

ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA LA DEFINICIÓN DE CRECIDAS DE DISEÑO EN CUENCAS DE LA REGIÓN DEL GRAN ROSARIO

Gerardo A. Riccardi ^{(1),(3),(4)}, **Erik Zimmermann** ^{(2),(3),(4)}, **Basile Pedro** ^{(3),(4)}, **Stenta Hernán** ^{(3),(4)}, **Carlos Scuderi** ^{(2),(3),(4)}, **Juan Pablo Rentería** ⁽³⁾ y **Lucia Odicini** ⁽³⁾

⁽¹⁾ Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario (CIUNR)

⁽²⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁽³⁾ Departamento de Hidráulica. FCEIA. UNR

⁽⁴⁾ Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. FCEIA. UNR

José Hernández 986, (2000) Rosario, Argentina. Telefax: 0341 4808541. E-mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

En las últimas décadas, en cuencas del sur santafecino se evidencia un paulatino aumento en la frecuencia de caudales máximos. Entre los factores responsables de la alteración pueden mencionarse: ocurrencia de lluvias extremas, condiciones de humedad antecedentes rigurosas, impermeabilizaciones a causa de desarrollos urbanos, canalizaciones sin planificación, prácticas agrícolas que aceleran el escurrimiento, drenajes de bajos naturales, etc. Esta alteración del sistema hídrico ha llevado a revisar aspectos metodológicos en lo que concierne a criterios de diseño hidrológico para estructuras hidráulicas y medidas no estructurales, planificadas para mitigar impactos de inundaciones. En este contexto, el presente trabajo describe los aspectos metodológicos tenidos en consideración en la cuenca del arroyo Ludueña para redefinir las crecidas de diseño asociadas a las alteraciones referidas. Para llevar a cabo el trabajo primeramente se actualizaron los estudios estadísticos de precipitaciones. Se analizaron las tendencias actuales de los estados de humedad antecedente. Se establecieron escenarios extremos asociados a recurrencias de 10 y 100 años y lluvias de larga y corta duración. La lluvia neta se estableció a partir del algoritmo de Green y Ampt, determinándose los parámetros desde funciones de pedotransferencia e información de cartas de suelos del INTA. La cobertura se estableció desde información satelitaria. El modelo digital del terreno se construyó desde información de cartas topográficas IGM y 200 km de relevamientos topográficos sobre cursos de agua. La transformación lluvia caudal se realizó mediante un modelo distribuido de celdas, físicamente basado, con una discretización espacial de 250 m x 250 m por elemento. El modelo fue calibrado con información hidrológica e hidráulica de eventos ocurridos en los últimos 15 años. Posteriormente se generaron hidrogramas y limnigramas en la sección de salida de la cuenca y en diferentes secciones internas de interés para cada escenario hidrológico considerado y para cada configuración de la cuenca, involucrando distintas variantes de obras y distintos avances de obras en ejecución. Se concluye que la simulación mediante un modelo físicamente basado de escurrimiento superficial ha permitido no solo determinar caudales, sino también velocidades y niveles, reproducir remansos, controles de flujo en secciones críticas, evolución de volúmenes de escorrentía y almacenamiento, parámetros necesarios para un mejor diseño de obras contra inundaciones.

Palabras clave: Crecidas de diseño, modelos distribuidos, arroyo Ludueña, rehidrología.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El control y aprovechamiento de los recursos hídricos en general y la seguridad ante inundaciones de un territorio en particular, es un tema que preocupa, con diferentes grados de intensidad, a la población, a los profesionales involucrados en tal sector y a las autoridades responsables de la toma de decisiones.

En la región del sur de la provincia de Santa Fe (Argentina) con un clima subtropical y lluvia media anual cercana a los 1000 mm, se presentan sistemas hidrológicos de llanura en los cuales los excedentes hídricos superficiales se vinculan directamente a la generación de inundaciones, por lo que el avance en el conocimiento de la descripción del escurrimiento superficial es de vital importancia como aporte a la planificación regional integral de los recursos hídricos. Existen evidencias físicas que indican que el nivel de protección ante inundaciones en la zona lindera al arroyo Ludueña y canales Ibarlucea y Salvat especialmente en el distrito Rosario, ha descendido respecto a lo que fuera previsto en los años 1986-88 como criterio de diseño para eventos de recurrencia de $R = 100$ años. Es evidente que la conjunción de factores como importantes procesos de urbanización, canalizaciones (planificadas y clandestinas) rurales y urbanas, drenaje de bajos naturales, y modificaciones en las prácticas de uso de las tierras rurales, están produciendo un paulatino aumento de los caudales máximos de escurrimiento superficial como así también del volumen de escurrimiento para lluvias de igual magnitud. En este sentido los trabajos antecedentes de Zimmermann et al., (2001) pusieron de manifiesto que las acciones antrópicas mencionadas produjeron un paulatino aumento de los caudales máximos de escurrimiento superficial como así también del volumen de escurrimiento para lluvias de igual magnitud. Desde otra perspectiva, el proceso puede verse como una disminución del nivel de protección ante inundaciones en diversos sectores de la cuenca hidrográfica pero con mayor impacto en las zonas urbanas cuenca abajo donde las permanencias de las inundaciones son de mayor tiempo que en sectores de la cuenca media y alta (Riccardi et al. 2008a).

Una de las mayores evidencias indicadoras de este sistemático incremento de caudales son los sucesivos aumentos de la capacidad necesaria de descarga del arroyo Ludueña en el río Paraná que debieron y deberán llevarse cabo para mitigar inundaciones:

- en la década de los años 40 se necesitaron 23 m^2 de sección transversal de conducciones cerradas para entubar, en aproximadamente 1400 m, el caudal de diseño del arroyo \rightarrow caudal aproximado de diseño $100 \text{ m}^3/\text{s}$;
- en la década de los años 60 se debió incrementar a 36 m^2 la capacidad de las conducciones debido a inundaciones con fuerte impacto en el barrio de Empalme Graneros de Rosario \rightarrow caudal aproximado de diseño $150 \text{ m}^3/\text{s}$;
- a partir de las inundaciones de 1986 con severos impactos en barrios del oeste de la ciudad de Rosario, se proyectó elevar a 73 m^2 la capacidad de las conducciones cerradas con el agregado de una presa de retención para laminar el caudal máximo proveniente de aproximadamente un 60 % de la cuenca \rightarrow caudal aproximado de diseño $300 \text{ m}^3/\text{s}$;
- en el año 2007 de haber estado construidas todas las obras, la capacidad proyectada en 1986/88 hubiera sido levemente superada con un caudal aproximado de $310 \text{ m}^3/\text{s}$;

En este contexto, se lleva a cabo el presente trabajo con el objetivo de establecer los hidrogramas de diseño necesarios para planificar las obras estructurales y medidas no estructurales que permitan recuperar el nivel de protección ante inundaciones y permitan asegurar la sustentabilidad en el tiempo en armonía con todas las intervenciones antrópicas que se realizan y se realizarán en el futuro en la cuenca hidrográfica del arroyo Ludueña, provincia de Santa Fe. El trabajo se realizó en el marco del Convenio de Asistencia a Terceros: ReHidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo,

celebrado entre la Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario y el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos, Medio Ambiente de la provincia de Santa Fe.

METODOLOGÍA DEL TRABAJO

El trabajo se estructuró de acuerdo a los siguientes pasos metodológicos:

- (i) Revisión y actualización estudios estadísticos de tormentas de corta y larga duración
- (ii) Análisis de condiciones de humedad antecedente de lluvias extremas y su comportamiento estadístico
- (iii) Definición de escenarios hidrológicos para el diseño
- (iv) Desarrollo de hietogramas de diseño, determinación de hietogramas de lluvia total y neta
- (v) Constitución del modelo matemático hidrológico-hidráulica físicamente basado, cauzi 2D y de parámetros distribuidos.
- (vi) Transformación lluvia caudal. Determinación de limnigramas e hidrogramas en diferentes puntos de la cuenca para los diferentes escenarios de diseño y para las distintas alternativas de obras emergentes del diseño.

DESARROLLO DEL TRABAJO

Breve descripción del ambiente de la cuenca en estudio

La cuenca del A° Ludueña (Figura 1) se encuentra situada entre los paralelos 32° 45' S y 33° 08' S y los meridianos 61° 04' O y 60° 39' O, perteneciendo a la provincia de Santa Fe, República Argentina. La misma encierra parte de la ciudad de Rosario y otras poblaciones de los alrededores. Su área de aporte cerrada en su embocadura a un sistema de grandes conductos es de 740 Km² y la elevación varía entre 70 m y 18 m sobre el nivel del mar. Su pendiente media es del orden del 1.3 ‰, en tanto que la pendiente local media en el valle es del orden del 2.7 ‰. La red hídrica principal está constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan numerosos y pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales que aportan al escurrimiento. Por otra parte, la región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios, lo que permite observar una fuerte acción antrópica ejercida sobre la cuenca. la red de cursos permanentes (cursos naturales y canales) es de aproximadamente 140 km. La cuenca tiene un tiempo de concentración de aproximadamente 90-100 horas, en tanto que el tiempo al pico de un aguacero unitario uniformemente distribuido en toda la superficie de la cuenca es de 17-20 horas. El caudal base del arroyo es de 0.30-0.50 m³/s, en tanto que en crecidas ordinarias se alcanzan los 80 m³/s y en crecidas extraordinarias ha generado sin obras de regulación caudales superiores a los 400 m³/s. Su desembocadura es a nivel en el río Paraná y se materializa por medio de un entubamiento en un sistema de conductos cerrados en los últimos 1400 m. El río Paraná, dependiendo de su nivel, ejerce una notable influencia sobre la configuración del perfil hidráulico del flujo en el arroyo especialmente para crecidas extraordinarias, por lo que esta influencia debe ser considerada en el diseño.

Revisión y actualización estudios estadísticos de tormentas de corta y larga duración

El estudio de precipitaciones tuvo por objetivo actualizar la estadística de las lluvias tanto para tormentas de larga (días) como de corta (horas) duración, de modo de generar la información necesaria para la determinación los hietogramas de diseño. A los efectos del diseño hidrológico se consideraron eventos lluviosos de tipo frontal de larga duración (1 a 5 días), en tanto que para la

verificación de impacto se analizaron eventos fuertemente focalizados con duración no mayor a 6 horas. Para llevar a cabo el estudio estadístico de lluvias frontales se utilizaron series de lluvias de 3 estaciones de la región. En la Tabla 1 se describen las localizaciones de toma de datos de las series y su longitud temporal. En lo que respecta a lluvias de corta duración se determinó una precipitación fuertemente focalizada a partir de una curva de regresión ajustada a las intensidades máximas observadas en la región. Las localidades y años en los cuales se verificaron las lluvias convectivas consideradas se sintetizan en la Tabla 2.

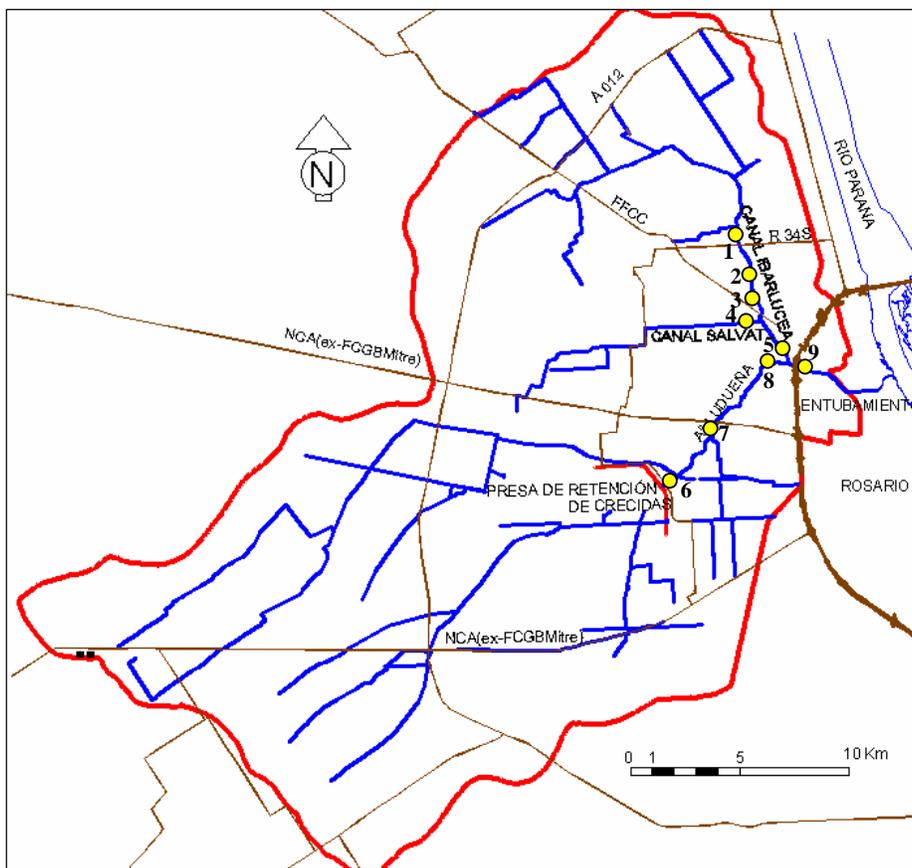


Figura 1. Cuenca del Arroyo Ludueña

Tabla 1. Series de Lluvias Diarias

Nombre Estación	Fuente de los datos	Período de observación
Rosario	SMN- Rosario Aeropuerto	1935-2007
Casilda	INTA-Agencia de Extensión Rural Casilda	1962-2007
Zavalla	FCAG-UNR-Estación Agroexperimental Zavalla	1973-2007

Tabla 2. Lluvias Convectivas

Localidad	Año
Pergamino	1995
Cañada de Gómez	2001
Serodino	2002
Chabás	2007
Rosario	1996/2007

Estudio de Lluvias Frontales

El estudio de lluvias frontales de larga duración involucró un análisis de consistencia, la selección de las lluvias de la serie para la diferentes duraciones, el ajuste de modelos probabilísticas, la definición de las tormentas para determinadas recurrencias y la definición de las distribuciones diarias y subdiarias para confeccionar los hietogramas de diseño.

Selección de lluvias para distintas duraciones. En función de los valores diarios de precipitación registrados en las estaciones de medición se procedió a realizar la construcción de las

muestras de lluvias para distintas duraciones. Se seleccionaron lluvias para duraciones de 24 hs, 48 hs, 72 hs, 96 hs y 120 hs, resultando las muestras constituidas por máximos anuales para cada duración.

Ajuste de modelos probabilísticos. Para cada estación y a cada una de las muestras se le ajustaron cinco modelos probabilísticos: LogGauss (Galton), Gumbel, GEV, Pearson y Exponencial, empleando el programa de inferencia estadística AFMULTI (Paoli et al., 1994). Se estudiaron todas las duraciones para recurrencias variables entre 2 y 10000 años. De acuerdo a las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y Chi-Cuadrado ninguno de los modelos probabilísticos es descartado, sin embargo, el que mejor ajusta, considerando en forma global el conjunto de duraciones y estaciones, es el modelo de valores extremos tipo I (EV I) de Gumbel. El cual se demuestra robusto y estable, inclusive para recurrencias elevadas (Riccardi et al., 2008a). Adicionalmente, para la serie de la estación Rosario Aero fueron reconstruidas y parametrizadas las curvas IDR con la información actualizada (Basile et al., 2009)

Lluvias para recurrencias de 10 años y 100 años. En función del modelo de Gumbel se determinaron lluvias de diseño medias areales en la cuenca, adoptando duraciones de 5 días y considerando recurrencias de 10 años y 100 años. La duración adoptada es similar a la duración observada en el evento extraordinario del mes de marzo de 2007 en la ciudad de Rosario. La distribución espacial de las tormentas se realizó mediante la conocida técnica de los polígonos de Thiessen. Los valores de la precipitación media espacial de 5 días de duración son de 203 mm y 294 mm para las recurrencias de 10 años y 100 años respectivamente.

Distribución temporal diaria y sub-diaria de las lluvias 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. En las Figura 2 (a) y (b) se presentan respectivamente los hietogramas determinados para las lluvias de diseño de recurrencia 100 años y 10 años. La distribución a escala temporal sub-diaria se realizó utilizando coeficientes de relación entre láminas de diferentes duraciones, derivados de la serie corta de Rosario-Aeropuerto (40 años) a partir del modelo de Gumbel. Cada uno de los pulsos de lluvia diarios fueron distribuidos en forma sub-diaria adoptando el criterio de distribuir el mayor pulso de lluvia del hietograma diario en 12 hs y los restantes pulsos menores en 6 hs (ver Figura 2 (c)).

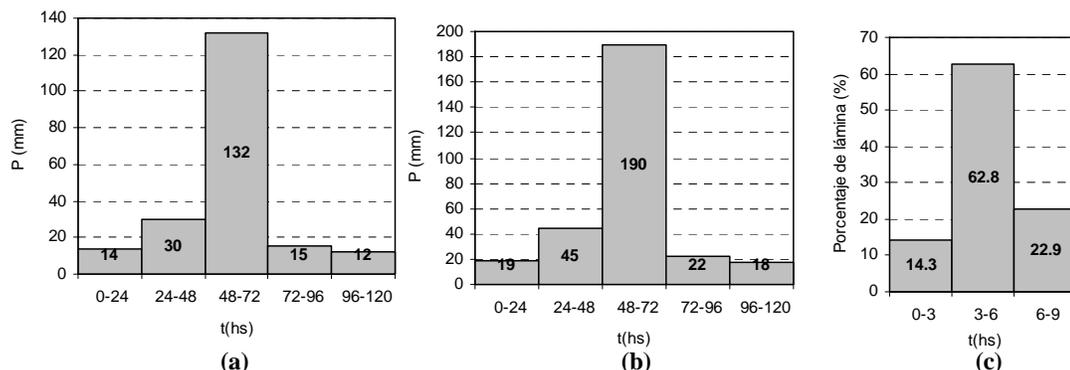


Figura 2. Distribución diaria y subdiaria de lluvia de 5 días de duración, (a) Distribución Diaria R = 10 años, P=203 m; (b) Distribución diaria R = 100 años, P = 294m; (c) Distribución subdiaria

Lluvia focalizada de corta duración

La lluvia focalizada de corta duración se determinó considerando las intensidades máximas asociadas a las principales lluvias de este tipo observadas en nuestra región, las cuales produjeron severos procesos de inundación en las diferentes localidades afectadas. La ecuación de la curva de

regresión ajustada a dichas intensidades máximas es:

$$i_{\text{máx}} = 527.19 D^{-0.3743} \quad (R^2=0.9255) \quad (1)$$

donde $i_{\text{máx}}$ se expresa en mm/h y la duración D en minutos. En la Figura 3(a) se observa la curva de regresión ajustada a intensidades máximas regionales registradas. En la Figura 3(b) se presenta el hietograma de la lluvia convectiva total. La duración de la tormenta es de 6 hs (duraciones típicas de tales lluvias observadas en la región) en tanto que la precipitación total es de 349 mm.

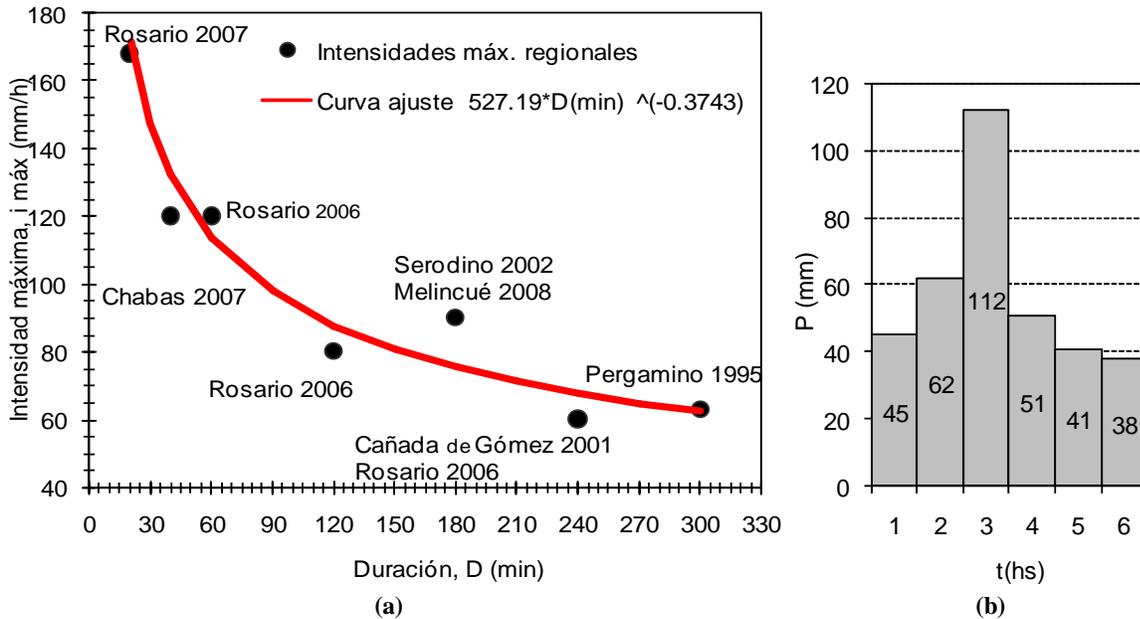


Figura 3. (a) Curva de regresión ajustada a intensidades máximas regionales registradas; (b) Distribución temporal de lluvia convectiva de 6 hs de duración ($P=349$ mm).

Análisis de condiciones de humedad antecedente de lluvias extremas y su comportamiento estadístico

Con el fin de estimar las condiciones antecedentes a las tormentas registradas se consideró el siguiente índice de precipitación antecedente:

$$IPA(n) = P(n) + IPA(n-1) * k(n) \quad (2)$$

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:

$$k(n) = k_{\text{ver}} + (k_{\text{inv}} - k_{\text{ver}}) \text{seno}^2\left(\frac{\pi}{365} n\right) \quad (3)$$

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. A modo ilustrativo se presenta en la Figura 4 la valoración del IPA en la Estación Rosario Aero (Serie 1935-2007) de acuerdo a la formulación propuesta.

Para considerar las condiciones de almacenamiento en el suelo se han definido los siguientes parámetros característicos de la cuenca del Arroyo Ludueña (Zimmermann et al., 2009):

Profundidad radicular cultivo : 700 mm

Humedad volumétrica capacidad de campo, θ_{CC} : 0.36
 Humedad volumétrica punto marchitez permanente, θ_{PMP} : 0.19
 Humedad volumétrica saturación, θ_{SAT} : 0.48
 Lámina equivalente capacidad de campo, R_{CC} : 252 mm
 Lámina equivalente punto marchitez perman., R_{PMP} : 133 mm
 Lámina equivalente saturación, R_{SAT} : 336 mm
 Coeficientes de decaimiento se adoptaron como: $k_{ver} = 0.980$ y $k_{inv} = 0.995$.

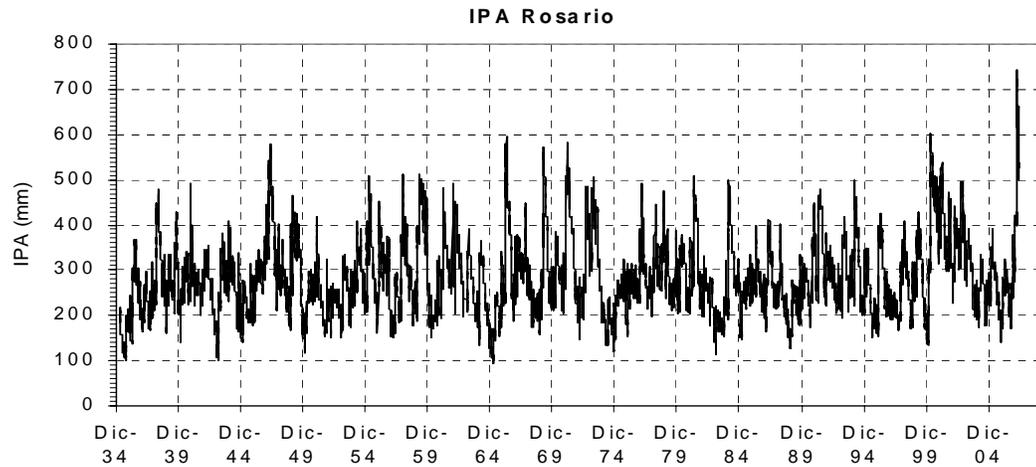


Figura 4. Variación de IPA en estación Rosario Aero

Indice IPA y parámetros asociados a modelos de pérdidas

Dado que en definitiva el IPA tiene que dar información asociada con parámetros utilizados para la estimación de pérdidas del flujo, se propone la siguiente manera de vincularlo; a través de la estimación del grado de saturación del perfil para aplicar el método de Green y Ampt. La propuesta surge directamente de considerar la siguiente relación (Zimmermann et al., 2009):

$$S_e = \frac{IPA_n - R_{PMP}}{R_{SAT} - R_{PMP}} \quad (4)$$

donde S_e es el grado de saturación; R_{PMP} lámina equivalente punto marchitez permanente; R_{SAT} lámina equivalente saturación.

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 la saturación relativa S_e a un probabilidad de excedencia, llegándose a establecer las relaciones que se indican en la Tabla 3. Para mas detalles consultar Zimmermann et al. (2009).

Tabla 3. IPA y S_e para diferentes probabilidades de excedencia (Zimmermann et al., 2009).

$P(x > x_0)$	IPA	S_e
0.5	205.2	0.36
0.2	252.9	0.59
0.1	284.5	0.75
0.05	314.7	0.90
0.02	354.0	1.00
0.01	383.3	1.00

Definición de escenarios hidrológicos para el diseño y para análisis de impacto

En la definición de los escenarios para el diseño hidrológico y para el análisis de impacto fueron consideradas las siguientes condiciones, variables y características del evento:

- Recurrencia de la lluvia total;
- Duración de la tormenta, distribución temporal diaria y subdiaria y distribución espacial;
- Condición de humedad antecedente IPA y Se asociados a probabilidad de excedencia;
- Nivel Hidrométrico del río Paraná

Diseño Hidrológico. Tormentas de larga duración

La duración de la lluvia fue adoptada de 5 días; los valores de las lluvias máximas en 24 hs, 48, 72, 96 y 120 se extrajeron de relaciones IDR de Estación Rosario Aero (Basile et al. 2009) y de la estaciones Casilda y Zavalla. La distribución temporal diaria de lluvias en los 5 días fue considerada según método bloque alterno con máximo en 3er día. La distribución subdiaria se adoptó de acuerdo a coeficiente entre láminas de distintas duraciones Pdiaria/P24; P24/P12, P12/P6; P6/P3 extraídos a partir de las relaciones IDR. La distribución espacial de la lluvia fue adoptada uniforme.

La recurrencia de la lluvia total para el diseño de las obras fue adoptada con una doble valorización. La recurrencia para el diseño de canalizaciones y obras de arte en zonas rurales fue establecida en $R = 10$ años en tanto que para el diseño hidrológico en zonas urbanas cercanas a la desembocadura fue considerada una recurrencia $R = 100$ años.

Se consideraron dos condiciones de humedad antecedente: (a) Condición moderada con IPA y Se asociados a $P(x > x_0) = 0.5$ y (b) Condición severa IPA y Se $P(x > x_0) = 0.05$.

En lo que concierne al nivel del río Paraná fue considerada un estado del río similar al observado el 30 de marzo de 2007 (Niv. Hidrom.= 5.30 m; $R = 5.6$ años)

Análisis de Impacto. Tormentas de corta duración

La duración de la lluvia fue considerada de 6 hs, con un valor de lámina total extraído a partir de la curva de ajuste de las precipitaciones máximas regionales (Fig. 2). Esta precipitación intensa fue considerada en una zona circular de 100 km² de extensión superficial, adoptando una distribución areal constante de la precipitación en dicha área (en el resto del área de la cuenca la lluvia fue considerada nula). La ubicación del centro de la tormenta fue considerado móvil de modo de maximizar caudales y tientes en puntos críticos del sistema hídrico. La condición de humedad antecedente adoptada en el análisis de impacto fue la tipificada como moderada.

Transformación de lluvia total a lluvia neta y Simulación de Esguerrimiento Superficial

La transformación lluvia caudal fue realizada mediante el algoritmo de Green y Ampt. La determinación de los parámetros hidráulicos del suelo K_v (permeabilidad hidráulica saturada) y P_s (potencial de succión), se realizó mediante funciones de pedotransferencia (Zimmermann et al., 2008), con información de suelos espacialmente distribuida originada a partir de digitalización de las cartas de suelos del INTA (INTA 1972-1988).

Simulación de esguerrimiento superficial

La simulación de transformación lluvia neta-caudal se llevó a cabo mediante la utilización de un modelo matemático hidrológico-hidráulico físicamente basado cuasi 2d, estructurado en unidades de discretización espacial cuadrangulares con un tamaño de grilla de 250 m x 250 m denominado CTSS8 (Riccardi et al. 2008b), asistido con la plataforma de pre y post procesamiento de datos y resultados SIMULACIONES (Stenta et al., 2005). Un primer paso en la constitución del modelo fue

la generación del modelo digital del terreno (MDT), el cual fue ejecutado a partir de la digitalización de las curvas de nivel del IGM, de relevamientos topográficos existentes e información topográfica de campaña específicamente registrada para el presente trabajo, donde se relevaron planialtimétricamente y georeferenciaron todas las vías principales de escurrimiento. El sistema de proyección adoptado para el MDT fue el Gauss-Krüger - faja 5 Argentina Posgar 94 Datum WGS 84. Para la creación del MDT en la base cuadrangular que requirió el modelo de escurrimiento se utilizó un programa de tratamiento de datos topográficos realizando la interpolación mediante la técnica de Kriging.

El MDT desarrollado fue incluido en la plataforma y posteriormente fueron cargadas todas las características de los cursos de agua y obras de arte de envergadura (puentes alcantarillas y vertedero) existente en la cuenca. El modelo resultó constituido con 11855 elementos cuadrangulares de 250 m x 250 m, representándose alrededor de 270 km de cursos de agua permanentes, temporarios, canales de importancia y cunetas de ruta con capacidades de conducción relevantes. Asimismo se representaron 78 obras hidráulicas como alcantarillas, puentes viales y ferroviarios, embocaduras y vertedero. Una esquematización de la configuración se presenta en la Figura 5 (mas detalles en Stenta et al., 2009a). El modelo de escurrimiento fue calibrado teniendo en consideración información de niveles de agua y caudales estimados en una serie de crecidas históricas ocurridas entre 1994 y 1996 y con información de una crecida extraordinaria ocurrida en marzo de 2007. Los parámetros hidráulicos ajustados fueron los coeficientes de resistencia en cursos de agua y los coeficientes de gasto de los puentes y alcantarillas.

La simulación mediante el modelo CTSS8 permitió la determinación de la evolución temporal de caudales, velocidades y niveles de agua en todo el dominio espacial para todas las alternativas emergentes del diseño hidrológico. En el sistema hídrico en estudio existen al menos 9 puntos característicos donde fue necesario definir caudales y niveles máximos a los efectos de fijar pautas para el diseño de obras hidráulicas, por lo cual de toda la masa de resultados generados por el modelo de escurrimiento, se extrajeron los correspondientes a los sitios de interés (Figura 1). En la Tabla 4 se presentan a modo ilustrativo los caudales máximos en los puntos característicos.

Tabla 4. Síntesis de Resultados en Términos de Caudales en Puntos Característicos

Ident	Puntos Característicos de la cuenca	R = 10 años Moderado	R=100 años Moderado	R=100 años Severo
1	Canal Ibarlucea aguas abajo de Canal Urbano CUPI	44.	61.	65.
2	Canal Ibarlucea y Camino Limite	58.	115.	147.
3	Canal Ibarlucea y puente RN N° 34	62.	118.	151.
4	Canal Salvat en descarga a Canal Ibarlucea	87.	122.	132.
5	Canal Ibarlucea en descarga a Ludueña	149.	220.	251.
6	Aguas abajo de Presa de Retención	52.	65.	92.
7	Arroyo Ludueña en puente RN N° 9	75.	118.	137.
8	Rama Ludueña aguas arriba de descarga de Canal Ibarlucea	104.	140.	158.
9	Arroyo Ludueña en puente Av. Circunvalación	257.	377.	439.

A partir de la información generada, la autoridad hídrica de la provincia de Santa Fe comenzó a plantear el prediseño de obras hidráulicas necesarias para mitigar la vulnerabilidad ante inundaciones en zonas críticas cercanas a la desembocadura. Esta etapa dio lugar a una nueva fase del trabajo en donde se propuso un proceso retroalimentado en conjunto con los ingenieros proyectistas, el primer paso del proceso consistió en (i) *proponer obras para evitar inundaciones* y un segundo paso involucró (ii) *la verificación mediante modelación matemática del grado mitigación del efecto de la crecida en términos de niveles y caudales máximos*. La descripción de esta nueva fase puede consultarse en Stenta et al. (2009b).

Análisis de la respuesta Hidrológica para tormentas convectivas fuertemente focalizadas

Como ya fuera mencionado, ha formado parte de la metodología aquí descrita, el análisis del impacto de un lluvia convectiva extrema fuertemente focalizada, teniendo en consideración las diferentes variantes de obra emergentes del diseño hidrológico. Los focos considerados fueron de 100 km² de superficie y la lluvia total adoptada fue la resultante de las máximas lluvias convectivas observadas en la región en los últimos 15 años. La precipitación considerada fue de 349 mm distribuída temporalmente en 6 horas, dicha precipitación supera a la lluvia estadística asociada a $R = 10000$ años (249 mm), pudiendo considerarse como semejante a la precipitación máxima probable para esa duración. Para la determinación de la lluvia neta se utilizó la hipótesis de un estado de humedad antecedente tipo *moderado* lo que arrojó un valor de lluvia neta acumulado de 266 mm, en la Figura 6 se presenta la distribución temporal de la lluvia total y neta. Dado que en esta etapa se priorizó la determinación del máximo impacto sobre la zona baja del sistema hídrico del arroyo Ludueña, el foco se fue ubicando en puntos de la región centro norte de la cuenca. Pudo verificarse que los mayores caudales en la embocadura de las conducciones cerradas se dan cuando el foco se ubica a unos 6-10 km al oeste de la zona de la embocadura. En la Figura 7 se representa esquemáticamente el foco más crítico considerado para maximizar caudales en la zona de la embocadura.

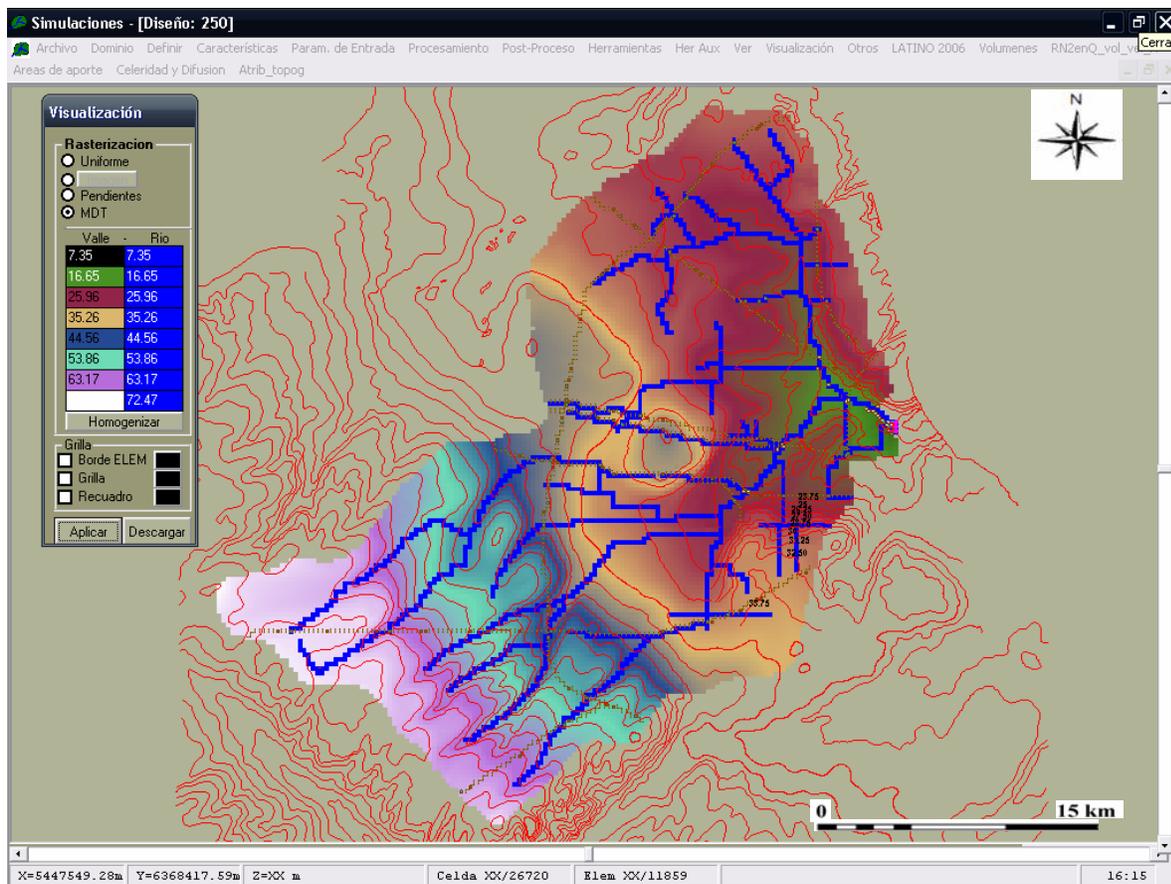


Figura 5. Constitución del modelo de escurrimiento

Los resultados obtenidos en las simulaciones indican que el caudal esperable en la embocadura de las conducciones cerradas supera los 400 m³/s. Comparando el valor máximo de caudales asociado a una tormenta convectiva con los caudales máximos obtenidos en la simulación de

tormentas extendidas - Escenario Moderado (E1): $Q = 370 \text{ m}^3/\text{s}$; Escenario Severo (E2): $Q = 440 \text{ m}^3/\text{s}$ - puede deducirse que las obras que pueden también mitigar fuertemente el impacto que ha de producir una tormenta de estas características son las involucradas para cubrir el E2 y en menor medida las obras emergentes del E1. Al observarse los hidrogramas y limnigramas generados en la modelación es posible deducir la escases de tiempo para predecir este episodio con un sistema de alerta. En efecto, dado la fuerte focalización de la tormenta y la cercanía con la sección del curso considerada, prácticamente el pico de la crecida coincide con el final del barrote de lluvia más “pesado” (98 mm de neta en 1 hora).

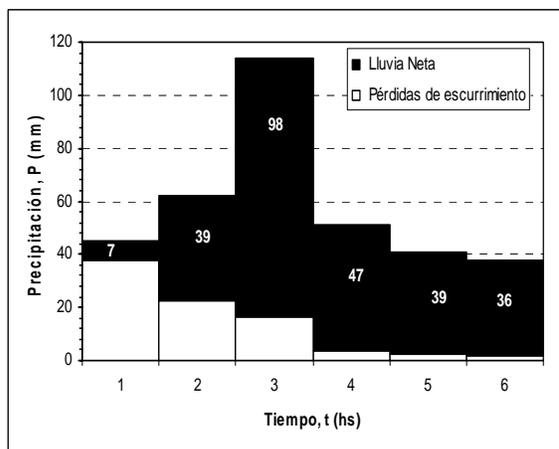


Figura 6. Lluvia convectiva $P=349 \text{ mm}$, $P_n=266 \text{ mm}$

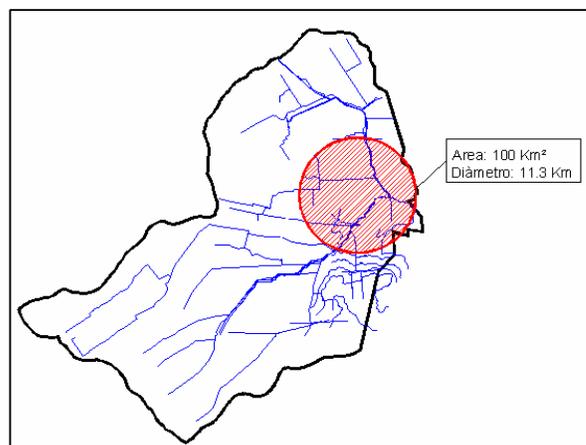


Figura 7. Diferentes posicionamientos del foco

CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología de diseño hidrológico que contempla la consideración de tormentas de larga duración para diseño y tormentas fuertemente focalizadas de alta intensidad para verificación de impacto.

Se verifica que, en cuencas como la aquí reportada las duraciones de lluvias que generan escenarios de inundaciones corresponden a 5 días.

La consideración de la humedad antecedente es introducida mediante la determinación de su probabilidad de excedencia, probabilidad determinada a partir de estudio estadístico de la condición antecedente en lluvias extremas observadas en la región.

El diseño tanto de las vías de desagüe como de las estructuras hidráulicas en la cuenca baja se llevaron a cabo considerando una recurrencia de 10 años para las canalizaciones rurales y de $R = 100$ años para canalizaciones y conducciones cerradas en cuenca baja cercanos a zonas urbanas densamente pobladas.

La simulación de escurrimiento superficial mediante un modelo físicamente basado ha permitido no solo determinar caudales, sino también velocidades y niveles, reproducir remansos, controles de flujo en secciones críticas, evolución de volúmenes de escurrimiento y almacenamiento, parámetros necesarios para un mejor diagnóstico y propuestas de obras hidráulicas contra inundaciones.

La desembocadura del arroyo a nivel en el río Paraná obligó a superponer la crecida de diseño con un nivel del río determinado, adoptándose para el diseño el nivel existente en el río Paraná cuando se presentó en el arroyo Ludueña la última crecida extraordinaria en marzo de 2007. La recurrencia del nivel del río considerada en este caso fue de 5.6 años. Es claro que, como en otros tantos casos donde cobra importancia un posible remanso iniciado en la descarga en el cuerpo receptor, el problema no solo se debe resolver en términos de caudales sino también en términos de niveles, lo que significa hidráulicamente hablando, en flujo no uniforme e impermanente.

Sintetizando, el criterio global de diseño considerado para las obras en la cuenca baja fue el de adoptar una lluvia de 5 días de duración, con una recurrencia de 100 años, una distribución diaria según bloque alterno con máximo en el 3er. día, una distribución subdiaria basada en las relaciones de láminas, una condición de humedad antecedente asociada a una probabilidad de excedencia $P(x > x_0) = 0.05$ y un nivel del río Paraná asociado a una recurrencia de 5.6 años. La verificación de impactos se analizó a partir de la simulación de un evento extremo focalizado en 100 km^2 , con una duración de 6 horas y moviendo el foco de modo de producir el mayor caudal y/o nivel en las secciones críticas del arroyo con mayor posibilidad de desborde y el consiguiente impacto por inundaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basile P., Riccardi G., Zimmermann E., Stenta H., Scuderi C., Rentería J. y Gonzalez A.** (2009), "*Derivación de curvas intensidad-duración-frecuencia unificadas para la ciudad de Rosario, Santa Fe, Argentina*". XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew.
- INTA (1972 a 1988).** *Cartas de Suelo de la República Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Paoli C., Bolzicco J. y Cacik P.** (1994), *Análisis de Frecuencia de Variables Hidrológicas*, FICH, UNL. Santa Fe.
- Riccardi G., Zimmermann, E., Basile P., Stenta H., Rentería J., Mancinelli A., y Scuderi C.** (2008a). *Rehidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las Cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo*. Informe de Avance n° 1, Convenio entre Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura y Ministerio del Agua, Servicios Públicos y Medio Ambiente /Santa Fe), FCEIA, UNR, Rosario.
- Riccardi G., Zimmermann E., Basile P., Stenta H., Scuderi C., Garcia M. y Rentería J.**, (2008b), "*Implementación de Un Modelo De Escurrimiento Superficial en Cuencas del Sur de la provincia De Santa Fe, Argentina*". XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia. 15 pags.
- Stenta, H. R., Rentería, J. P. y Riccardi, G.** (2005) "*Plataforma Computacional para Gestión de Información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial*". XX Congreso Nacional del Agua y IIIº Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza. ISBN 987-22143-0-1. Cap. Hidrología. T 74. pp 1-13.
- Stenta H., Riccardi G., Navarro R., Zimmermann E., Postiglione R., Basile P., Zucca O. y Zacarias S.** (2009a), "*Aplicación de un modelo matemático distribuido en la cuenca del arroyo Ludueña para diferentes alternativas de obras hidráulicas orientadas al saneamiento hídrico integral*". XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew.
- Stenta H., Riccardi G., Zimmermann E., Basile P., Scuderi C., Rentería J. y Zacarias S.** (2009b), "*Implementación y Explotación de un modelo matemático distribuido de escurrimiento superficial para su utilización en sistema de alerta contra inundaciones en la cuenca del arroyo Ludueña*". XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew.
- 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.
- Zimmermann, E., Basile Pedro A. y Riccardi Gerardo A.** (2001) "*Análisis de la Modificación en la Respuesta Hidrológica del Sistema del Arroyo Ludueña Provocada por Cambios en el Uso del Suelo*". Seminario Internacional Sobre Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas (SIMICH 2001). Rosario.
- Zimmermann E., Scuderi C., Riccardi G., Stenta H., Basile P., Garcia M. y Rentería J.** (2008), Asignación de parámetros hidráulicos de suelos utilizando funciones de pedotransferencia con información de las cartas de suelo del INTA., Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura, ISBN 978-950-673-691-0; UNR Editora, Rosario.pp. 145-158.