

APLICACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DISTRIBUIDO EN LA CUENCA DEL A° LUDUEÑA PARA DIFERENTES ALTERNATIVAS DE OBRAS HIDRÁULICAS ORIENTADAS AL SANEAMIENTO HÍDRICO INTEGRAL

Hernán Stenta⁽¹⁾, Gerardo Riccardi⁽²⁾, Raúl Navarro⁽¹⁾, Erik Zimmermann⁽²⁾, Raúl Postiglione⁽³⁾, Pedro Basile⁽²⁾, Oscar Zucca⁽³⁾, Soledad Mendez Zacarías⁽²⁾

(1) Dirección Provincial de Protección Urbana Contra Inundaciones. Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente. Prov. de Santa Fe.

(2) Departamento de Hidráulica y CURIHAM. FCEIyA. Universidad Nacional de Rosario.

(3) Dirección General de Hidráulica y Saneamiento de la Municipalidad de Rosario

Montevideo 970 (2000) Rosario, Argentina.-Telefax: +54+341-4721167 – e-mail: hstenta@santafe.gov.ar

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal obtener, mediante modelación matemática distribuida, las dimensiones e impactos de diferentes alternativas de obras (medidas estructurales) en la respuesta hidrológica-hidráulica de la cuenca del A° Ludueña (Rosario, Santa Fe). Las obras propuestas tienen como objetivo proteger contra inundaciones a diferentes sectores poblados dentro de la cuenca ante crecidas asociadas a eventos extraordinarios. El trabajo se realizó entre el personal técnico del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario; la Dirección General de Hidráulica y Saneamiento de la Municipalidad de Rosario y el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (MASPyMA) de la Provincia de Santa Fe. La metodología propuesta para el estudio comprendió la implementación; calibración y validación del modelo matemático distribuido hidrológico-hidráulico CTSS8 (Riccardi, 2000) en la cuenca del A° Ludueña; la definición del escenario de diseño; la determinación del nivel aguas abajo correspondiente al Río Paraná y las condiciones asociadas a la humedad antecedente en la cuenca. Se plantearon diferentes alternativas de obras que incluyeron conductos con captación en diferentes cursos de la red hídrica con descarga directa al Río Paraná; almacenamientos temporarios (presa de retención de crecidas) y terraplenes de defensa en sectores poblados y se plantearon diferentes combinaciones de dichas obras. Se analizaron un total de 14 alternativas de obras. Los resultados permiten definir las características de las obras y sus impactos en todo el dominio espacial de la cuenca, pudiendo disponer por lo tanto de mejor calidad de información respecto a la toma de decisiones de las obras a ejecutar. Se obtuvieron caudales máximos a derivar; alturas de agua y volúmenes de almacenamiento máximo para todas las alternativas planteadas. Se concluye respecto a la importancia; los beneficios y las potencialidades de la implementación y explotación de modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos distribuidos para el estudio de impactos de obras en el saneamiento hídrico de una cuenca. Es posible realizar una gran variedad de escenarios, con diferentes alternativas de obras obteniéndose resultados satisfactorios con mínimo esfuerzo computacional.

Palabras Clave: modelos distribuidos; obras hidráulicas, saneamiento hídrico

INTRODUCCION

Los procesos de urbanización, desarrollados generalmente en forma anárquica, implican, entre otros efectos, alteraciones de los equilibrios ambientales naturales, impermeabilizaciones de las superficies, aumentos de caudales y volúmenes de escurrimiento, de cargas de sedimentos, movilización y removilización de contaminantes y basura urbana, que culminan afectando la calidad de vida de los ciudadanos (DH, 2005).

La cuenca baja del A° Ludueña produce el escurrimiento en sectores del caso urbano de la localidad de Rosario. Históricamente, y en general en sectores ubicados en los valles de inundación de cursos de agua se produce, ante eventos de diferentes magnitud impactos sobre los sectores poblados que ocupan dicho valle de inundación. Tal es el caso del A° Ludueña, en los sectores denominados como Barrio Empalme Graneros (sector donde se produce en entubamiento del A° Ludueña) y el denominado Barrio Nuevo Alberdi (ubicado en la margen izquierda del canal Ibarlucea) a aproximadamente 1000 m aguas arriba de la desembocadura de dicho canal en el A° Ludueña. En este sentido, a lo largo de la historia se han presentado diferentes avances e intervenciones con medidas estructurales y en algunos casos acompañadas de medidas no estructurales.

En la década de los '40, ante la ocurrencia de un evento lluvioso de entre 250 mm y 300 mm precipitados en 3 días; y ante el impacto en sectores poblados se realizó el proyecto y construcción del primer entubamiento, consistente en 2 tubos de diámetro 3.80 m cada uno (denominado Aliviador 1); con una sección neta de escurrimiento de 22.7 m² y con capacidad para evacuar un caudal a sección llena sin desborde de aproximadamente 100 m³/s.

En la década de '60; nuevamente la ocurrencia de un evento de similar características al antes descrito generó impactos en sectores urbanos y se proyectó y construyó un conducto adicional a los dos anteriores de 4.10 m de diámetro (conducto Olivé); con lo que el sistema total contaba con una sección disponible de 35.8 m² y un caudal a evacuar sin desborde de aproximadamente 150 m³/s.

En la década de los '80; se produjo un impacto muy importante en el barrio Empalme Graneros, con alturas de agua en las casas de aproximadamente 2.0 m; ante un evento de aproximadamente 300 mm en 3 días (es decir, de similares características a los anteriores). A partir de dicha situación se realizó el proyecto y ejecución de una serie de obras o medidas estructurales que consistieron en:

- Presa de retención de Crecidas del A° Ludueña (sector sur-oeste de la cuenca; con un área de aporte en el cierre de la misma de aproximadamente 390 Km² (representando una atenuación del 75 % en términos de caudales)

- Dos conductos aliviadores (Aliviador 2) de sección rectangular de 4.30 m de ancho y 5.05 m de alto cada uno y revestimiento de los dos conductos originales reduciendo su diámetro a 3.30 m. De esta forma se disponía de un área de evacuación de los conductos de 73.7 m² y una capacidad de aproximadamente 300 m³/s (más la presa de retención de crecidas). Es decir se duplicó la capacidad respecto a la década del '60 y se ejecutó una presa de retención de crecidas. Conjuntamente se dispusieron una serie de medidas no estructurales orientadas a limitaciones en términos de ocupación de áreas inundables en sectores aledaños a los principales cursos de aguas.

En la situación actual, el sector de entubamientos se encuentra a aproximadamente 2600 m aguas arriba de la descarga del A° Ludueña en el Río Paraná. Allí se produce el pasaje de la sección del A° Ludueña a cielo abierto (canal de 20 m de base de fondo; taludes laterales a 45 ° y profundidades de aproximadamente 6.0 m) en las conducciones cerradas descritas anteriormente (1 conducto circular de 4.10 m; dos conductos circulares de 3.30 m de diámetro cada uno y dos conductos rectangulares de 4.30

m de ancho por 5.05 m de alto cada uno). El entubamiento se extiende por 1400 m. Finalmente el A° Ludueña escurre a cielo abierto hasta su descarga en el Río Paraná.

En Marzo de 2007 se produjo un evento extraordinario, de aproximadamente 365 mm y 400 mm de lluvia total en 5 días. Este evento produjo impactos de diferentes sectores de la zona urbana de Rosario y localidades vecinas. En función de lo anterior surge el planteo de nuevas obras o medidas estructurales y no estructurales.

Se remarca el impacto producido principalmente por el desarrollo urbano sin una planificación controlada o preestablecida; el incremento de la impermeabilización y el impacto de las vías de comunicación; que en este caso actúan, con sus cunetas, acelerando la respuesta de la cuenca. Se hace notar que los eventos descriptos anteriormente no son muy disímiles entre sí (en términos generales de duración y láminas) y que los impactos son cada vez mayores; lo que implica a su vez, la necesidad de definición de mayores obras.

En este contexto, el presente trabajo describe la utilización de un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasibidimensional, en el marco de definición del proyecto de obras para protección urbana contra inundaciones en la cuenca del A° Ludueña. Se analizan diferentes alternativas de obras y se obtienen las características de las mismas. Esta definición permite contar con mejor y más precisa información a la hora de la toma de decisión respecto a la alternativa a adoptar para proyectar y construir.

DESCRIPCION DE LOS TRABAJOS

El presente trabajo se realizó en forma conjunta entre personal técnico del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (MASP y MA. Prov. de Santa Fe); la Dirección General de Hidráulica y Saneamiento de la Municipalidad de Rosario y el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (Univ. Nac. de Rosario).

Se implementó y calibró el modelo matemático en la cuenca del A° Ludueña. Se definieron las obras básicas y las diferentes combinaciones de dichas obras para la determinación de las obras completas a modelar. Se realizaron las corridas del modelo, para cada alternativa, obteniendo las dimensiones e impactos de dichas alternativas; respetando una serie de condicionamientos o limitaciones impuestas.

El trabajo se ordena como sigue: Se realiza una breve descripción del modelo matemático; se describen las características principales de la cuenca del A° Ludueña; y se detalla la implementación y calibración del modelo matemático en dicha cuenca. Se plantean las diferentes alternativas de obras y se resumen los resultados. Finalmente se elaboran las conclusiones de mayor relevancia.

Descripción del Modelo Matemático

En el presente estudio se utilizó el modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional denominado CTSS8 (Riccardi, 2000). El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). En sucesivas investigaciones se ha ampliado el campo de aplicación original (Riccardi, et. al, 1995 y Riccardi, 1997 y 2002). Actualmente, 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.

El modelo CTSS8 es operado desde la plataforma computacional SIMULACIONES 2.0 (Stenta et al., 2005) desarrollada en entorno de Windows; la plataforma facilita el ingreso y definición de datos al modelo y el análisis e interpretación de los resultados.

Descripción de la 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 (Figura 1); perteneciendo a la provincia de Santa Fe, República Argentina; linda al sur y al oeste con la cuenca del arroyo Saladillo, al norte con la del A° San Lorenzo y engloba parte del casco urbano de la ciudad de Rosario, desembocando en el río Paraná. Tiene un área de aporte de aproximadamente 800 km², una pendiente media de 1,4 por mil y su cabecera se ubica en la cota 70 IGM. La red hídrica principal está constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Funes-Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan numerosos y pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales que aportan al escurrimiento. La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. Puede apreciarse, con esta breve descripción, que el sistema hidrológico que se analizará presenta un grado importante de intervención antrópica, sea mediante trazado de canales sobre cursos existentes, trasvasamiento de aportes hacia cuencas vecinas o tendido de una densa red de vías de comunicación. La confluencia de estos factores con los que definen naturalmente el drenaje constituye la compleja morfología que se analizará. La sección de control corresponde a la descarga del arroyo Ludueña en el Río Paraná.

El balance medio anual se caracteriza por una precipitación anual de 967 mm, una evapotranspiración de 923 mm/año con un excedente de 43,8 mm/año. El caudal base del arroyo es de 0,50 m³/s, en tanto que en crecidas ordinarias se alcanzan los 80 m³/s y en extraordinarias (R > 50 años) caudales superiores a 400 m³/s. (Riccardi et al., 2002).

En la cuenca se presentan, en la parte alta de la misma, suelos bien drenados, de permeabilidad moderada a moderadamente lenta, no susceptibles a anegamiento y aptos para la agricultura (del tipo argiudoles vérticos) y en la parte central y norte (zona deprimida), se presentan suelos con drenaje insuficiente y afectados por las fluctuaciones de la napa freática (asociación de argiudoles vérticos y natracualfes típicos) (INTA, 1990). La agricultura constituye el principal uso del suelo, destacándose fundamentalmente el cultivo de soja y en menor medida el maíz y el trigo.

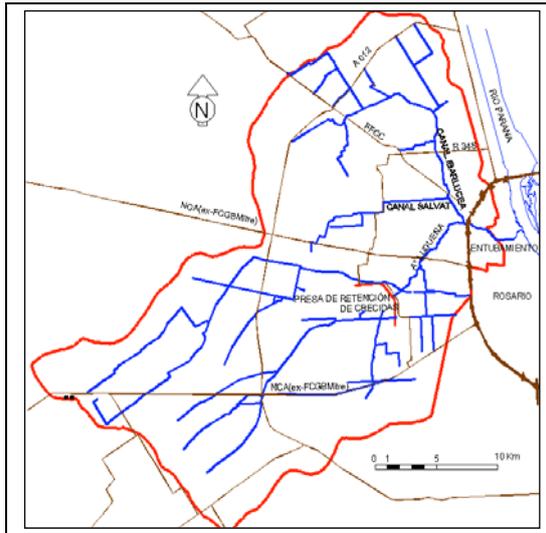


Figura 1. Cuenca del A° Ludueña

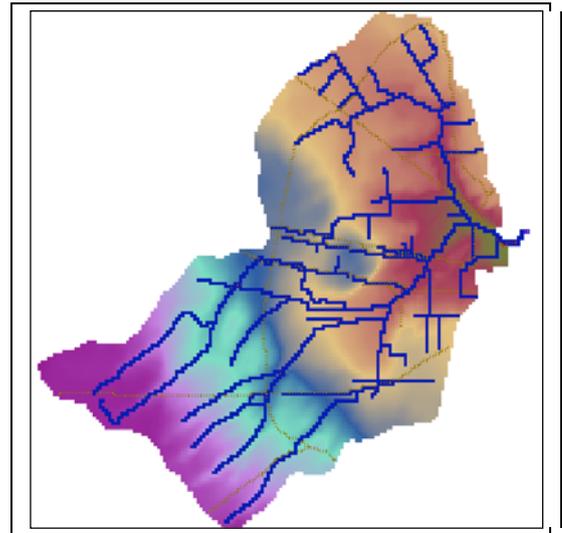


Figura 2. Modelo de la cuenca del A° Ludueña.

Implementación; Calibración y Validación del Modelo Matemático

La información básica para la implementación del modelo se obtuvo principalmente de relevamientos realizados por el MASPYPMA. Asimismo se contó con información recopilada en distintos organismos oficiales.

Generación del modelo digital del terreno

El modelo digital del terreno (MDT) se constituyó en base a la georreferenciación y vectorización de cartas topográficas del IGM, puntos relevados en campo y curvas de nivel digitalizadas del IGM. El tratamiento de la información comprendió: a) escaneo de cartas del IGM; b) georreferenciación de cartas escaneadas; c) tratamiento de cartas georreferenciadas en sistema CAD; d) vectorización de las curvas de nivel; e) incorporación de puntos individuales, relevamientos parciales y MDT sectorizado en distrito Rosario; f) conversión a formato ASCII; g) generación de MDT en malla cuadrangular; h) mejoramiento por iteraciones sucesivas de MDT; i) delimitación de la cuenca. La cuenca se constituyó con un tamaño de grilla (TG) cuadrangular de 250 m de lado (Figura 2).

Modelación del sistema de drenaje

Para la definición del sistema de drenaje se contó con relevamientos realizados por el MASPYPMA; así como también se relevó información por medio de recorridas por todos los distritos incluidos parcial o totalmente en el sistema hídrico del arroyo Ludueña. Se definieron las trazas de los cursos ya georreferenciadas y se generaron archivos en formato dxf para importación en la plataforma y finalmente se definieron las celdas ríos que definen la red de cursos. Cada elemento río posee las siguientes características: base de fondo, talud, profundidad, coeficiente de Manning en río y en valle y cota de fondo. Estas características debieron ser ingresadas al modelo para cada elemento. Se definieron un total de 1479 elementos río, generando una extensión de 370 Km de cursos.

Modelación del trazado vial y ferroviario

Para la definición de los terraplenes viales y ferroviarios se recopiló información proveniente de organismos públicos (MASPYMA; DPV, DNV, etc); empresas privadas e información existente en el DH-FCEIA –UNR. Se definieron las trazas de los terraplenes (georreferenciadas); se generaron archivos en formato dxf y se importó a la plataforma. Finalmente se definieron las vinculaciones

asignando las características siguientes: Cota de coronamiento, coeficiente de descarga y cotas de terreno natural al pie del terraplén. El coeficiente de descarga representa al terraplén funcionando como vertedero en una situación de desborde. Se cargaron un total de 845 vinculaciones tipo terraplén, generando una extensión de 220 Km.

Modelación de alcantarillas y puentes

La información relacionada a las características de las alcantarillas y puentes se obtuvo a partir de los relevamientos realizados por el MASPZYMA.

Vinculación tipo Alcantarilla: Para definir la vinculación se deben ingresar las siguientes características: ancho de la base de fondo, coeficiente de descarga, cota de fondo y altura. Previendo la situación de desborde del terraplén, es necesario definir la cota del coronamiento del mismo (coincidente con la cota de calzada del terraplén carretero o la cota de riel en los terraplenes ferroviarios) y el coeficiente de descarga correspondiente. Se definieron un total de 62 alcantarillas en toda la cuenca.

Vinculación tipo Puente: Esta vinculación se utiliza para representar el cruce de los canales a través de un puente. Las características a definir son: Número de escalones (según el perfil del terreno), Bases de fondo, coeficientes de descarga y cotas de fondo. Se definieron un total de 10 vertederos en toda la cuenca.

Condiciones de borde e iniciales del modelo

Para cada corrida es necesario definir las siguientes condiciones de borde e iniciales: a) Alturas de agua en todas las celdas del modelo: se obtuvo a partir de considerar situación de caudal base en la red de cursos; b) Lluvia neta: que corresponde al escenario de diseño adoptado; c) Condiciones de borde aguas abajo: asociada a la cota del Río Paraná para la condición de diseño impuesta

El modelo calcula para cada paso de tiempo alturas de agua en cada celda y velocidades y caudales en cada vinculación.

Calibración y validación del modelo

El modelo fue utilizado con los parámetros calibrados y validados en simulaciones realizadas en trabajos antecedentes. Se emplearon los parámetros asociados a las funciones de almacenamiento y conducción en celdas; de resistencia al escurrimiento en cursos y en planicies de inundación y los coeficientes de descarga en puentes y alcantarillas obtenidos por medio de calibraciones realizadas para tormentas de los años 1994; 1996 y 2007 (Stenta, 2008; Riccardi, 2007).

Aplicación del Modelo para Alternativas de Obras

Una vez implementado y calibrado el modelo se procedió a la explotación del mismo; con la finalidad de determinar las características de las diferentes alternativas de obras orientadas a la protección contra inundaciones de sectores poblados de la ciudad de Rosario y alrededores.

Propuestas de obras

Las diferentes alternativas de obras básicas son: a) Derivaciones con captación en el canal Ibarlucea y/o en el A° Ludueña con descarga directa al Río Paraná; b) Obra de retención de crecidas en el sector Noreste de la cuenca; c) Terraplenes de defensa en sectores aledaños al valle de inundación del

canal Ibarlucea y d) Almacenamientos con desbordes controlados del curso en el sector del Bosque de los Constituyentes (Sector Este de la cuenca). En la Figura 3 se representan dichas alternativas de obras básicas y se describen a continuación.

- Captación en el canal Ibarlucea con derivación por Ruta 34 S hasta su descarga en el Río Paraná.
- Captación en el canal Ibarlucea con derivación por Camino Limite (Limite entre Municipios de Rosario y Granadero Baigorria) hasta su descarga en el Río Paraná.
- Captación en el canal Ibarlucea con derivación por calle Salvat hasta Av. de Circunvalación continuando por dicha avenida hasta su descarga en el Río Paraná.
- Captación en el arroyo Ludueña con derivación por Av. de Circunvalación y por esta última hasta su descarga en el Río Paraná.
- Captación en el arroyo Ludueña con derivación por calle Sorrento hasta su descarga en el arroyo Ludueña.
- Almacenamiento temporario aguas abajo del puente de Av. de Circunvalación y cruce del A° Ludueña en la zona del Bosque de los Constituyentes.
- Obra de retención de crecidas (al norte del cruce de la ruta 34 S y el canal Ibarlucea).
- Terraplén de defensa del barrio Nuevo Alberdi.

A partir de las diferentes alternativas de obras básicas propuestas surgen diferentes combinaciones de las mismas. En tal sentido se definieron un total de 14 combinaciones de obras.

Tabla 1. Combinaciones de obras propuestas.

<i>Alternativa</i>	<i>Obras básicas que la componen</i>
01	Salvat; Camino Limite y Av. de Circunvalación
02	Salvat; Camino Limite y R 34S
03	Salvat; Camino Limite y Obra de retención de crecidas al Norte de la ruta 34 S
04	Salvat y Camino Limite
05	Salvat; Av. de Circunvalación y R 34S
06	Salvat
07	Salvat y Obra de retención de crecidas al Norte de la ruta 34 S
08	Salvat y Sorrento
09	Salvat; Camino Limite; R 34S y Av. de Circunvalación
10	Salvat; Sorrento y Terraplén de defensa en Barrio Nuevo Alberdi
11	Salvat; Sorrento; Av. de Circunvalación y Terraplén de defensa en Barrio Nuevo Alberdi
12	Sorrento; Av. de Circunvalación y Terraplén de defensa en Barrio Nuevo Alberdi
13	Salvat; Sorrento; Terraplén de defensa en Barrio Nuevo Alberdi y Almacenamiento en el Bosque de los Constituyentes
14	Sorrento y Terraplén de defensa en Barrio Nuevo Alberdi

La alternativa básica de captación en el canal Ibarlucea con derivación por calle Salvat se consideró en la mayoría de las alternativas ya que cumplía con algunas ventajas de importancia vinculadas a la facilidad de ejecución (sector periurbano); a la captación directa de los canales Ibarlucea y Salvat; a los beneficios respecto a la ubicación de la obra de descarga y a la disponibilidad de espacio para la ejecución de la obra de embocadura.

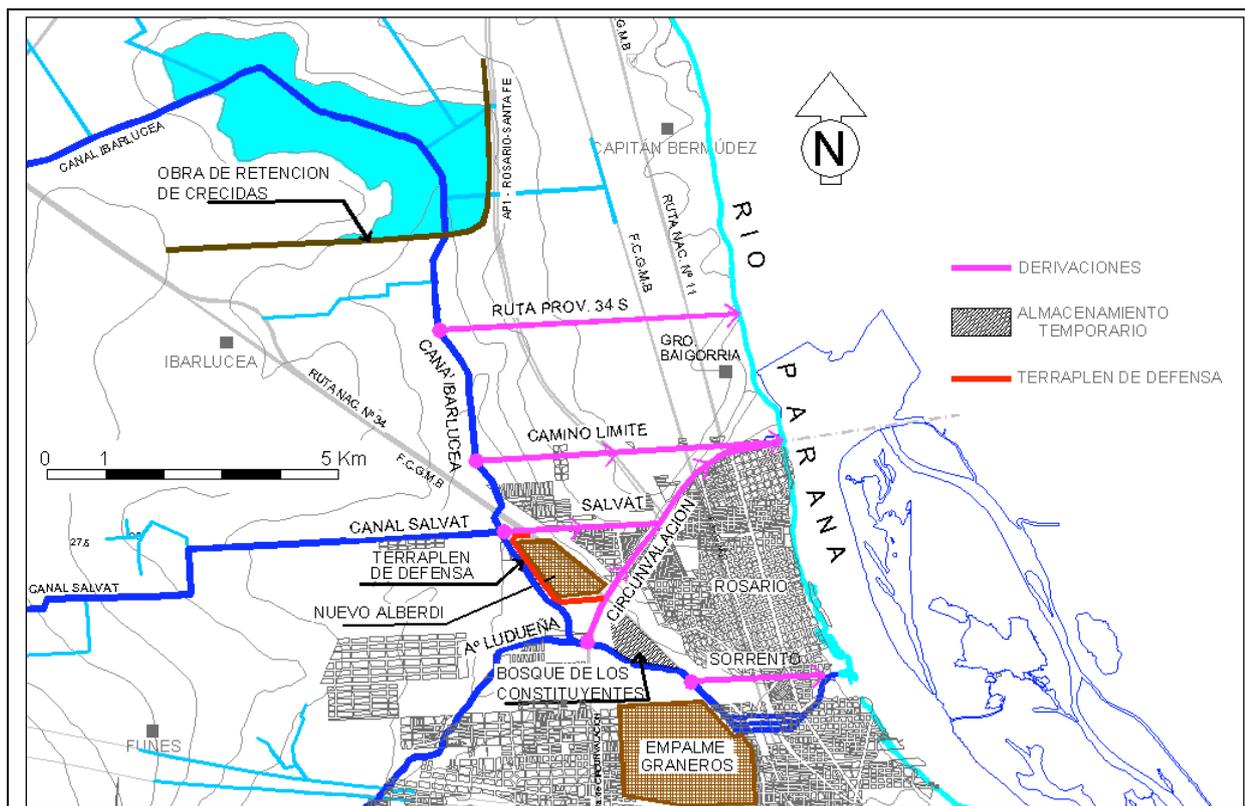


Figura 3. Alternativas de obras básicas.

Escenario utilizado en las diferentes modelaciones para cada alternativa de obra.

Recurrencia de la lluvia total. Para el análisis de la lluvia total de diseño se consideraron las estaciones de Rosario (SMN- Rosario Aeropuerto, 1935-2007); Casilda (INTA-Agencia de Extensión Rural Casilda, 1962-2007) y Zavalla (FCAG-UNR-Estación Agroexperimental Zavalla, 1973-2007). Se realizó un análisis de consistencia por medio del método de dobles acumulaciones considerando la estación Rosario como estación de confianza. Se realizó la construcción de las muestras de lluvias para distintas duraciones; seleccionando lluvias para duraciones de 24 hs, 48 hs, 72 hs, 96 hs y 120 hs. Para cada estación y a cada una de las muestras se le ajustaron cinco modelos probabilísticos: LogGauss (Galton), Gumbel, GEV, Pearson y Exponencial. De acuerdo a las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y Chi-Cuadrado, el modelo que mejor ajusta es el modelo de valores extremos tipo I (EV I) de Gumbel. En función del modelo de Gumbel se determinó la lluvia de diseño en la cuenca, adoptando una duración de 5 días y una recurrencia de 100 años.

Duración de la lluvia total. Se adoptó una duración de la lluvia total de 5 días. La duración adoptada es similar a la duración presentada en el evento extraordinario del mes de marzo de 2007 en la ciudad de Rosario. Se consideró la lluvia de diseño distribuida uniformemente en toda la cuenca.

Distribución temporal diaria y sub-diaria de la lluvia de diseño. La distribución a escala temporal diaria de las lluvias de diseño se realizó mediante el método de bloques alternos. A tal fin se emplearon las curvas P-D-R de la estación Rosario para las duraciones de 1 día, 2 días, 3 días, 4 días y 5 días, calculadas con el modelo de Gumbel. La distribución a escala temporal sub-diaria se realizó utilizando coeficientes de relación entre láminas de diferentes duraciones: $P_{diaria}/P_{24}; P_{24}/P_{12}, P_{12}/P_6; P_6/P_3$, derivados de la serie corta de Ros.-Aero (40 años) a partir del modelo de Gumbel (Basile et al; 2009).

Condición antecedente para la lluvia de diseño.

Con el fin de estimar las condiciones antecedentes a las tormentas registradas se consideró el siguiente índice de precipitación antecedente (Zimmermann et al. (2009):

(1)

donde IPA(n) es el índice de precipitación antecedente correspondiente al día n del año, P(n) es la precipitación del día n, k(n) el coeficiente de decaimiento correspondiente al día n, dado por la siguiente ecuación:

$$k(n) = k_{\text{ver}} + (k_{\text{inv}} - k_{\text{ver}}) \text{seno}^2\left(\frac{\pi}{365}n\right) \quad (2)$$

Los coeficientes de decaimiento se adoptaron como: $k_{\text{ver}} = 0.980$ y $k_{\text{inv}} = 0.995$. El valor del IPA se considera un parámetro representativo de un estado de humedad antecedente de la cuenca expresado en forma continua en el tiempo. El coeficiente de decaimiento, variable durante el año, trata de reproducir las extracciones por evapotranspiración variables estacionalmente debido a la variabilidad de las condiciones de insolación y estado de humedad ambiente.

Dado que en definitiva el IPA tiene que dar información asociada con parámetros utilizados para la estimación de pérdidas del flujo, se propone vincularlo por medio de una regresión lineal entre el IPA y el número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU (NRCS-USA) (Zimmermann et al., 2009). Para tal relación se consideraron seis tormentas aforadas en la cuenca del arroyo Ludueña con los valores de CN obtenidos de los hidrogramas de aforo. Rigurosamente hay mayor información para correlacionar entre si los parámetros pero es sabido que las condiciones de impermeabilización de la cuenca han cambiado en los últimos años y por ende no es recomendable utilizar aforos de períodos anteriores.

A los efectos del diseño hidrológico se consideraron estados de humedad antecedente, en relación a su probabilidad de excedencia determinada en eventos extremos. Para ello se seleccionaron las condiciones antecedentes de las tormentas extremas y se le dio un tratamiento estadístico de modo de asociar el IPA y el CN a una probabilidad de excedencia. Se adoptó un valor de CN variable por cada día para la tormenta de diseño; dichos valores son: CN día 1: 87.3; CN día 2: 88.8; CN día 3: 90; CN día 4: 90; CN día 5: 90. Los valores adoptados corresponden a una probabilidad de excedencia de $P(x > x_0) = 0.05$. A partir del IPA asociado a $P(x > x_0) = 0.05$ y el CN correspondiente (obtenido por regresión lineal) se utilizaron las ecuaciones (1) y (2) para obtener los valores de CN de los días 2, 3, 4 y 5. A los fines de proyecto de obras se consideró un valor máximo de CN = 90. Mas detalles del presente tratamiento pueden consultarse en Zimmermann et al. (2009).

Condición de Borde. Nivel del Río Paraná. Se consideró un nivel hidrométrico del río Paraná de 5.30 m (estación Rosario), asociado a una recurrencia de $R = 5.6$ años; lo que corresponde a una cota en la desembocadura del A° Ludueña de + 8.53 IGM. El nivel considerado es el que se registró en el evento ocurrido en Marzo de 2007.

Resumen del Escenario de Diseño.

Lluvia total de $R = 100$ años. P5 días = 294 mm (Día 1: 19 mm + Día 2: 45 mm + Día 3: 190 mm + Día 4: 22 mm + Día 5: 18 mm). Distribución diaria mediante bloques alternos. Distribución subdiaria según

coeficientes de relación entre láminas de diferentes duraciones. Distribución areal uniforme. Condición de Humedad antecedente → CN variable: 87.3; 88.8; 90; 90; 90. Pneta = 198 mm.

Limitaciones impuestas para el proyecto de obras.

Como planteo de obras se requiere a su vez que se verifiquen determinadas limitaciones que están asociadas principalmente a evitar inundaciones en sectores poblados. En este sentido se definen las siguientes limitaciones:

i) Sector de Embocadura. Barrio Empalme Graneros. Caudal máximo en la embocadura: 285 m³/s; cota: + 14.80 IGM. La condición de caudales y niveles impuestos está directamente asociado a la protección contra inundaciones del Barrio Empalme Graneros (dicho barrio se encuentra en el sector de embocadura del A° Ludueña). Por lo anterior, el diseño de obras propuestas debe considerar tal limitación. Niveles superiores implican anegamientos en determinadas esquinas del Barrio. La capacidad de descarga se encuentra asociada a una cota del Río Paraná de + 8.53 IGM.

ii) Canal Ibarlucea. Barrio Nuevo Alberdi. Cota de desborde en el sector del Barrio Nuevo Alberdi: + 16.50 m IGM. Niveles superiores implican desborde del canal Ibarlucea e inundación en un sector del Barrio. El sector se encuentra ubicado a aproximadamente 1400 m aguas arriba de la descarga del canal Ibarlucea en el A° Ludueña. Se plantea como alternativa de obra en caso de desborde el diseño de un terraplén de defensa en la margen izquierda en el sector poblado de dicho Barrio.

Resultados de la Modelación para las Alternativas Propuestas

Para cada una de las alternativas planteadas se realizó la corrida del modelo. Por medio de aproximaciones sucesivas para cada alternativa; modificando principalmente las características de las obras de manera tal que se cumplen las limitaciones impuestas, se obtuvieron las dimensiones de las obras.

A modo de ejemplo se presentan los resultados para diferentes alternativas de obras. En la Tabla 2 se resumen los resultados de la Alternativa 01; en la Tabla 3 se resumen los resultados de la Alternativa 07 y en la Tabla 4 se resumen los resultados de la Alternativa 14.

Tabla 02. Resumen de resultados para la Alternativa 01.

Alternativa 01	Caudal a Derivar (m ³ /s)	Veloc. Media (m/s)	Pendiente (‰)	Diám. Conducto (m)
Salvat	135	4,13	1,5	6,85
Camino Limite	65	3,68	1,9	4,9
Av. de Circunvalación	95	3,17	1	6,4

Tabla 03. Resumen de resultados para la Alternativa 07.

Alternativa 07	Caudal a Derivar (m ³ /s)	Veloc. Media (m/s)	Pendiente (‰)	Diám. Conducto (m)
Salvat	241	4,59	1,4	8,65
Obra de Retención. Caudal máximo de entrada: 130 m ³ /s; caudal máximo de salida (laminado): 27 m ³ /s; Cota de agua máxima: 25,25 m IGM; Permanencia: 180 hs (para cotas superiores a 25 m IGM); Superficie de Afectación a cota 25,25 m IGM: 15 km ² ; Volumen máximo almacenado: 16 Hm ³ ; Long. Obra de cierre: 5600 m.				

Tabla 04. Resumen de resultados para la Alternativa 14.

Alternativa 14	Caudal a	Veloc. Media	Pendiente	Diám. Conducto
----------------	----------	--------------	-----------	----------------

	Derivar (m ³ /s)	(m/s)	(‰)	(m)
Sorrento	190	3,43	2,6	7
Terraplén de defensa en Nuevo Alberdi. Cota de pelo de agua máxima: 18,00 m IGM.				

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados del modelo en cada alternativa de obra permiten obtener los valores de las variables hidrológicas e hidráulicas que caracterizan la respuesta de la cuenca y el estado de la misma en función de los requerimientos impuestos. Los resultados se obtienen en términos de las variables de flujo caudales; alturas de agua y velocidades para todo tiempo en todo el dominio espacial.

Como verificación se realizó el análisis de comportamiento de cada una de las alternativas de obras propuestas para una lluvia similar a la ocurrida en Marzo de 2007. Se observó que las alternativas tienen un adecuado margen de seguridad respecto a los límites impuestos; lo que indica que no existirán impactos de importancia si se ejecutara cualquiera de las alternativas propuestas y se produciría una lluvia similar a la ocurrida en Marzo de 2007.

Se observó, según todas las alternativas propuestas, que la más conveniente, sin considerar el terraplén de defensa en el Barrio Nuevo Alberdi resulta la Alternativa 01. La misma tiene factibilidad de ejecución y permite definir las diferentes conducciones por etapas de obras (es decir, generar un plan de obras a corto, mediano y largo plazo). Presenta la ventaja de captar caudal gradualmente y utilizar la conducciones como desagüe pluvial urbano de las zonas que atraviesa. Resulta una de las alternativas de mayor costo.

Respecto al terraplén en Nuevo Alberdi la alternativa más conveniente es la Alternativa 14. Presenta la desventaja de que el caudal se capta en la sección cercana a la embocadura; lo que implica el escurrimiento de todo el caudal en zonas pobladas, incrementado la vulnerabilidad de dichas zonas. Resulta una de las alternativas más económicas.

Respecto a la alternativa de obra de retención de crecidas al Norte de la ruta 34S (Alternativas 03 y 07) se observa un importante impacto del área afectada para los niveles de agua alcanzados dentro del embalse. Se observa una reducción importante del caudal; pero dicha condición no se refleja hacia aguas abajo, en los sectores poblados, ya que se suman los aportes de las zonas ubicadas aguas abajo de dicha obra. Asimismo, la zona afectada por la ocupación de las aguas es una zona muy productiva desde el punto de vista agropecuario.

Se observó que las obras más eficientes (es decir que resultan más económicas y cumplen con las limitaciones impuestas) son aquellas ubicadas en la cercanía de los sectores poblados. A media que la obra planteada se ubica alejada (hacia aguas arriba) de dichos sectores poblados, la misma requiere captar un importante caudal para restablecer condiciones de no desborde aguas abajo.

Según los resultados se observó lo “difícil” desde el punto de vista hidráulico, que resulta reducir niveles en el canal ibarlucea en el sector del barrio Nuevo Alberdi; debido principalmente a que dicha zona es una zona natural baja; de almacenamiento de aguas.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos reflejan, en términos de dimensiones de las obras necesarias, y por consiguiente en costos de ejecución, los impactos ante inundaciones en sectores poblados debido principalmente al continuo crecimiento urbano, el incremento de las impermeabilizaciones y la

diversificación de redes de escurrimiento no planificadas. Resulta cada vez más complejo proteger a sectores urbanos ubicados en áreas vulnerables (ante inundaciones) debido principalmente a las dificultades de ejecución y costos de las obras.

En este sentido una adecuada planificación urbana; apoyada con medidas no estructurales (ordenanzas municipales de regulación de uso del suelo, entre otras); así como también la difusión de requerimientos de diseño para nuevos emprendimientos resultan una dinámica sostenible en el tiempo de crecimiento urbano dentro de la cuenca; sin afectar a los pobladores ubicados en los sectores bajos.

La hidrodinámica de la cuenca resulta compleja; y la utilización de modelos de parámetros distribuidos físicamente basados con aproximación de onda difusiva resultan adecuados en este tipo de sistema, con sectores de escasa pendientes y la existencia de terraplenes que modificación el escurrimiento “natural” de las aguas. A su vez, en este sentido; las soluciones de las diferentes alternativas de obras no resultan triviales. La modificación de las dimensiones de una determina obra altera el funcionamiento de las obras ubicada aguas arriba y aguas abajo.

Se resalta la potencialidad de utilización de modelos matemáticos distribuidos físicamente basados en estudios de esta índole; donde resulta indispensable contar con información de alto nivel de detalle de variables de flujo distribuidas espacialmente; definir las características de las obras orientadas a la protección urbana contra inundaciones y definir los sectores más vulnerables y los impactos en los diferentes sectores de la cuenca. La información obtenida mediante modelación matemática resulta adecuada y suficiente para la toma de decisión de la alternativa de obra más conveniente.

BIBLIOGRAFIA

- 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.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Ways, L.M.** (1994) *Hidrología Aplicada*. Mac Graw-Hill, Bogotá. 554 p
- Departamento de Hidráulica (DH)** (2005), *Informe Final Plan Director de Desagües Pluviales ciudad de San Lorenzo*, FCEIA; UNR, Rosario.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (1990)** . *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Tomo II. Proyecto PNUD Argentina 85/019. 677 pag. ISBN 950-432964-2
- Riccardi, G.; E. Zimmermann, y R. Maurig** (1995). “*Mathematical Modelling of flood for the delimitation of zones with inundation risk*”. International Symposium on Runoff Computations for Water Projects, IAHS, San Petesburgo.
- Riccardi, G.** (1997). “*The mathematical modelling for the delimitation of inundation risk zones*”. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty. IAHS Publication Nro 240, ISSN 0144-7815, Wallingford, pp.127-136.
- Riccardi, G.** (2000) *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. Tesis Doctoral, FCEfyN, UNC, Córdoba.
- 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.
- Riccardi, G.** (2007) *Reporte Técnico sobre inundaciones ocurridas en la semana del 26 al 31 de Marzo de 2007*. Departamento de Hidráulica y CURIHAM. Abril de 2007. 12 pag.
- Stenta, H.; Rentería, J. P. y Riccardi, G.** (2005) “*Plataforma Computacional para Gestión de Información en la Simulación Hidrológica-Hidraulica 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.
- Stenta, H.** (2008). *Efectos del Tamaño de Grilla sobre la Modelación Matemática Distribuida del Escurrimiento Superficial en Cuencas de Llanura*. Trabajo Inédito. Tesis Doctoral. FCEIyA, UNR, Rosario-Santa Fe.
- Zimmermann E., Basile P., López C., Riccardi G., Stenta H., Scuderi C. y Rentería J.** (2009), “*Condiciones antecedentes para la tormenta de diseño en el área del gran Rosario*”. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Chubut.