormente se realizaron 328 simulaciones (cantidad de UAE) de escurrimiento con una lluvia de 48 horas de duración que produce 110 mm de lluvia neta precipitando en cada una de las UAE. Se obtuvieron 17 grupos de 328 hidrogramas, los cuales fueron analizados en la búsqueda de la incidencia de cada UAE en la formación de los caudales máximos en cada uno de los sitios. La metodología permite cuantificar las cantidades de UAE con aportes relevantes y su ubicación territorial. En la Tabla 2 se sintetizan áreas totales tributarias a cada sitio de acuerdo a la constitución del modelo y la fracción porcentual de cada área que inciden sobre la formación de los caudales máximos en una serie de sitios sobre el curso principal. A modo ilustrativo en la Figura 4 se muestran los mapas correspondientes a las áreas con incidencia en los caudales máximos en los sitios 9 y 17.

Tabla 2. Áreas tributarias totales y porción que aporta a caudales máximos en cada sitio.

Sitio	Descripción	Área Máxima Tributaria (km ²)	% de Area tributaria con aporte sobre caudales máximos (km ²)
6	Ag. abajo Saladillo	31.509	21,9
9	Ag. abajo A°. Tortugas	50.766	18,8
15	Ag. abajo Cañada de Gómez	59.065	21,3
16	Estación Andino	59.826	21,9
17	Puerto Gaboto	61.455	21,7

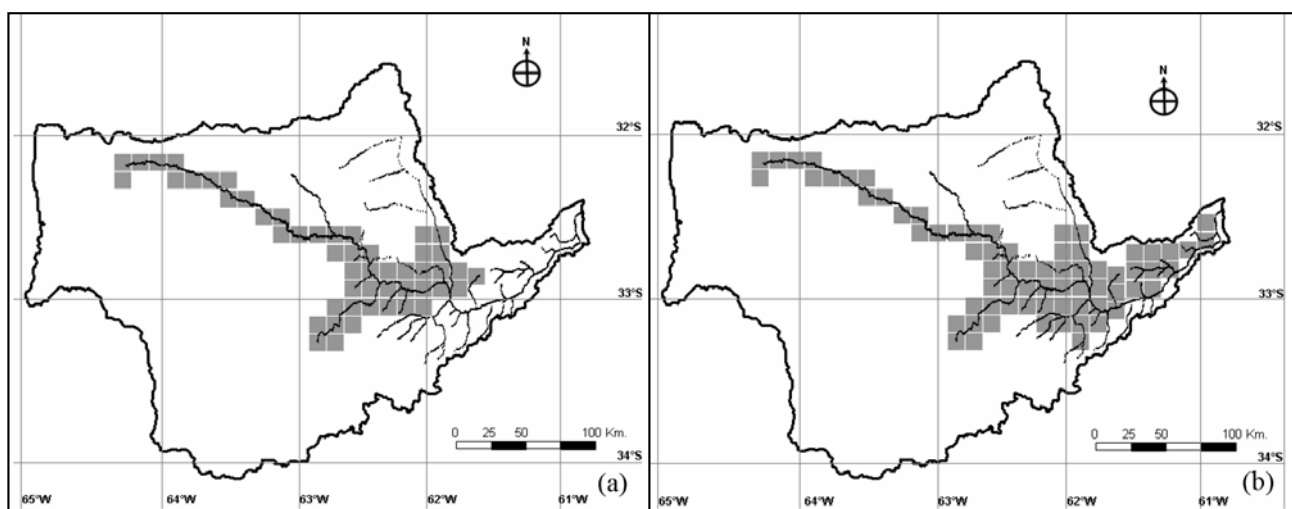


Figura 4. Áreas tributarias al caudal máximo caudal en sitios 9 (a) y 17 (b).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las simulaciones en esta primera etapa de calibración muestran un aceptable nivel de reproducción de hidrogramas y limnigramas en el sitio de contrastación, Estación Andino. Desagregando en las diferentes tormentas puede afirmarse que en la reproducción de las tormentas de diciembre de 2000 y 2013 los resultados alcanzados son aceptables en su conjunto (valores reproducidos de caudales y alturas máximos y forma del hidrograma y limnigrama). En tanto que para la tormenta de marzo de 2007 solo existe una buena aproximación en los máximos (caudal y altura), siendo pobre el ajuste en forma de hidrogramas; limnigramas y volumen (valores de PBIAS H; PBIAS Q y EP Vol).

La comparación entre la relación H-Q deducida a partir de datos de *SSRH (2013)* y la que genera el modelo es muy buena.

Asimismo debe destacarse que para considerar el modelo calibrado, al menos en términos de parámetros de escurrimiento, debe contarse con información de puntos internos donde sea posible llevar a cabo la contrastación entre limnigramas, hidrogramas y volúmenes escurridos.

La reproducción de la crecida de marzo de 2007 marca un importante incertidumbre respecto a volúmenes generados en la transformación lluvia total → lluvia neta. Si bien los

datos de las estaciones pluviométricas indican importantes precipitaciones en toda la cuenca, el hidrograma inferido desde mediciones de alturas en Estación Andino evidencia una rápida curva de subida y el comienzo inmediato de la curva de recesión, esta característica de la onda de crecida no ha podido ser reproducida bajo ninguna hipótesis de pérdida de escurrimiento si se parte del supuesto que precipita en gran parte de la cuenca por encima de los umbrales de pérdida inicial. Al no haberse registrado limnigramas en ningún tributario del curso principal durante el evento no es posible precisar los volúmenes aportados desde cada subcuenca.

Es claro que los resultados de la modelación alcanzados están en correspondencia con la red de cursos implementada. La posible incorporación de cursos de agua se traducirá en modificaciones en la forma del hidrograma, ya que existen cursos de agua que aportan directamente a la generación del caudal máximo y otros cursos que aportan los caudales en forma desfasada por su diferencia de respuesta hidrodinámica. A la fecha no se ha definido la red de cursos, cañadas y bajos del sistema del río Cuarto (o Chocancharava), esta red tiene una respuesta retardada ya que corresponden a paisajes de pendientes extremadamente reducidas, conjuntamente con la existencia de bajos, cañadas y lagunas.

En lo que respecta al análisis de incidencia, una primer característica que se evidencia es que la fracción de área tributaria

con incidencia de importancia sobre los caudales máximos se valoriza entre un 19% al 22% del área total de aporte. La metodología de analizar los escurrimientos generados a partir de lluvias en las diferentes UAE permite desagregar los aportes tributarios permitiendo establecer su cuantificación como su lugar de origen. Si bien se presentaron resultados respecto a la incidencia sobre las ordenadas temporales de presentación de caudales máximos, igual análisis puede llevarse a cabo para analizar incidencia en otras ordenadas temporales. Esta aplicación ha resultado de utilidad para desagregar los mecanismos de la dinámica propagatoria de cada onda de crecida elemental en referencia a cada uno de los sitios considerados.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un primer avance de trabajos de implementación de un modelo matemático distribuido, cuasi bidimensional, de escurrimiento superficial en la cuenca del río Tercero-Carcarañá.

En función del estado del arte en la temática se evidencia la inexistencia de trabajos de esta índole donde se intenten reproducir los procesos dominantes de transformación lluvia-caudal en la cuenca mediante modelación matemática distribuida.

Hasta la fecha se ha realizado la implementación del modelo matemático incorporando el MDT, la red principal de cursos (con la definición de las características hidráulicas y geométricas) y la definición de puentes carretero y ferroviario en la sección de aforo (Pueblo Andino).

La calibración mostró aceptables resultados, logrando una reproducción muy buena en las crecidas de 2000 y 2013 y pobre en la de 2007. Considerando la extensión territorial de

la cuenca para asegurar una aceptable calidad de simulación deberá contarse con contrastaciones de limnigramas e hidrogramas en localizaciones internas de la cuenca.

La curva H-Q que resulta de la modelación presenta un aceptable grado de ajuste en comparación con la curva H-Q observada.

Los parámetros de resistencia obtenidos en el proceso de calibración se encuentran dentro de los valores usuales reportados en la bibliografía.

La aplicación en el análisis de incidencia del aporte generado en las diferentes UAE en que se sectorizó la cuenca permite discriminar las zonas con aporte de escurrimiento dominante en cualquier sitio. La discriminación resulta posible tanto para caudales máximos como medios o mínimos. La aplicación permitió conocer la dinámica propagatoria de las ondas de crecidas provenientes desde las UAÉ.

Se observa una importante escasez de datos tales como lluvias y niveles o caudales dentro de la cuenca. La única estación activa con registro sistemático de niveles y de aforos es la estación de Pueblo Andino (río Carcarañá). Esta situación implica la imposibilidad a la fecha de completar un proceso de calibración-validación con representatividad en toda la cuenca.

Los próximos trabajos estarán orientados a la incorporación de puentes carreteros y ferroviarios que afectan al escurrimiento, la definición e incorporación de otras líneas de escurrimiento como el río Cuarto, o Chocancharava, y sus correspondientes sistema lagunar de bajos y bañados, a los efectos de incorporar mejoras tendientes a lograr una adecuada representación de la dinámica hídrica superficial.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BARCHIESI, G., DÍAZ LOZADA, J.M., CAMINAL, F., HERRERO, H., GARCÍA, M., COSSAVELLA, A., CASTELLO, E., ROMAGNOLI, M., PORTAPILA, M., 2013.

Cuantificación y Caracterización del Escurrimiento en la Cuenca del río Carcarañá. *Sexto Simposio Regional Sobre Hidráulica de Ríos, Santa Fe, Argentina.*

BASILE, P., RICCARDI, G., ZIMMERMANN, E., STENTA, H., BUSSI, P., MANGIAMELI, P., 2013.

Aprovechamiento del río Carcarañá-Tercero como vía fluvial navegable. Parte I: Diseño del sistema de transporte y de la vía fluvial.

Revista Cuadernos del CURHAM, vol.19, año 2013. pp. 51-69. En prensa.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. Y MAYS, L., 1994.

Hidrología Aplicada, McGraw-Hill.

CUNGE, J., 1975.

Two Dimensional Modelling of Flood Plains

Cap. 17 Unsteady flow in open channels (Ed. Mahmood K. and Yevjevich V.) Water Resources Publications, Fort Collins.

FCEIA 2011.

Estudio de Prefactibilidad para el Aprovechamiento del río Carcarañá como Ruta Fluvial Navegable.

Informe de Avance N° 1 y 2. Rosario, Septiembre 2011.

GIACOSA, R., PAOLI, C. Y CACIK, P. (2000).

Conocimiento del regimen hidrológico. Cap. 2.

En: El río Paraná en su tramo medio. Paoli, C. y Schreider, M (eds). Tomo 1. ISBN Tomo 1. pp. 69-104. 987-508-121-3. Centro de Publicaciones Universidad Nacional del Litoral.

ILWIS (2005).

Integrated Land and Water Information System.

ILWIS 3.3 Academic. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente.

- NASA, 2006.
Shuttle Radar Topography Mission.
<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- PAOLI, C., IRIONDO, M. Y GARCÍA, N., 2000.
Características de las cuencas de aporte. Cap. 1.
En: El río Paraná en su tramo medio. Paoli, C. y Schreider, M. (eds). Tomo 1. ISBN Tomo 1. 987-508-121-3. Centro de Publicaciones Universidad Nacional del Litoral.
- RICCARDI, G. 2000.
Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes Rurales y Urbanos.
XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba, Argentina. Vol. II, pp. 159-168.
- RICCARDI, G., BASILE, P., ZIMMERMANN, E., STENTA, H., BUSSI, P., MANGIAMELI, P., PESCI, M., 2013.a.
Diseño de presas de navegación en el estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del río Carcarañá como vía fluvial navegable.
Sexto Simposio Regional Sobre Hidráulica de Ríos, Santa Fe, Argentina.
- RICCARDI, G., BASILE, P., ZIMMERMANN, E., STENTA, H., BUSSI, P., MANGIAMELI, P., PESCI, M., 2013.b.
Aprovechamiento del río Carcarañá-Tercero como vía fluvial navegable. Parte II: Diseño hidráulico de presas de navegación.
Revista Cuadernos del CURIHAM, vol 19, año 2013. pp. 71-85.
- RICCARDI, G., STENTA, H., SCUDERI, C., BASILE, P., ZIMMERMANN, E., TRIVISONNO, F., 2013.c.
Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real.
Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IV, núm. 1, pp. 83-105
- SSRHN, 2013.
Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, Base de Datos Hidrológica Integrada
<http://www.hidricosargentina.gov.ar>
- SSRHN, 2014.
Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación,
http://www.hidricosargentina.gov.ar/documentos/referencias_i8/31.pdf (acceso 15/04/2014).
Elaborado por Santiago Javier Martínez. 10 pag.
- STENTA, H., RENTERÍA, J. P. Y RICCARDI, G., 2005.
Plataforma Computacional para Gestión de Información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial.
XXº Congreso Nacional del Agua y IIIº Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza. ISBN 987-22143-0-1. CD-ROM Cap. Hidrología. T 74. pp. 1-13.
- VENENCIO, M. DEL V., 2007.
La Recarga Natural Al Acuífero Libre Y Su Vinculación Con La Variabilidad Climática Regional.
Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional De Córdoba. 211 págs.