

## Modelación físicamente basada de escurrimiento superficial en ambientes urbanos

**Gerardo A. Riccardi<sup>(1),(2)</sup>, Hernán R. Stenta<sup>(2),(3)</sup>, Raul Postiglione<sup>(2)</sup>,  
Laura E. Ferrer<sup>(2)</sup>, Claudia A. Forestieri<sup>(2)</sup> y Raul A. Navarro<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario (CIUNR)

<sup>(2)</sup>Departamento de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - UNR.

<sup>(3)</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina

riccardi@fceia.unr.edu.ar

**RESUMEN:** en la planificación integral del saneamiento pluvial en ambientes urbanos es cada vez más habitual la utilización de herramientas tecnológicas computacionales basadas en la modelación matemática para cuantificar el impacto ante inundaciones. Para una apropiada definición y posterior diseño de las obras estructurales y medidas no estructurales necesarias en un plan director de desagües pluviales resulta muy apropiado la simulación de escurrimiento tanto en el escenario urbano sin las obras (o con obras existentes) y en escenarios con distintas alternativas de obras proyectadas. En este trabajo se presenta la aplicación de un modelo matemático físicamente basado de parámetros distribuidos particularmente apto para la modelación de flujo escurriendo por superficies, zanjas, cunetas, calles, canales y conductos. La aplicación fue realizada en el desarrollo del plan director de desagües pluviales de la ciudad de San Lorenzo, provincia de Santa Fe. El modelado ha permitido analizar y cuantificar el flujo escurriendo en cada una de las esquinas del área en estudio, y en cada uno de los conductos existentes y proyectados. Se han determinado caudales, alturas de agua y velocidades para cualquier instante de toda lluvia tanto en superficie como en conductos, y permanencia de alturas de agua en esquinas. El análisis de impacto para la situación actual permitió definir el grado de vulnerabilidad ante inundaciones en tanto que el análisis de impacto de cada alternativa de proyecto de obras permitió verificar y optimizar cada una de las alternativas. La utilización de un modelo de simulación de escurrimiento una vez prediseñadas las obras respectivas permitió una retroalimentación con los ingenieros proyectistas hasta alcanzar la suposición planteada originalmente. El análisis de impacto en cada etapa de avance de construcción de cada alternativa ha permitido cuantificar la evolución temporal hacia la suposición de inundación cero. Completando el análisis se ha realizado la simulación de una tormenta extraordinaria de R=100 años para cuantificar daños esperables ante una lluvia extraordinaria y para la planificación de acciones a seguir en caso de ocurrir tal evento.

**Palabras clave:** impacto, inundaciones, modelación matemática, drenaje pluvial urbano, San Lorenzo.

## INTRODUCCIÓN

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. Sin embargo tales rasgos no tienen un carácter necesario: una adecuada planificación urbana, que coordine los distintos aspectos de la infraestructura de las ciudades, puede generar acciones que posibiliten un desarrollo urbano coherente y armónico. Para ello deberán ser componentes de políticas globales de integración e igualdad social, progreso económico, cultural y político. La formulación de un Plan Director para el Sistema de Desagües Pluviales de una ciudad es una herramienta esencial para tales fines, definiendo necesidades inmediatas y futuras a ser atendidas mediante un Plan de Obras a corto, mediano y largo plazo, así como implementando un Programa de Medidas No Estructurales vinculado principalmente a la regulación del uso del suelo, que optimice su eficiencia y perdurabilidad. Además, un plan director puede valerse de diversas herramientas tecnológicas que convenientemente utilizadas se traducirán en una mejor integralidad y calidad del mismo (DH, 2005).

En este sentido, en el presente trabajo se describe la utilización de un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasibidimensional, multicapa en el marco del plan director de desagües pluviales de la ciudad de San Lorenzo (provincia de Santa Fe). La simulación de la transformación lluvia-caudal fue empleada para la determinación del impacto ante inundaciones en la etapa de elaboración del diagnóstico en el escenario actual (con obras existentes), en la etapa de definición del proyecto de obras estructurales (construcción por etapas) y en el análisis de impacto de inundaciones ante las diferentes etapas constructivas de la obras proyectadas.

## EL AMBIENTE HÍDROGRÁFICO EN ESTUDIO

### Delimitación y Descripción General de la Zona

La consigna para la delimitación del ambiente hidrográfico a estudiar fue la de establecer el área con aporte de escurrimiento pluvial a la zona urbana y periurbana de la ciudad de San Lorenzo. La delimitación del ambiente hidrográfico en análisis se realizó en base a:

- la Carta Planialtimétrica del IGM (Carta San Lorenzo),
- la definición de la dinámica hídrica superficial y
- las trazas de vías de comunicación como vías férreas y autopista Rosario-Santa Fe

Una vista general de la zona se presenta en la Figura 1. La zona tiene definido claramente dos tendencias de escurrimiento. Una tendencia es de oeste → este con

escurrimiento directo al río Paraná y otra zona al sur del arroyo San Lorenzo con escurrimiento marcadamente en dirección sur → norte hacia dicho arroyo.

La Autopista Rosario Santa Fe constituye una barrera del escurrimiento que drena de oeste a este desde la zona rural del distrito. En este caso el flujo es interceptado por la cuneta oeste de la autopista y direccionado en la mayor parte de la extensión de la autopista dentro del distrito, hacia el arroyo San Lorenzo.

Además, para lograr una disminución del aporte de escurrimiento desde la zona rural ubicada al este de la autopista se consideró que una franja de 200 metros de ancho puede sanearse con drenaje por zanjas hacia la cuneta este de la autopista.

Como resultante de todas las consideraciones señaladas el ambiente hidrográfico urbano y periurbano a analizar quedó conformado con una extensión superficial de 12.9 km<sup>2</sup>. En la Figura 1 se esquematiza el ambiente hidrográfico estudiado. A su vez el ambiente hidrográfico fue subdividido en una zona periurbana delimitada por una línea imaginaria a 200 m al este de autopista y las vías de los ferrocarriles.

La primera zona abarca una extensión de 3.2 km<sup>2</sup> constituida en un 95 por ciento por zona verde y se la ha subdividido en 5 subzonas con puntos de aporte de escurrimiento cuatro de ellas a la red a proyectar en la zona urbanizada y una quinta con aporte a la alcantarilla ferroviaria en dirección hacia el arroyo San Lorenzo. La pendiente en esta zona es muy escasa del orden de 0.0005 m/m por lo que el escurrimiento es sumamente lento.

La segunda zona abarca una extensión superficial de 9.7 km<sup>2</sup> y es la zona donde se ha planificado la red de desagües pluviales mediante conductos cerrados. En esta zona se encuentran áreas fuertemente consolidadas en lo que respecta a urbanización e impermeabilización (área del centro de la ciudad) y zonas con un grado decreciente de impermeabilización.

### **Las impermeabilidades**

A los efectos de sectorizar el área en estudio de acuerdo a su grado de consolidación se procedió a subdividir la zona al este de las vías en 3 grandes zonas: norte centro y sur; a su vez la zona centro se subdividió en 4 unidades, la norte en 3 unidades y la zona sur en cinco unidades (Figura 2).

**Impermeabilidades actuales:** en la Tabla 1 se presentan los valores de impermeabilidad determinados en la actualidad en el ambiente hidrográfico en estudio. Se entiende como impermeabilidad al cociente entre el área impermeable (techos, pavimentos, veredas, patios, etc.) y el área total. En líneas generales se observa en la actualidad que las zonas tipificadas como N2, N3, C1 y S4 se encuentran con un importante estado de impermeabilización (entre 50 y 60%) descendiendo en el resto de las áreas a valores entre 0.40 y 0.17.

**Impermeabilidades Futuras:** a los efectos de la planificación a largo plazo se procedió a realizar el planteo de una escenario futuro de urbanización. El escenario futuro prevé un aumento de la zona edificada impermeable (sin incluir pavimentos y veredas) entre el 25 y 30% en cada zona y la construcción en su totalidad de los pavimentos en las calles de la ciudad. Estas hipótesis establecieron valores de impermeabilidad a futuro, los que se detallan en la Tabla 1

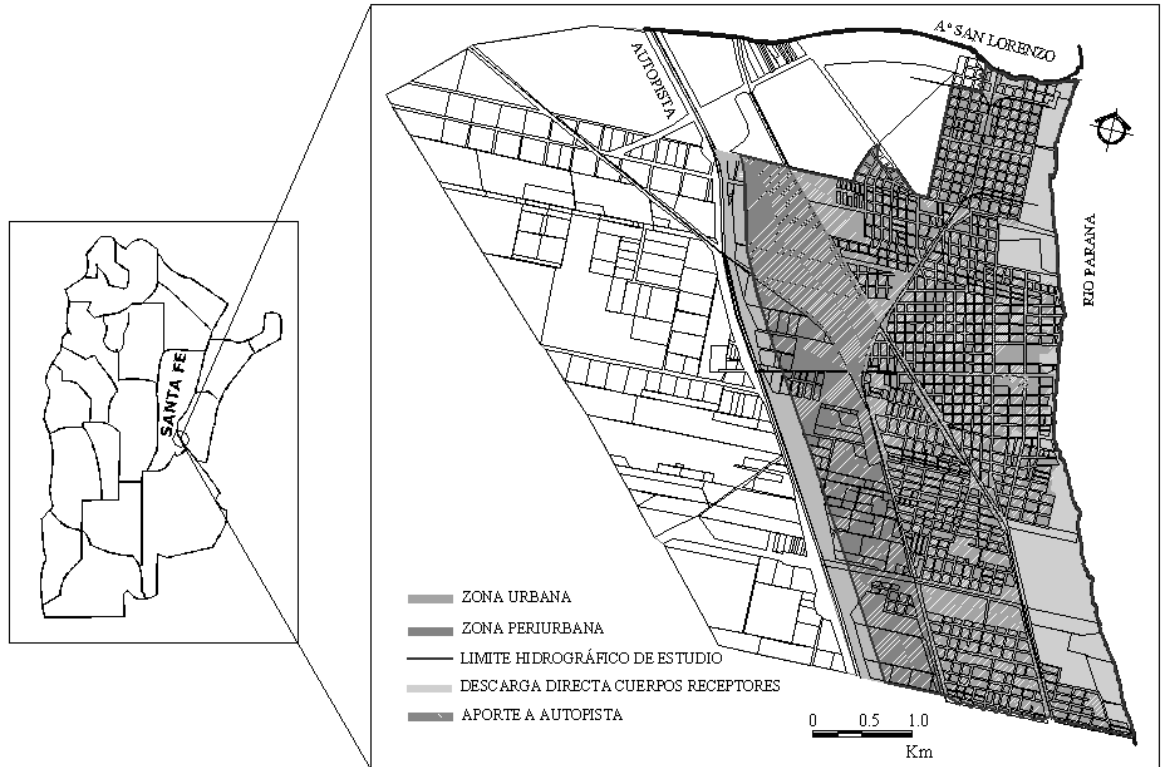
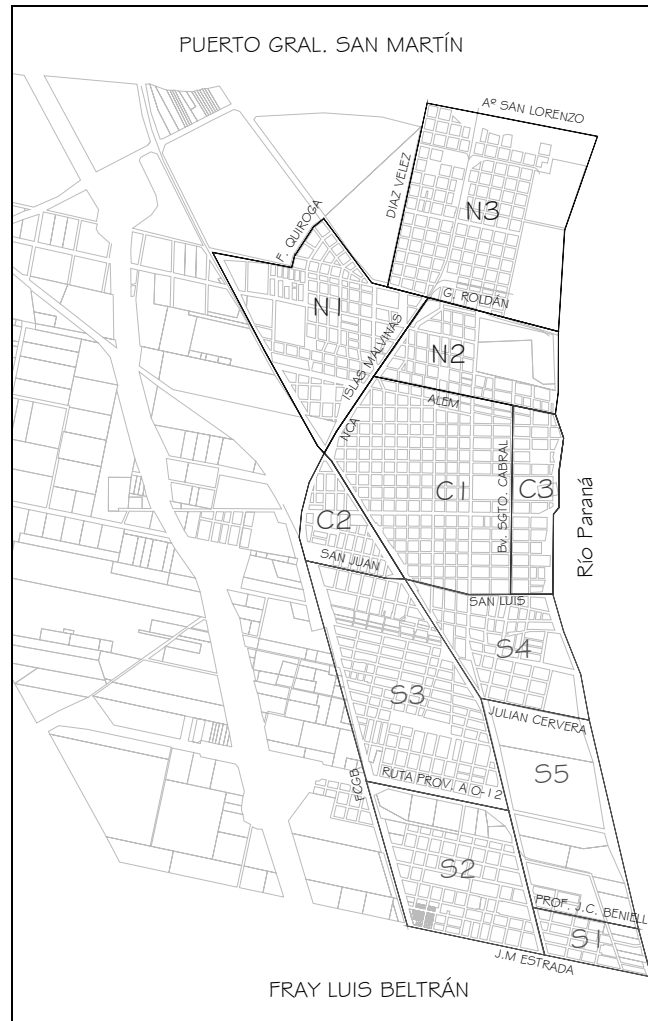


Fig. 1. Ubicación geográfica y ambiente hidrográfico estudiado.



**Fig. 2.** Esquema de Zonas de igual Impermeabilidad

**Tabla 1.** Impermeabilidades del área modelada

Zona	Actual	Futura
N1	40 %	50 %
N2	59 %	74 %
N3	51 %	63 %
C1	58 %	73 %
C2	22 %	29 %
C3	17 %	22 %
S1	22 %	29 %
S2	31 %	40 %
S3	37 %	48 %
S4	56%	70 %

## **Pendientes**

La zona norte de la ciudad con drenaje hacia el arroyo San Lorenzo es la que tiene claramente una mayor pendiente media que el resto de la ciudad. En la Zona N3 y en el sector norte de N1 las pendiente están entre 0.6 y 0.8 por mil (6-8 m/km). Pendiente sumamente propicia para un escurrimiento superficial rápido y no difuso.

En cambio en el resto de la ciudad a excepción de algunos grupos de calles las pendientes es sumamente escasa valorizándose entre 0.2 y 0.4 por mil (2-4 m/km), resultando en escurrimiento lento, difuso y con tendencias a encharcamientos o almacenamientos en la superficie de las calles.

En la Figura 3 se presentan las curvas de nivel de la superficie de calles de la ciudad donde se puede observar claramente las tendencias de las pendientes.

La áreas de aporte entre la Autopista y las vías tiene valores de pendientes aún inferiores a las pendientes observadas en la zona urbana mas plana. Se verifican valores de pendiente entre 0.1 y 0.2 por mil (1-2 m/km).

## **El Aporte de las Áreas Rurales**

La evidencia observada indica que el aporte de las zonas rurales del distrito en parte se direcciona hacia el casco urbano y parte se deriva directamente al arroyo San Lorenzo. Estos aportes se estudiaron en forma desacoplada del funcionamiento hidrodinámico del casco urbano por lo que los hidrogramas determinados funcionaron como señales de entrada El hecho de estudiar la zona rural de este modo se debe a que existe una clara diferenciación en el uso y ocupación del suelo de dicha zona comparada con el casco urbano. Además se observa que los terraplenes ferroviarios de la primer línea ferroviaria (NCA y FCGB) ubicados al Oeste de la zona urbana actúan como verdadera barrera que limita el traspaso de agua hacia la parte urbanizada; pudiendo definir por lo tanto el comportamiento hidrológico de este sector rural y vincularlo con la zona urbana a través de puntos de paso concentrados ubicados sobre la traza del terraplén mencionado anteriormente.

El área total de la zona de aporte rural es de aproximadamente 3.19 Km<sup>2</sup>. Toda esta zona es francamente plana, con pendiente media del orden del 0.1 % o menores y con sentido dominante Suroeste-Noreste. A los efectos del cálculo hidrológico la zona de aporte rural se ha subdividido en cuatro subcuencas, (Figura 4) la que concentran su aporte sobre:

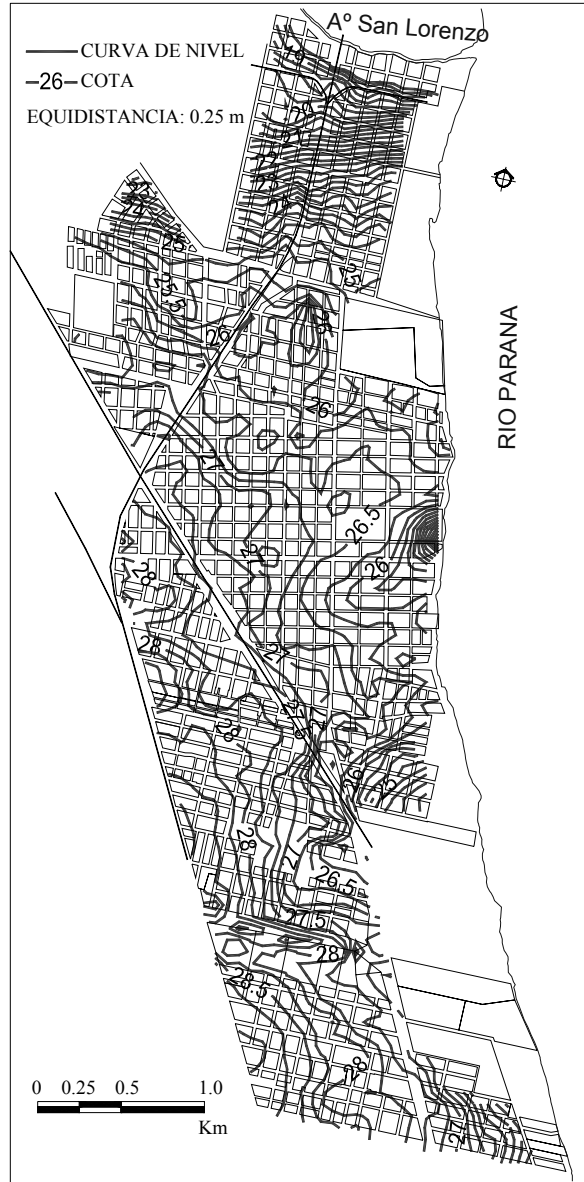
Subcuenca 1 (SBC1): la cuneta este de las vías del FCGB

Subcuenca 2 (SBC2): el cruce del Bvard. Urquiza y las vías del NCA

Subcuenca 3 (SBC3): el cruce de la prolongación de la calle Batería Libertad y las vías del NCA

Subcuenca 4 (SBC4): la cuneta Norte de la Ruta Provincial A-012 y las vías del NCA

El objetivo fundamental de la subdivisión en varias subcuencas de toda la zona rural de aporte al casco urbano se debió a la necesidad de un escalonamiento de los aportes.



**Fig. 3.** Curvas de Nivel de la zona de estudio.

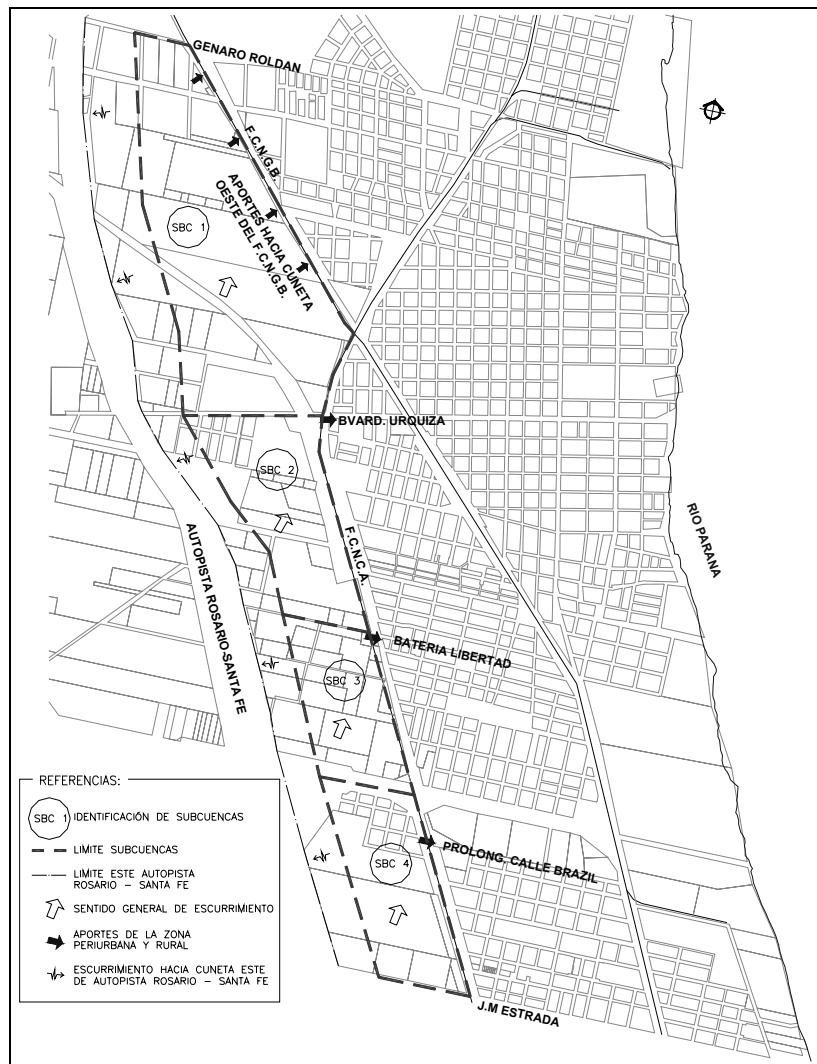


Fig. 4. Dinámica Superficial del Área Periurbana y Rural

### ANÁLISIS DE IMPACTO DE INUNDACIONES MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA HIDRODINÁMICA

A los efectos de evaluar el impacto producido por una lluvia en la zona donde se desarrolla el plan director, se procedió a utilizar un modelo matemático hidrodinámico de flujo. Dicho modelo es particularmente apto para la modelación de escurrimiento en ambientes rurales y urbanos y con flujo escurriendo por superficies, zanjas, cunetas, calles, canales y conductos. El modelo matemático tipificado CTSS8 es un producto tecnológico desarrollado en el ámbito del Departamento de Hidráulica de la Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la UNR (Riccardi, G., 2001).



El modelo ha permitido analizar y cuantificar el flujo escurriendo en cada una de las esquinas del área en estudio, y en cada uno de los conductos existentes y proyectados. Específicamente se han determinado:

- caudales, alturas de agua y velocidades para cualquier momento instante de cualquier lluvia caída y tanto en superficie como en conductos;
- permanencia de alturas de agua en esquinas y alturas máximas alcanzadas en esquinas en cada lluvia.

### Precipitaciones

El régimen de precipitaciones es sumamente similar al de la ciudad de Rosario por lo cual fueron consideradas para el proyecto de sistemas de drenaje las relaciones intensidad-duración-recurrencia (curvas I-D-R) de la ciudad de Rosario (Tabla 2).

**Tabla 2.** Ecuaciones IDR Rosario, Santa Fe, Argentina. Fuente: Orsolini et al., (2000)

Recurrencia en años	Ecuación i en mm/h y D en minutos
2	$i = 1370.801 / (12.656 + D)^{0.831}$
5	$i = 1899.145 / (14.350 + D)^{0.844}$
10	$i = 2010.648 / (14.351 + D)^{0.829}$

Además para 100 años de recurrencia se consideró la aproximación:

$$i_{R=100 \text{ años}} = 2430.22 / (14.351 + D)^{0.829}$$

### Construcción de Hietogramas

La construcción de hietogramas de lluvia total en el análisis de impacto de inundaciones fue realizada mediante la conocida técnica de los barrotes alternos. El pico del hietograma se ubicó en una coordenada temporal igual al 0.50 de la duración de la lluvia. La lluvia fue definida en barrotes de 1 minuto.

### Pérdida de Escurrimiento Directo

Las pérdidas de escurrimiento por almacenamiento superficial en depresiones fueron consideradas a partir de la formulación (Mazza et al, 1993):

$$d = 0.77 S_0^{-0.49} \quad (1)$$

donde  $d$  (mm) es el almacenamiento superficial en depresiones y  $S_0$  (m/m) es la pendiente media del área. Este valor estuvo limitado en 8 mm para las áreas de mayores pendientes y en 12 mm en las zonas de menor pendiente.

Las pérdidas por infiltración fueron determinadas mediante el conocido método del número de curva o CN. En este caso el CN considerado en la superficie verde fue de  $CN_{PER} = 75$  y en superficie impermeable  $CN_{IMPER} = 90$

### **Hidrogramas en esquinas**

La mínima unidad espacial de simulación del modelo de análisis de impacto de inundaciones fue a nivel de esquina por lo que en cada esquina fueron determinados para cada lluvia los hidrogramas generados en toda el área tributaria o de aporte de cada esquina. La técnica para generar los hidrogramas en cada esquina fue la de embalse lineal considerando:

- áreas impermeable y permeable discriminados en lote y calle
- longitudes de escurrimiento en lote y en calle
- pendiente longitudinal de líneas de escurrimiento en lote y calle
- coeficiente de resistencia de Manning en líneas de escurrimiento en lote y calle

El coeficiente de embalse lineal fue establecido en base a la expresión originada en la teoría de onda cinemática (Mazza et al, 1993):

$$K = 3.494 L^{0.60} \eta^{0.60} i^{-0.40} S^{-0.30} \quad (2)$$

donde  $K$  (min);  $L$  (m) es la longitud del plano de escurrimiento;  $\eta$  es el coeficiente de resistencia de Manning;  $S_0$ (m/m) es la pendiente longitudinal del plano de escurrimiento e  $i$  (mm/h) es la intensidad de la lluvia neta promedio en un tiempo igual a  $K$ , centrado en el intervalo de mayor intensidad.

### **Duración de las Lluvias Simuladas**

En función de los tiempos de concentración observados en las diferentes subcuencas urbanas en el escenario actual y futuros por un lado y para trabajar con una única duración global de modo que permita una comparación entre impacto de eventos lluviosos se definió la duración de la lluvia en 1 hora. Cabe destacar que el método de los barros alternos (al igual que el método de Chicago) siempre define la máxima intensidad de lluvia total para duración parcial de la lluvia con lo que se considera cubierta toda situación de cuencas con tiempos de concentración inferiores a 1 hora.

### Escurrimiento desde Áreas Periurbanas

Para la determinación de los caudales máximos de cada una de las subcuencas a sus respectivos puntos de aporte se ha utilizado el Método Racional. Para el cálculo del tiempo de concentración de cada subcuenca se adoptó la conocida formulación de onda cinemática. Para todos los tramos de las diferentes subcuencas se ha adoptado un coeficiente de rugosidad de Manning  $\eta = 0,04$ . Este coeficiente corresponde al escurrimiento en cuneta o canal excavado en tierra natural y con poco mantenimiento (malezas y vegetación alta) (Chow, 1994). Se ha considerado una recurrencia de 5 años para la lluvia, que se corresponde a la recurrencia con la que se ha trabajado en el proyecto de la zona urbana. Con el fin de determinar la intensidad de la lluvia asociada a una determinada duración se adoptan las curvas Intensidad-Duración-Recurrencia (I-D-R) de la ciudad de Rosario.

Como coeficiente de escurrimiento promedio, para una condición futura de uso y ocupación del suelo, se ha adoptado  $C = 0,3$  para todas las subcuencas. Este valor es compatible con una consideración correspondiente a áreas desarrolladas con superficie verde y pendiente llana con cubierta de pasto entre el 50% y el 75 % y bajo uso de ocupación de suelo para usos habitacionales e industriales (UDFCD, 1967; Riccardi, 2004). Tal consideración pretende ser afirmada como perdurable para el futuro a través de establecer regulaciones en el uso del suelo de la zona que la garanticen.

El cálculo hidrológico se detalla en la Tabla 3, donde además se incluyen los puntos de aporte a la zona urbana de cada subcuenca.

**Tabla 3.** Cálculo y Parámetros adoptados para el estudio hidrológico del aporte de la zona periurbana y rural de la ciudad de San Lorenzo hacia la zona urbana.

Sub cuenca	Punto de Aporte en:	L [Km]	N	S [m/m]	Tc = D [min]	i [mm/h]	A [Km <sup>2</sup> ]	C [-]	Q [m <sup>3</sup> /s]
SBC 1	Cuneta E Este. FCGB	2.50	0.04	0.00095	342	13,31	1.52	0.3	1.69
SBC 2	Bvard. Urquiza	1.70	0.04	0.00100	233	18.12	0.65	0.3	0.98
SBC 3	Batería Libertad	1.18	0.04	0.00110	150	25.56	0.45	0.3	0.96
SBC 4	Cuneta N. AO12	1.32	0.04	0.00095	177	22.54	0.57	0.3	1.07

### Constitución del Modelo

El modelo fue constituido de acuerdo a los diferentes escenarios simulados. El escenario actual tuvo una única constitución, en cambio fueron constituidos diversos escenarios de proyecto de acuerdo a las alternativas propuestas por los ingenieros proyectistas.

Cada constitución del modelo estuvo conformada de una capa superficial (calles, cunetas y canales) y una capa subterránea (conductos cerrados y cámaras). Ambas capas se vincularon mediante uniones tipo sumideros y captaciones de zanja. En general se intentó hacer coincidir a los centros de los elementos de superficie y subterráneos con los centros de las esquinas. En total se consideraron 1100 esquinas en 9.6 km<sup>2</sup> de extensión superficial. En la Figura 5 se presenta un esquema de una unidad de discretización espacial en tanto que en la Figura 6 se muestra el esquema de conexión de la capa superficial (calles) y la capa subterránea (conductos) mediante las vinculaciones tipo sumideros. Cabe destacar que las uniones tipo sumideros están preparadas para simular el escurrimiento en cualquiera de los dos sentidos (Riccardi, 2001) de acuerdo donde se presente la mayor cota de agua.

En la Tabla 4 se presentan las cantidades de elementos y vinculaciones consideradas en el escenario actual y en el escenario correspondiente al proyecto definitivo, discriminando entre elementos y vinculaciones de superficie y subterráneos.

Las rugosidades consideradas para el escurrimiento sobre cunetas de calles pavimentadas fue  $\eta = 0.020$ , en tanto que en el escurrimiento por conductos se adoptó un coeficiente  $\eta = 0.015$  y por zanjas y cunetas  $\eta = 0.030$ .

La descarga tanto de elementos de superficie como de conductos fue hacia el río Paraná (al este) y hacia el arroyo San Lorenzo (al sur). En este caso al no verificarse acople hidrodinámico entre los sistemas se establecieron leyes de descarga libre tanto en las vinculaciones de superficie como las subterráneas a modo de condiciones de borde.

Las señales entrantes al modelo estaban constituidas por:

- (a) los hidrogramas en las esquinas con flujo provenientes desde la manzana de aporte (generados a partir de técnicas de embalse lineal)
- (b) los hidrogramas con flujo proveniente de la zona periurbana y rural

En la Figura 7 se presenta un esquema de la capa superficial esquematizándose todos los nodos (mayormente en las esquinas) y las vinculaciones. Por otro lado las Figura 8 y 9 muestran la capa subterránea de conductos en situación actual (Fig. 8) y los colectores del proyecto definitivo (Fig. 9).

**Tabla 4.** Cantidades de elementos y vinculaciones del modelo

	Escenario Actual	Escenario de Proyecto
Elementos	1206	1414
Superficiales	1086	1086
Conductos	120	328
Vinculaciones	2053	2491
Superficie-superficie	1873	1873
Subterráneo-subterráneo	67	318
Subterráneo-Superficial	113	300

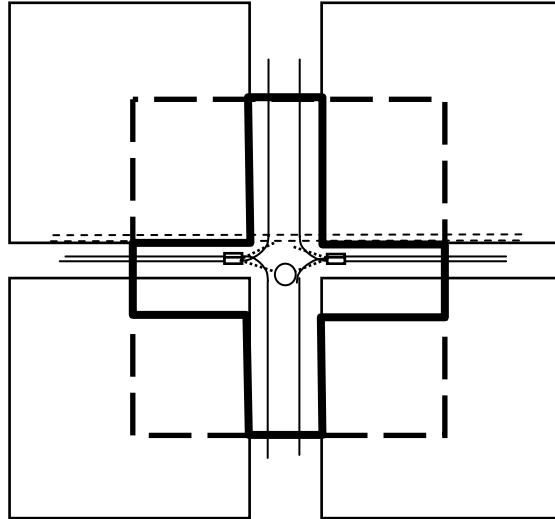
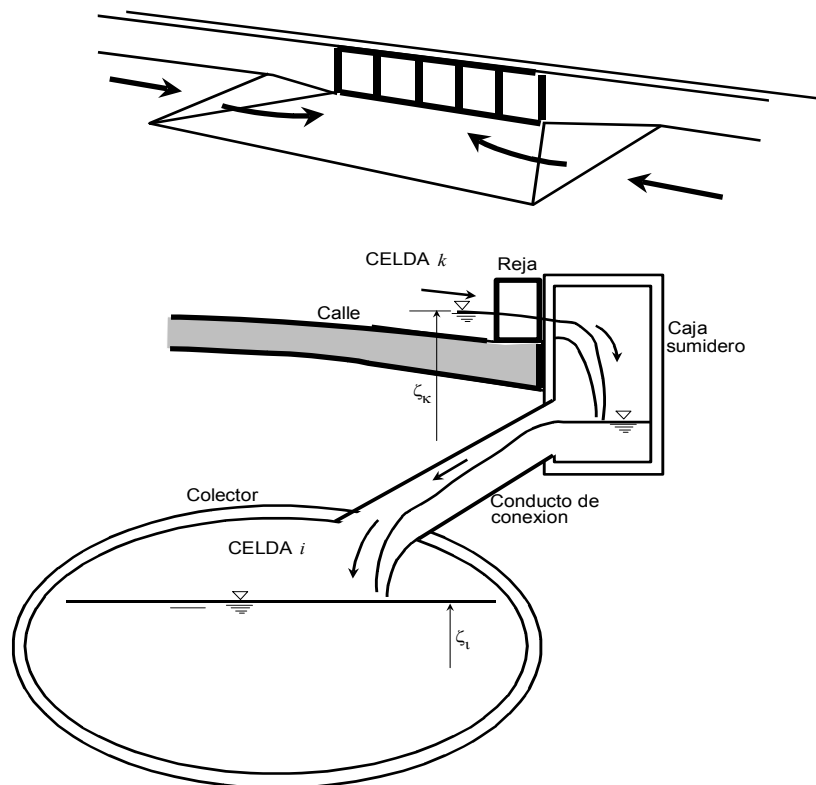
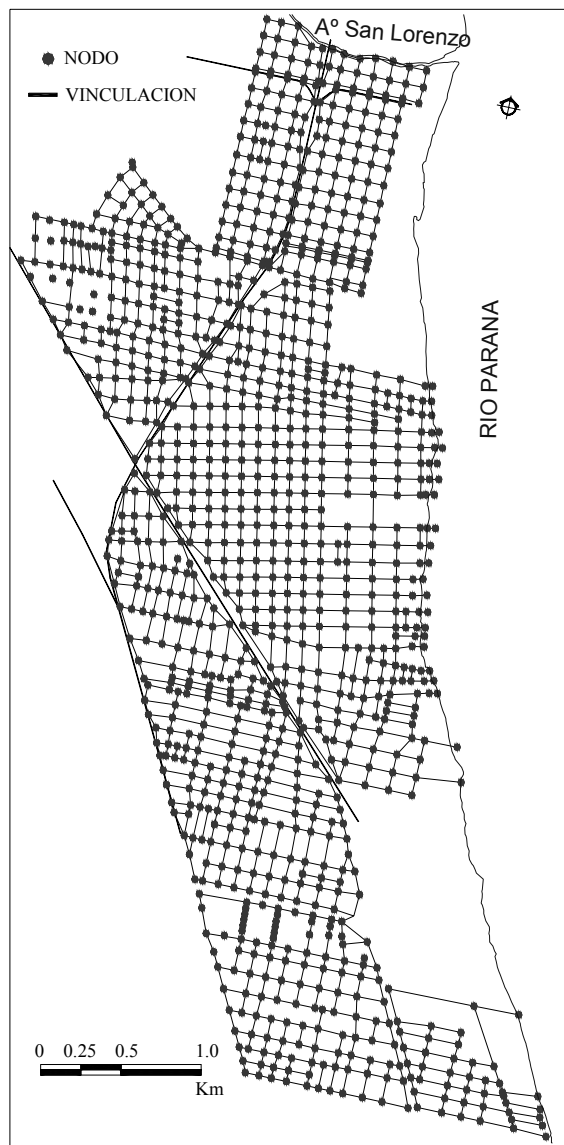


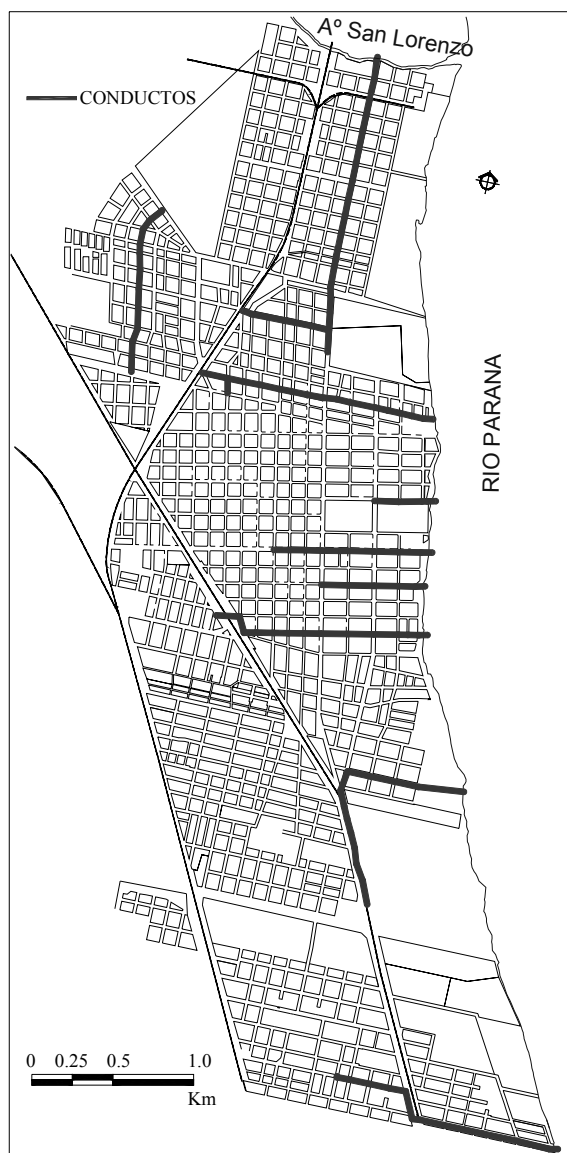
Fig. 5. Esquema de unidad de discretización espacial en superficie



**Fig. 6.** Esquema de representación de una conexión entre el sistema superficial y el sistema subterráneo de conductos mediante una unión tipo un sumidero



**Fig. 7.** Discretización espacial de la capa de escurrimiento superficial.



**Fig. 8.** Discretización de la capa de conductos en Situación actual

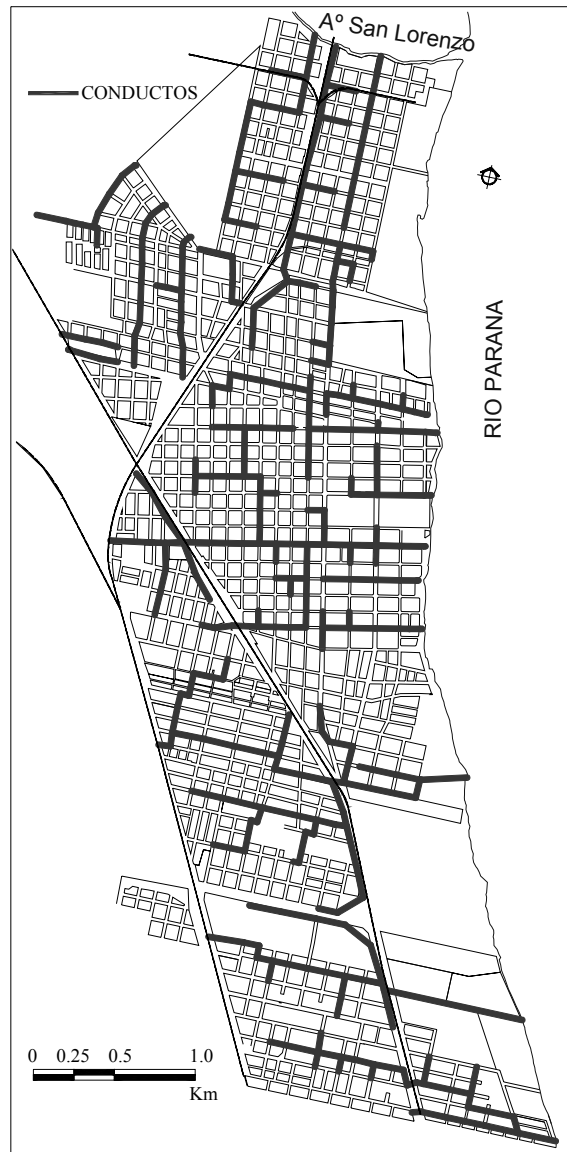


Fig. 9. Discretización de la capa de conductos en Situación de proyecto



### Escenarios Modelados

Fueron considerados escenarios de modelación con las obras actuales y con las obras proyectadas. Los escenarios considerados fueron:

- (a) Escenario Actual
  - (a.1) Escenario actual con lluvia sin impacto de inundaciones;  $P = 15.6$  mm
  - (a.2) Escenario actual con lluvia  $P = 30$  mm
  - (a.3) Escenario actual con lluvia con recurrencia  $R = 2$  años;  $P = 39$  mm
  - (a.4) Escenario actual con lluvia con recurrencia  $R = 5$  años;  $P = 52$  mm

- (b) Alternativas de proyecto de saneamiento pluvial
  - (b.1) Alternativa 1
  - (b.2) Alternativa 2
  - (b.3) Alternativa 3

A su vez en cada alternativa se analizaron 3 etapas parciales de avance de las obras.

- (c) Alternativa seleccionada con lluvia extraordinaria de 100 años de recurrencia.

### Resultados Logrados en el Análisis de Impacto

En relación al impacto se establecieron las siguientes definiciones:

*Impacto Nulo - Leve:* Cordón - cuneta lleno de agua y/o sección transversal con agua e incomodidad para cruzar la calle y tránsito vehicular con precaución por no más de 15 minutos.

*Impacto Leve:* Cordón - cuneta lleno o levemente desbordado con anegamiento entre 75-100% de la calle e imposibilidad de cruce de calle peatonal y tránsito vehicular con dificultad no más de 15 minutos.

*Impacto Moderado - Fuerte:* Cordón-cuneta desbordado con agua en la vereda, imposibilidad de cruce peatonal de calle, dificultad de tránsito vehicular, con situaciones críticas con permanencia de hasta 15 minutos.

*Impacto Fuerte:* Cordón-cuneta desbordado completamente, agua en las veredas, imposibilidad de tránsito peatonal, imposibilidad de tránsito vehicular sin producción de oleaje, con permanencia de por lo menos 15 minutos o más.

El análisis de impacto para la situación actual ha permitido definir claramente el grado de vulnerabilidad ante inundaciones urbanas que posee la zona en estudio. Se ha determinado que el sistema actual tiene una capacidad de drenaje apropiado para una lluvia de 15.6 mm (precipitados en una hora) sin producir inundaciones en ninguna esquina de la ciudad. Esta lluvia puede asociarse a una recurrencia o período de retorno inferior al año. A partir de tal lluvia el impacto de inundaciones crece, estableciéndose

que aproximadamente un 85%-90% de la ciudad puede tener impactos entre moderados y fuertes para una lluvia intensa hipotética de 52 mm, lluvia que corresponde a una recurrencia de 5 años. Precisamente el presente Plan Director tiene como objetivo el de disminuir a un valor nulo el impacto en términos de inundaciones urbanas para una lluvia de 5 años de recurrencia.

El análisis de impacto de cada alternativa de proyecto de obras tuvo por objeto verificar y optimizar cada una de las alternativas de modo tal que se verifiquen la suposición de impacto por inundación nulo para  $R = 5$  años. En este sentido vale remarcar la novedoso acerca de la utilización de un modelo de simulación de escurrimiento en todo el ambiente hidrográfico una vez prediseñadas las obras respectivas, lo que permitió una retroalimentación con los ingenieros proyectistas hasta alcanzar la suposición planteada originalmente.

Asimismo, el análisis de impacto en cada etapa de avance de construcción de cada alternativa ha permitido cuantificar en que medida se evoluciona en el tiempo hacia la suposición de inundación urbana cero.

Completando el análisis de impacto de inundaciones urbanas se ha realizado la simulación de una tormenta extraordinaria de 100 años de recurrencia. Este tipo de análisis es apropiado para la cuantificación de daños esperables ante una lluvia extraordinaria y para la correspondiente planificación de acciones a seguir en caso de ocurrir tal evento.

Mediante la modelación se ha establecido que si ocurre actualmente un evento de recurrencia cercana a los 100 años (68.3 mm en 1 hora) un 90 a 95 % de la ciudad tendría un fuerte impacto con el agua superando los niveles de los cordones y los niveles de desborde de zanjias por tiempos superiores por lo menos a 15 minutos.

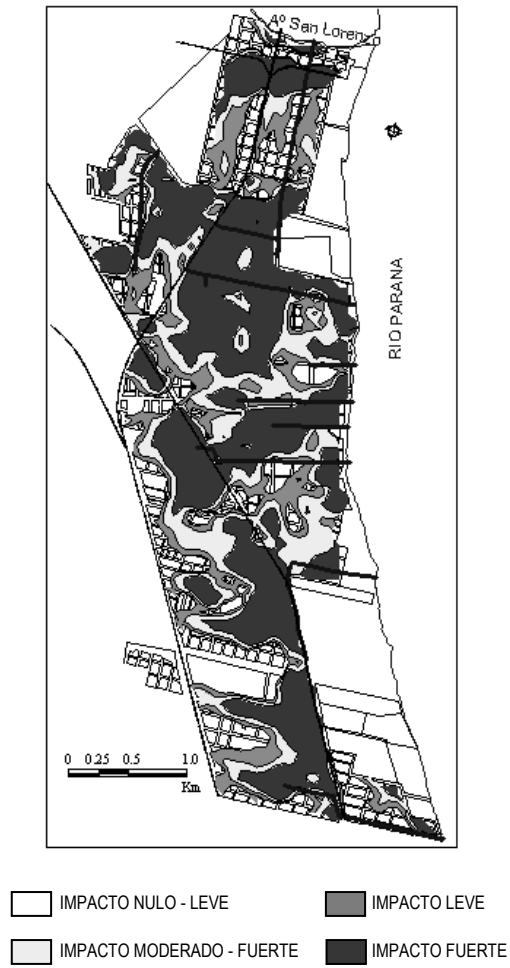
Por otro lado, el análisis de la lluvia extraordinaria ( $R = 100$  años) en un escenario con las obras y medidas planificadas en el Plan Director ha demostrado que:

- en la zona céntrica y más cercana al río Paraná y la zona norte con escurrimiento hacia el arroyo San Lorenzo sufrirían un leve impacto inferior al que produce actualmente una lluvia de  $R = 2$  años;
- en la zona oeste del centro, la zona entre vías y la zona sur el impacto es moderado con ciertos puntos críticos. En este caso el impacto es similar al que produce un lluvia de recurrencia de  $R = 2$  años en el escenario actual.

En las Figuras 10 a 12 se presentan las graficaciones de los impactos por inundaciones en el ambiente hidrográfico actual para lluvias de:

- 15.6 mm (Recurrencia 0.5 años). Escenario Actual. (Fig. 10(a))
- 52 mm ( $R = 5$  años). Escenario Actual. (Fig. 10(b))
- 68.3 mm ( $R = 100$  años) Escenario Actual. (Fig. 11)
- 52 mm ( $R = 5$  años). Con Plan Director\_Obras Completas. (Fig. 12(a))
- 68.3 m ( $R = 100$  años). Con Plan Director\_Obras Completas. (Fig. 12(b))





**Fig. 11.** Impacto situación actual. Lluvia total 68.3 mm-R: 100 años



- que el impacto ante inundaciones urbanas sea nulo en toda la ciudad para un lluvia de  $R = 5$  años de recurrencia (52 mm en 1 hora). Actualmente la máxima lluvia estimada que no produce impacto en ningún punto de la ciudad es de 15.6 mm.
- que el impacto ante inundaciones para una lluvia extraordinaria ( $R = 100$  años de recurrencia, 68.5 mm en una hora) sea entre leve y moderado en un 90 % de la extensión superficial de la ciudad con ciertos puntos críticos. Actualmente una lluvia de  $R = 100$  años produciría un impacto fuerte en un 95% de la ciudad.

## **CONCLUSIONES**

Se ha presentado la evaluación de impacto ante inundaciones en un ambiente urbano realizado mediante simulación de escurrimiento con un modelo matemático físicamente basado.

El nivel de detalle tanto en la capa superficial como en la subterránea puede promediarse a nivel de esquina.

El modelado ha permitido definir para los distintos escenarios y lluvias consideradas, alturas de agua en cordón y caudales en esquinas con sus respectivas permanencias.

Estableciendo primeramente condiciones para determinados niveles de afectación de las inundaciones fue posible cuantificar a nivel de detalle de esquinas los impactos.

La modelación del escenario completo permitió en la distintas etapas del proyecto de obras estructurales, retroalimentar el diseño elaborado por los ingenieros proyectistas hasta alcanzar las hipótesis de proyecto planteadas originalmente (no inundación para  $R = 5$  años).

En municipios como el estudiado donde es prácticamente imposible financiar en una única etapa la totalidad de las obras estructurales diseñadas, ha resultado de particular importancia la determinación de la evolución de la mitigación del impacto por inundaciones al plantear las diversas etapas del plan de obras compatible con financiamiento a mediano plazo.

El uso de una herramienta tecnológica de estas características permite rápidamente determinar no solo el impacto (en los términos que estos se definen) sino también: detectar puntos de subdimensionamiento de conductos, presencia de flujos inversos, la necesidad de mayores longitudes de bocas de tormentas, entre otros elementos de interés para los ingenieros proyectistas.

Si bien en la actualidad existen tanto para libre acceso como en el mercado comercial en el ámbito nacional como internacional los más diversos modelos de

simulación para este tipo de problemática, se desea hacer especial énfasis en el desarrollo propio (Departamento de Hidráulica, FCEIA; UNR) del modelo el cual se ha ido modificando, adaptando y mejorando en las múltiples aplicaciones a las que se lo ha sometido.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Chow, V. T., (1994), Hidráulica de Canales Abiertos, Mc Graw-Hill, Bogotá, Colombia.
- Departamento de Hidráulica (DH) (2005), Informe Final Convenio Plan Director de Desagües Pluviales ciudad de San Lorenzo, FCEIA; UNR, Rosario.
- Maza J., Fornero L., Litwin C. y Fernandez P. (1993), Modelo AR-HYMO, Manual del Usuario, INA-CRA, Mendoza.
- Orsolini H.E., Zimmermann, E. y Basile P.A. (2000), Hidrología Procesos y Métodos, UNR Editora, Rosario. 319p.
- Riccardi, G., (2001), Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos. Inédito, Tesis Doctoral, FCEFYN, UNC, Córdoba. 279p.
- Riccardi, G. (2004), Hidrología en medios Antropizados, Libro Electrónico, Maestría en Recursos Hídricos de Llanura, FCEIA; UNR, Rosario; [www.c-virtual.fceia.unr.edu.ar](http://www.c-virtual.fceia.unr.edu.ar).
- UDFCD (1967 a 1994), Drainage Criteria Manual, Vol. 1,2 y 3, Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado, EU. 750 p.