

REGIONALIZACIÓN DE LÁMINAS DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA

Magalí Cervio¹, Nicolás F. Guillén^{1, 3}, Ada Patricia Lobo², Clarita M. Dasso^{3, 4}, Carlos M. García^{1, 3}

¹ CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua- Universidad Nacional de Córdoba-Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

² Subsecretaría de Planificación de los Recursos Hídricos de la Provincia de Catamarca.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

⁴ Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua, Córdoba, Argentina

RESUMEN

En este trabajo se reportan los resultados de la predicción del valor de la lámina de lluvia diaria de diseño para la provincia de Catamarca, a través de un análisis de estadística inferencial y de regionalización. Para el análisis estadístico finalmente se seleccionaron registros de 48 estaciones pluviométricas que representan la región de estudio. A partir de esta información histórica se elaboraron las series de máximos diarios anuales. Luego, para todas las series elaboradas se verificaron las hipótesis estadísticas básicas (presencia de datos atípicos, independencia, estacionalidad y homogeneidad) requerida a una muestra para que tengan validez el análisis de estadística inferencial.

Se realizaron ajustes de 6 funciones de distribución de probabilidad para estimar los valores de máxima lamina de lluvia para los siguientes periodos de retorno, $T= 2, 5, 10, 20, 25, 50$ y 100 años, como así también los intervalos de confianza asociados a cada predicción. Se seleccionó la función de distribución Log Normal como óptima para este estudio y se cuantificó las diferencias relativas en la predicción debido a esta hipótesis. Los valores de lámina de lluvia diaria predichos se regionalizaron para la región de estudio mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00), el cual permite generar mapas digitalizados con una resolución espacial de 25 km^2 . Finalmente se evaluó los efectos de considerar valores de lluvia máxima diaria de distintos periodos de retorno predichos para las provincias limítrofes que cuentan con esa información (Santiago del Estero y Salta) como condiciones de borde durante la elaboración de los mapas digitalizados.

Palabras Claves:

Precipitación Máxima Diaria Anual, Regionalización, Sistemas de Información Geográfica, Periodo de Retorno, Provincia de Catamarca.

INTRODUCCIÓN

El diseño hidrológico se define como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo. El diseño hidrológico se puede utilizar para mitigar amenazas hidrológicas proyectando medidas “estructurales”, tal es el caso de una represa para el control de crecientes, sistemas de control de excedentes pluviales en obras viales, entre otras, o bien, desarrollando medidas “no estructurales” como ser la determinación de áreas de riesgo, entre otros.

La escala de diseño hidrológico es el rango en magnitud de la variable de diseño dentro del cual se debe seleccionar un valor para determinar el flujo de entrada al sistema. Los factores determinantes en la selección de este valor para una obra civil, son el costo y la seguridad asociada. Sobredimensionar las obras es antieconómico, mientras que sub-dimensionar las mismas pueden ocasionar fallas con resultados catastróficos. La magnitud óptima para el diseño es aquella que equilibra criterios de costo y seguridad.

Generalmente al diseño hidrológico se lo utiliza para la estimación de la Creciente de Proyecto. Sin embargo la estimación de los caudales escurridos en la crecienta de proyecto está afectada por la insuficiencia estadística de los registros históricos de caudales, lo cual lleva a evaluar indirectamente estos caudales mediante el uso de modelos de transformación lluvia – caudal (P-Q), los cuales son alimentados por eventos hipotéticos críticos (lluvias de diseño). Si bien tienen otros componentes, estas lluvias de diseño parten de un vínculo esencial entre los rasgos característicos de la precipitación: la función intensidad-duración-Recurrencia (i-d-T). Las relaciones i-d-T y el patrón de distribución temporal de las lluvias, requeridos para estimar Crecientes de Proyecto, solo se pueden extraer de extensos registros de alta frecuencia, normalmente fajas pluviográficas. Aun reemplazando caudal por intensidad de lluvia se continúa teniendo un problema, ya que las series pluviográficas largas también son escasas, aunque menos que las hidrométricas. En cambio, es habitual otro dato de lluvia provisto por pluviómetros: la lámina de lluvia diaria. De esta manera, los técnicos y proyectistas pueden proceder a la estimación mediante un análisis de estadística inferencial de las láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes periodos de retorno, a partir de las series de datos pluviométricos registrados en diversos puntos de la cuenca.

En este trabajo lo que se hizo fue estimar la lámina de lluvia máxima diaria asociada a diferentes periodos de retorno en la provincia de Catamarca. A partir de ella, puede calcularse la lámina máxima asociada a una duración diferente (utilizando un coeficiente de reducción o maximización) y a partir de ella si calcular mediante un modelo de transformación P-Q el caudal de diseño.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es la elaboración de mapas digitales de lluvias máximas diarias asociados a recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años para la provincia de Catamarca. A continuación se detalla de manera resumida la metodología empleada con la finalidad de cumplimentar el objetivo citado. El proceso se puede resumir de la siguiente manera:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones existentes en la provincia de Catamarca.
2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas preseleccionadas.
3. Determinación del año hidrológico.
4. Generación de la serie hidrológica de máximas lluvias diarias.
5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas lluvias diarias seleccionadas tales como independencia, estacionalidad y homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las series de precipitación.

6. Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
7. Análisis de estadística inferencial mediante el ajuste de distribución de probabilidad.
8. Interpolación de la información puntual, generación de grillas de análisis mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00).
9. Generación de mapas tendenciales digitales de máximas láminas de lluvia diaria de distintos periodos de retorno para la provincia de Catamarca.

A continuación se describe en detalle cada actividad:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones existentes en la provincia de Catamarca.

Se recopiló información de la lámina de lluvia diaria precipitada, la misma se obtuvo de las estaciones pluviométricas instaladas en las provincias de Catamarca. Para la obtención de datos se recurrió a diferentes fuentes como:

- Páginas web, en su mayoría pertenecientes a entidades gubernamentales, donde se encuentran datos históricos de lluvia diaria:
 - <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/sitioweb/frmFiltro.aspx>
 - <http://dev.siaa.gov.ar/series>
 - <http://siga2.inta.gov.ar/en/datoshistoricos/>
 - <http://www.tutiempo.net/clima/Argentina/AR.html>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Secretaría de Recursos Hídricos.

En total se analizaron 154 estaciones pluviométricas dentro del territorio. Luego se realizó una preselección, de acuerdo a cada longitud de serie de las estaciones para continuar con el análisis. El criterio de Longitud de Serie consistió, en un principio, en fijar veinte años como longitud mínima de las series anuales de lluvias máximas diarias a analizar. Este condicionante, implica rechazar puestos pluviométricos disponibles, por lo que se adopta como criterio final la aceptación de todas las estaciones con una longitud de serie mayor o igual a catorce años. Esta longitud mínima coincide con lo definido para estudios similares realizados en otras provincias de Argentina.

La Tabla 1 y la Figura 1 permiten visualizar la cantidad de estaciones que pertenecen a cada intervalo de longitud de serie, es decir, entre uno y catorce años, mayores o igual a catorce años y mayor o igual de veinte. Así, por otra parte, existen 50 estaciones con más de catorce años de registro, conformando el 32% del total. Este porcentaje de estaciones son las que continuaron las verificaciones subsiguientes.

Tabla 1: Frecuencias de las estaciones pluviométricas en función de su longitud de serie, para la provincia de Catamarca.

Longitud de Serie - CATAMARCA		
Estaciones con datos	154	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	104	68%
Longitud de Serie >= 14	50	32%
Longitud de Serie >= 20	28	18%

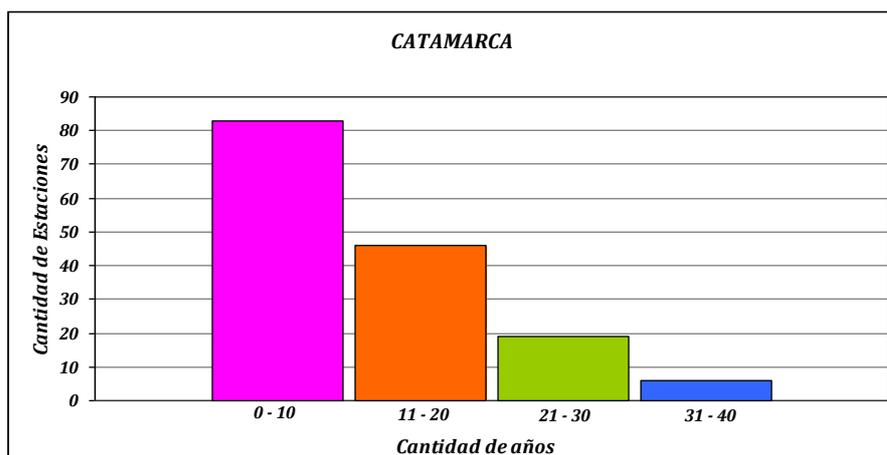


Figura 1: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas encontradas, para la provincia de Catamarca.

2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas y sus parámetros estadísticos.

En la Figura 2 puede apreciarse la disposición espacial de las mismas pre-seleccionadas. Puede observarse una mayor concentración en la zona centro este y sur. En esta instancia del desarrollo del trabajo no se incluyeron estaciones en el sector norte y este de Catamarca.

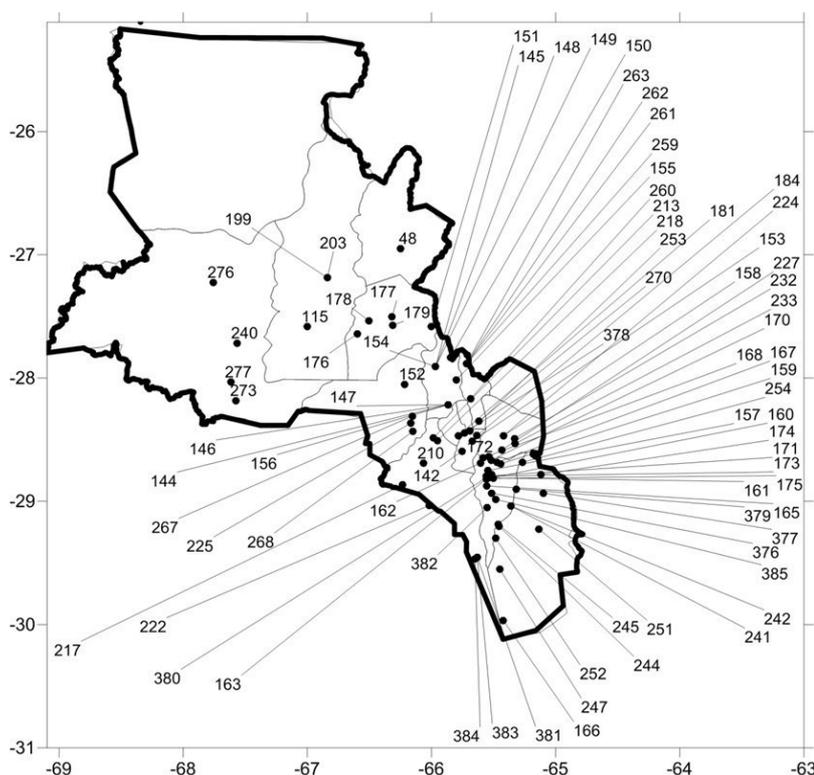


Figura 2: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas.

3. Determinación del año hidrológico para la región en estudio.

Para el análisis y procesamiento estadístico de las lluvias es recomendable dividir las series históricas en “años hidrológicos”. Este concepto, se define como el período anual que no fracciona el ciclo estacional de lluvia, pudiendo ser distinto al año calendario. Se observó, para los registros

encontrados, que las máximas lluvias se daban entre los meses de Octubre a Abril, por ende, para el análisis se optó por determinar cómo año hidrológico al periodo desarrollado de Julio a Junio del año (calendario) siguiente.

4. Generación de la serie hidrológica de lámina de lluvia máximas diarias.

Luego de fijar el año hidrológico se elaboraron la serie hidrológica de máximos anuales de lámina de lluvias diarias. Se pudo determinar que los máximos de lluvia máxima diaria ocurrieron generalmente entre los meses de Octubre y Abril, inclusive. Por ello cuando no se contaba con datos en algunos de esos meses, se prescinde de ese año hidrológico, dado que en esos meses es probable que se dé la precipitación máxima anual, lo que podría ocasionar subestimaciones en los análisis estadísticos que se realizarán sobre ellas.

5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas anuales de lluvia diaria.

5.1. Detección de presencia de datos Atípicos.

Las series de máximos anuales de lluvia diaria de las cincuenta estaciones pluviométricas preseleccionadas que tenían una longitud de serie acorde fueron sometidas a la detección de datos atípicos. Si las series tenían un valor atípico, este se removía pero si tenía más de un valor atípico toda la serie era descartada. De las mismas, (Ver tabla 2) solo la estación Presidente Roque Sáenz Peña Aeródromo ha evidenciado más de un valor atípico y fue descartada. Dicha eliminación solo representa el 2% de las estaciones que tenían una longitud de serie acorde.

Tabla 2: Estación pluviométrica con más de dos Datos Atípicos.

Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Presidente Roque Sáenz Peña Aeródromo	30	-60,450	-26,810

5.2. Prueba de Independencia.

Las cuarenta y nueve estaciones que verificaron la hipótesis anterior fueron sometidas a la prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz). En la Tabla 3 se muestran las estaciones depuradas. Del total de estaciones analizadas una estación no pasó la prueba, lo cual constituye el 2% del total de estaciones que verificaron datos atípicos.

Tabla 3: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios.

Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Tinogasta	43	-58,985	-27,463

5.3. Prueba de Estacionalidad.

Las estaciones que verificaron las hipótesis anteriores fueron sometidas a la Prueba de Estacionalidad (Kendall). En Catamarca todas verificaron esta prueba.

5.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

Las estaciones restantes fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad (Wilcoxon) de sus registros históricos. En Catamarca todas las series verificaron a la prueba.

De esta manera se concluye que de las 154 estaciones pluviométricas de las cuales se partió este trabajo, 48 pasaron las pruebas representando estas el 31% del total. En la Figura 3 se puede observar la distribución espacial de las estaciones que pasaron las pruebas.

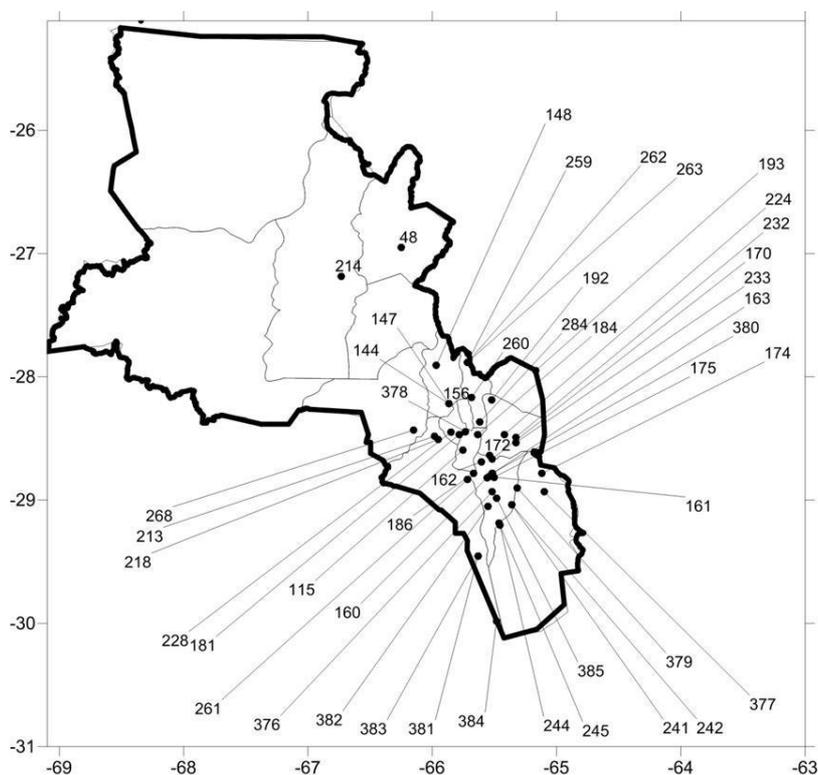


Figura 3: Estaciones finalmente seleccionadas.

6. Análisis de estadística descriptiva

En la Tabla 4 se presenta una tabla resumen con los datos estadísticos más importantes de las series anuales de máximos de lluvia diaria de las estaciones finalmente seleccionadas: Valor máximo observado en la serie, promedio aritmético y desvío estándar para las series. Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

Tabla 4: Parámetros de estadística descriptiva de las series anuales de máximos de lluvia diaria de las estaciones finalmente seleccionadas en la provincia de Catamarca.

ID Org.	Nombre de la estación	Provincia	Máximo [mm]	Media [mm]	Desvío [mm]
48	Santa María Pie de Médano	Catamarca	43.8	26.10	8.61
115	Belen - Playa Larga	Catamarca	65.0	38.9	16.6
144	El Rodeo	Catamarca	122.0	60.16	21.51
147	Las Piedras Blancas	Catamarca	105.0	62.31	18.47
148	Los Castillos	Catamarca	120.0	70.03	22.82
156	Las Juntas	Catamarca	151.0	83.04	28.00
160	Cda. De Ipizca	Catamarca	143.0	84.89	29.00
161	Dique de Ipizca	Catamarca	115.0	75.12	19.00
162	El Taco	Catamarca	137.0	84.86	27.00
163	Las Ruditas	Catamarca	141.0	88.82	27.00
170	Casa Armada	Catamarca	123.0	86.86	22.00
172	La Estancia	Catamarca	122.0	86.00	17.00
174	Las Ensenadas	Catamarca	138.0	79.97	23.53
175	Ancasti	Catamarca	166.0	100.38	29.84
181	Capital	Catamarca	72.0	47.32	12.53
184	El Portezuelo	Catamarca	112.0	63.00	17.31
186	Nana Huasi	Catamarca	127.0	79.30	25.98
192	Dique de la Cañada	Catamarca	97.5	68.70	19.18
193	Guasayan	Catamarca	115.0	71.00	25.22
213	Los Angeles Capayan	Catamarca	90.0	63.68	12.70
214	Los Nacimientos	Catamarca	98.0	51.07	27.53
218	Villa Los Angeles	Catamarca	75.0	43.00	7.41
224	El Lindero	Catamarca	150.0	91.79	22.57
226	Guayondo	Catamarca	132.0	70.25	22.89
228	La Chacrita	Catamarca	140.0	88.48	27.65
232	Los Corrales	Catamarca	205.0	106.06	39.94
233	Molle Pampa	Catamarca	185.0	98.44	33.67
241	Loma Sola	Catamarca	120.0	78.25	24.11
242	Dique Montegasta	Catamarca	140.0	70.30	30.76
244	El Divisadero	Catamarca	145.0	77.28	27.22
245	El Talar	Catamarca	150.0	84.78	32.50
259	Balcozna	Catamarca	170.0	82.74	33.83
260	La Merced	Catamarca	142.0	71.57	35.77
261	La Higuera	Catamarca	142.0	77.30	28.40
262	Las Lajas	Catamarca	270.3	93.78	49.01
263	San Antonio	Catamarca	215.0	90.05	42.18
268	Mutquin	Catamarca	124.0	53.88	19.46
284	La Bajada	Catamarca	120.0	66.20	26.31
376	Amana	Catamarca	133.0	81.29	21.23
377	S. Antonio de la Paz	Catamarca	138.0	62.30	25.00
378	Esquiú	Catamarca	90.0	50.80	16.30
379	Icaño	Catamarca	122.0	65.33	23.43
380	Ipizca	Catamarca	125.0	68.83	25.32
381	Las Peñas	Catamarca	99.0	55.24	19.25
382	Majada	Catamarca	100.0	63.89	18.91
383	San Martín	Catamarca	119.0	49.47	20.12
384	Telaritos	Catamarca	119.0	49.83	25.22
385	Yerba Buena	Catamarca	128.0	72.06	22.24

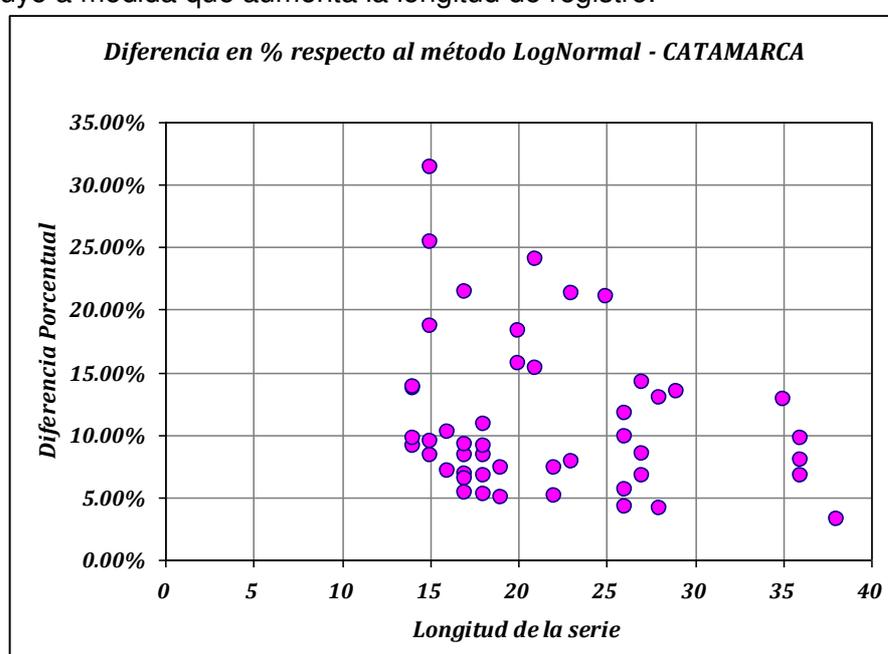
7. Análisis de estadística inferencial.

En primer lugar, se determinaron las probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual observado, utilizando la Ecuación de Weibull en cada estación pluviométrica.

Luego, dichos datos se ajustaron a las 6 funciones de distribución de probabilidad teóricas siguientes:

- a) GEV (Método de Máxima Verosimilitud).
- b) Gumbel (Método de Máxima Verosimilitud).
- c) Log. Normal (Método de Máxima Verosimilitud).
- d) GEV (Método de Momentos).
- e) Gumbel (Método de Momentos).
- f) Log Pearson tipo III (Método de Momentos).

Debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina (Audagna, 2014; Belli et al., 2012; Caamaño Nelli y Dasso, 2003; Catalini eta al., 2010; Catalini eta al., 2012; y Lencinas, 2014), es que se adopta la misma función de distribución adoptada en esos estudios: Log.Normal con parámetros ajustados por el método de Máxima Verosimilitud para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales. Se analiza a continuación la máxima diferencia en porcentaje de los valores de la lámina de lluvia para 100 años de periodo de retorno asociadas a las distintas funciones de distribución con respecto a la "Log Normal". Se puede observar en la Figura 4 que la máxima diferencia de los valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la Log Normal disminuye a medida que aumenta la longitud de registro.



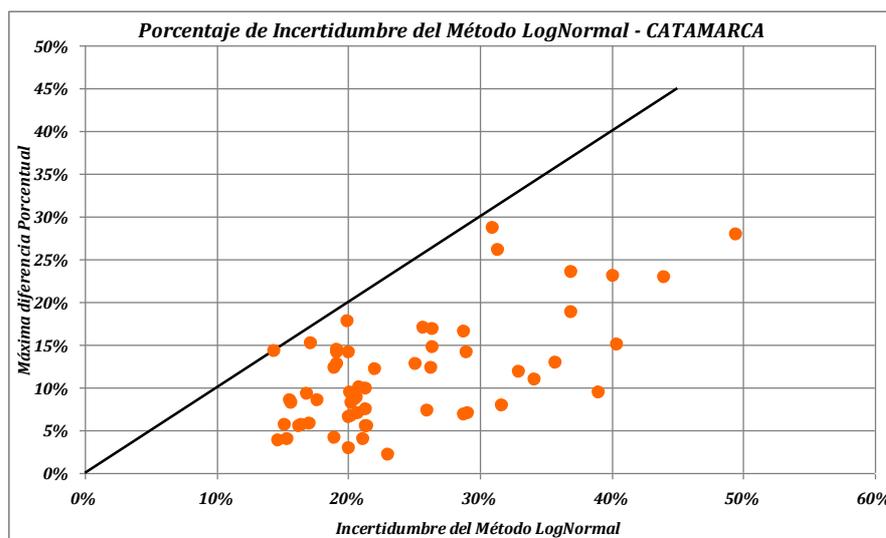


Figura 5: Contraste entre de la máxima diferencia porcentual observada entre los valores estimados con la distribución LogNormal (denominada Máxima diferencia porcentual) y la “Incertidumbre del método Lognormal” representativo del tamaño de los intervalos de confianza calculado como la diferencia relativa (límite superior – valor medio) / valor medio.

8. Interpolación de la información puntual utilizando SIG

Con los valores de lámina de lluvia estimados para los distintos periodos de retorno en cada una de las estaciones pluviométricas se utilizaron técnicas de análisis espacial para poder interpolar la información puntual con el objeto de generar grillas de información pluviométrica.

En este proceso se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual es definido como un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos geográficos. En la actualidad, se encuentran disponibles una gran variedad de herramientas y paquetes computacionales para asistir estas tareas. El paquete computacional elegido fue el IdrisiSelva versión 17.00, el cual permite generar un archivo vectorial o de tipo raster georeferenciado. Utilizando esta herramienta se realizó la interpolación espacial de los valores de lámina de lluvia estimados para los distintos periodos de retorno a través del método de Kriging. Específicamente este método permite generar archivos raster a partir de la totalidad de los archivos vectoriales anteriormente creados con la información de lluvia máxima diaria estimada para cada localización. La figura 6 muestra el Raster interpolado por el método Kriging para la precipitación diaria media máxima anual estimada para un período de retorno de dos años [en mm].

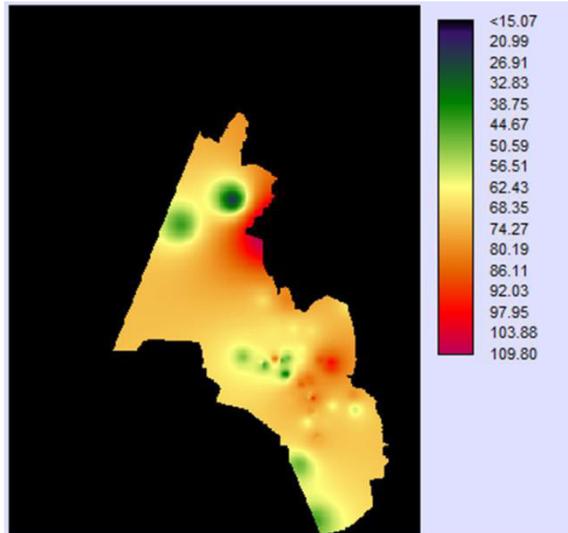


Figura 6: Raster interpolado por el método Kriging para la Precipitación media máxima estimada para un periodo de retorno de dos años [en mm].

9. Generación Mapas tendenciales de lluvias diarias máximas anuales para distintos periodos de retorno

En base a las interpolaciones obtenidas por el método de Kriging de los valores medios de precipitación diaria para distintas recurrencias, se generó una imagen de superficie tendencial que suaviza las variaciones locales observadas. En las Figuras 7 a 12 se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes periodos de retorno analizados.

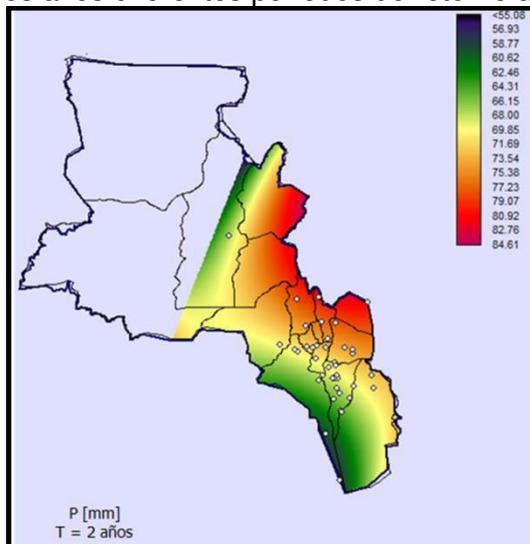


Figura 7: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=2$ años [en mm].

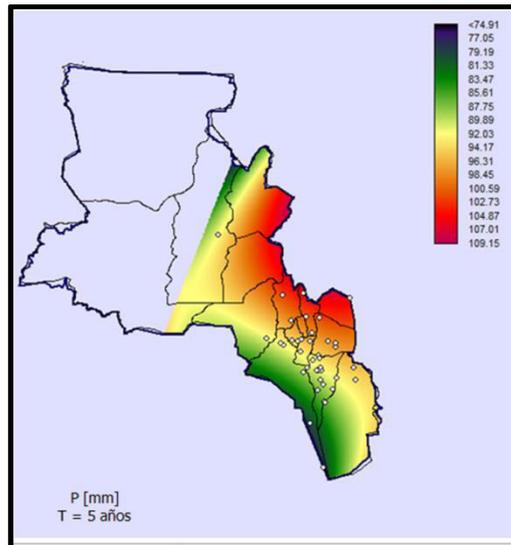


Figura 8: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=5$ años [en mm].

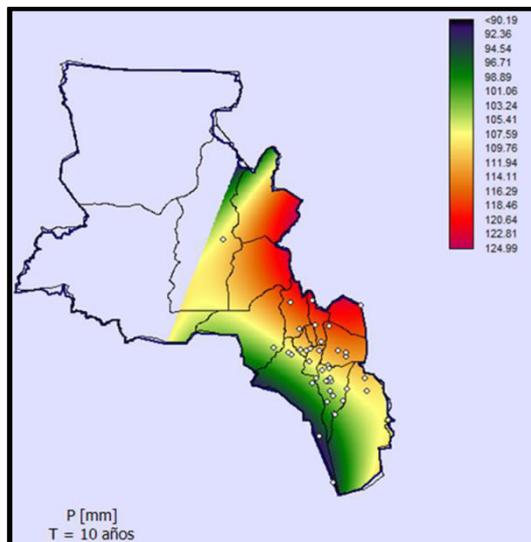


Figura 9: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=10$ años [en mm].

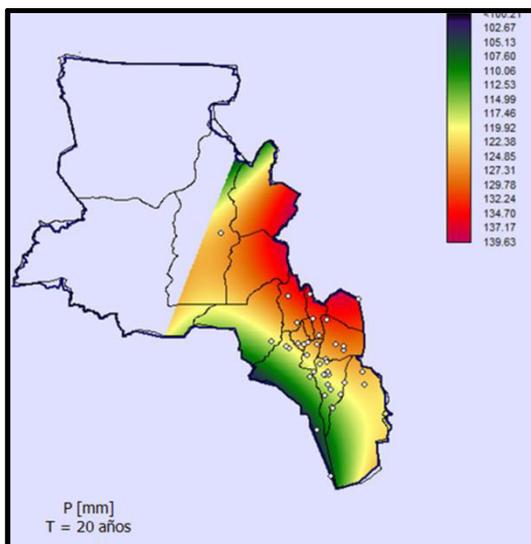


Figura 10: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=20$ años [en mm].

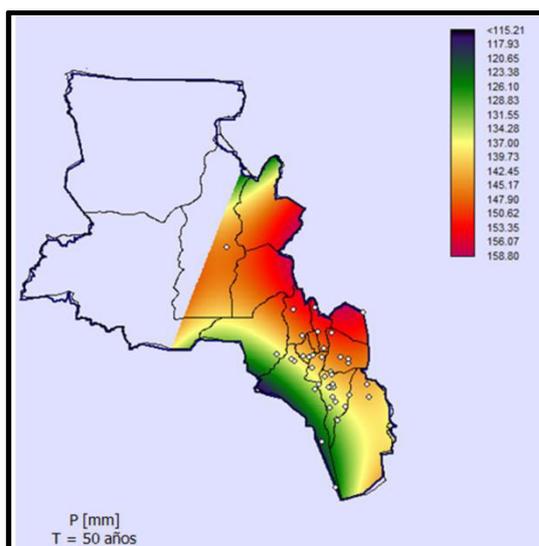


Figura 11: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=50$ años [en mm].

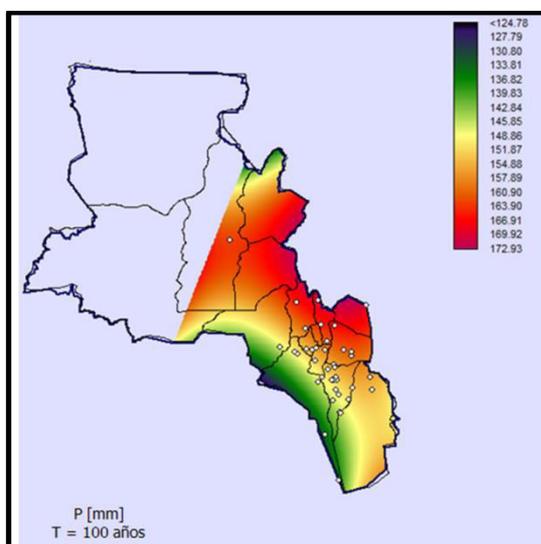


Figura 12: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=100$ años [en mm].

CONCLUSIONES

1. Se recopilaron y procesaron registros de 154 estaciones pluviométricas en la región de estudio.
2. Se ubicaron espacialmente las estaciones notando una ausencia de las mismas en la zona de la Puna.
3. La determinación del año hidrológico Julio-Junio resulto ser el más adecuado para la región de estudio.
4. Se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas, dando como resultado que los registros de 48 estaciones verificaron estas pruebas.
5. De las 6 alternativas de función de distribución de probabilidad y de método de ajuste ensayado se adoptó la función LOGNORMAL con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud como representativo y se verifico que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativo que la incertidumbre debido al modelo probabilístico utilizado.

6. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva17.00.
7. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de valores anómalos en el espacio.
8. Se crearon mapas tendenciales de isohietas de láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes períodos de retorno.

REFERENCIAS

Audagna, Yael (2014). "Regionalización de lluvias máximas diarias en la provincia de Santiago del Estero" - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.

Belli, Virginia Soledad; Cueto, César Agustín; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio (2012). "Regionalización de lluvias máximas – Aplicación a las provincias de Córdoba y Santa Fe" - Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería – Universidad Católica de Córdoba – Córdoba, Argentina.

Caamaño Nelli, Gabriel; Dasso, Clarita (2003). "Lluvias de Diseño – Conceptos, Técnicas y Experiencias".

Catalini, Carlos G.; Maidah, Andrea; García, Carlos M.; Caamaño Nelli, Gabriel (2010). "Mapas digitales de isohietas de lluvias máximas diarias para la provincia de Córdoba".
Catalini, Carlos G.; Caamaño Nelli, Gabriel E.; García Carlos M., Belli, Virginia Soledad; Bianchiotti, Bernabé; Cueto, César Agustín; Lérica, Gastón; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio; Sánchez, Ezequiel. (2012). "Regionalización Paramétrica De Funciones I-D-T. Aplicación A Las Provincias De Córdoba Y Santa Fe"

Lencinas, Matías Javier (2014). "Validación de la tormenta de diseño para la Presa Los Molinos - Jujuy - utilizando técnicas de regionalización" - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.

REGIONALIZACIÓN DE LÁMINAS DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIA Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY

M. Cecilia Botelli¹, Nicolás F. Guillén², Matías Lencinas², Carlos M. García^{2, 3}, Carlos G. Catalini⁴, Marcelo Chalabe¹, Diego Rincón¹

¹Universidad Católica de Salta - Grupo de Investigación de Gabinete de Hidráulica e Instalaciones Sanitarias), Campo Castañares –Salta- República Argentina.

²CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua- Universidad Nacional de Córdoba-Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

⁴Universidad Católica de Córdoba - Grupo de Investigación de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobremente Aforadas (UCC -EHCPA) Camino a Alta Gracia km 7 ½, (X5016DHY), Córdoba República Argentina.

Mail de contacto: cgarcia2mjc@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se reportan los resultados de la predicción del valor de la lámina de lluvia diaria de diseño para las provincias de Salta y Jujuy, a través de un análisis de estadística inferencial y de regionalización. Para el análisis estadístico finalmente se seleccionaron registros de 60 estaciones pluviométricas que representan la región de estudio. A partir de esta información histórica se elaboraron las series de máximos diarios anuales. Luego, para todas las series elaboradas se verificaron las hipótesis estadísticas básicas (presencia de datos atípicos, independencia, estacionalidad y homogeneidad) requerida a una muestra para que tengan validez el análisis de estadística inferencial.

Se realizaron ajustes de 6 funciones de distribución de probabilidad para estimar los valores de máxima lamina de lluvia para los siguientes periodos de retorno, $T= 2, 5, 10, 20, 25, 50$ y 100 años, como así también los intervalos de confianza asociados a cada predicción. Se seleccionó la función de distribución Log Normal como óptima para este estudio y se cuantificó las diferencias relativas en la predicción debido a esta hipótesis. Los valores de lámina de lluvia diaria predichos se regionalizaron para la región de estudio mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00), el cual permite generar mapas digitalizados con una resolución espacial de 25 km^2 . Finalmente se evaluó los efectos de considerar valores de lluvia máxima diaria de distintos periodos de retorno predichos para las provincias limítrofes que cuentan con esa información (Santiago del Estero y Catamarca) como condiciones de borde durante la elaboración de los mapas digitalizados.

Palabras clave:

Lluvias Máximas Diarias, Sistemas de Información Geográfica, Provincias de Salta y Jujuy

INTRODUCCIÓN

El diseño hidrológico se define como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo. El diseño hidrológico se puede utilizar para mitigar amenazas hidrológicas proyectando medidas “estructurales”, tal es el caso de una represa para el control de crecientes, sistemas de control de excedentes pluviales en obras viales, entre otras, o bien, desarrollando medidas “no estructurales” como ser la determinación de áreas de riesgo, entre otros.

La escala de diseño hidrológico es el rango en magnitud de la variable de diseño dentro del cual se debe seleccionar un valor para determinar el flujo de entrada al sistema. Los factores determinantes en la selección de este valor para una obra civil, son el costo y la seguridad asociada. Sobredimensionar las obras es antieconómico, mientras que sub-dimensionar las mismas pueden ocasionar fallas con resultados catastróficos. La magnitud óptima para el diseño es aquella que equilibra criterios de costo y seguridad.

Generalmente al diseño hidrológico se lo utiliza para la estimación de la Creciente de Proyecto. Sin embargo la estimación de los caudales escurridos en la crecienta de proyecto está afectada por la insuficiencia estadística de los registros históricos de caudales, lo cual lleva a evaluar indirectamente estos caudales mediante el uso de modelos de transformación lluvia – caudal (P-Q), los cuales son alimentados por eventos hipotéticos críticos (lluvias de diseño). Si bien tienen otros componentes, estas lluvias de diseño parten de un vínculo esencial entre los rasgos característicos de la precipitación: la función intensidad-duración-Recurrencia (i-d-T). Las relaciones i-d-T y el patrón de distribución temporal de las lluvias, requeridos para estimar Crecientes de Proyecto, solo se pueden extraer de extensos registros de alta frecuencia, normalmente fajas pluviográficas. Aun reemplazando caudal por intensidad de lluvia se continúa teniendo un problema, ya que las series pluviográficas largas también son escasas, aunque menos que las hidrométricas. En cambio, es habitual otro dato de lluvia provisto por pluviómetros: la lámina de lluvia diaria. De esta manera, los técnicos y proyectistas pueden proceder a la estimación mediante un análisis de estadística inferencial de las láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes periodos de retorno, a partir de las series de datos pluviométricos registrados en diversos puntos de la cuenca.

En este trabajo lo que se hizo fue estimar la lámina de lluvia máxima diaria asociada a diferentes periodos de retorno en la provincias de Salta y Jujuy. A partir de ella, puede calcularse la lámina máxima asociada a una duración diferente (utilizando un coeficiente de reducción o maximización) y a partir de ella si calcular mediante un modelo de transformación P-Q el caudal de diseño.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es la elaboración de mapas digitales de lluvias máximas diarias asociados a recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años para las provincias de Salta y Jujuy. A continuación se detalla de manera resumida la metodología empleada con la finalidad de cumplimentar el objetivo citado. El proceso se puede resumir de la siguiente manera:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones existentes en las provincias de Salta y Jujuy.
2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas preseleccionadas.
3. Determinación del año hidrológico.
4. Generación de la serie hidrológica de máximas lluvias diarias.
5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas lluvias diarias seleccionadas tales como independencia, estacionalidad y homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las series de precipitación.

6. Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
7. Análisis de estadística inferencial mediante el ajuste de distribución de probabilidad.
8. Interpolación de la información puntual, generación de grillas de análisis mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00).
9. Generación de mapas tendenciales digitales de máximas láminas de lluvia diaria de distintos periodos de retorno para las provincias de Salta y Jujuy.

A continuación se describe en detalle cada actividad:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones existentes en las provincias de Salta y Jujuy.

Se recopiló información de la lámina de lluvia diaria precipitada, la misma se obtuvo de las estaciones pluviométricas instaladas en las provincias de Salta y Jujuy. Para la obtención de datos se recurrió a diferentes fuentes como:

- Páginas web, en su mayoría pertenecientes a entidades gubernamentales, donde se encuentran datos históricos de lluvia diaria:
 - <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/sitioweb/frmFiltro.aspx>
 - <http://dev.sia.gov.ar/series>
 - <http://siga2.inta.gov.ar/en/datoshistoricos/>
 - <http://www.tutiempo.net/clima/Argentina/AR.html>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Secretaría de Recursos Hídricos.

En total se analizaron 104 estaciones pluviométricas dentro del territorio. Luego se realizó una preselección, de acuerdo a cada longitud de serie de las estaciones para continuar con el análisis. El criterio de Longitud de Serie consistió, en un principio, en fijar veinte años como longitud mínima de las series anuales de lluvias máximas diarias a analizar. Este condicionante, implica rechazar puestos pluviométricos disponibles, por lo que se adopta como criterio final la aceptación de todas las estaciones con una longitud de serie mayor o igual a catorce años. Esta longitud mínima coincide con lo definido para estudios similares realizados en otras provincias de Argentina.

La Tabla 1 y la Figura 1 permiten visualizar la cantidad de estaciones que pertenecen a cada intervalo de longitud de serie, es decir, entre uno y catorce años, mayores o igual a catorce años y mayor o igual de veinte. Así, por otra parte, existen 50 estaciones con más de catorce años de registro, conformando el 32% del total. Este porcentaje de estaciones son las que continuaron las verificaciones subsiguientes.

Tabla 1: Frecuencias de las estaciones pluviométricas en función de su longitud de serie, para la provincia de Salta y Jujuy.

Longitud de serie		
Estaciones con datos	104	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	37	36%
Longitud de serie >= 14	67	64%
Longitud de serie >= 20	51	49%

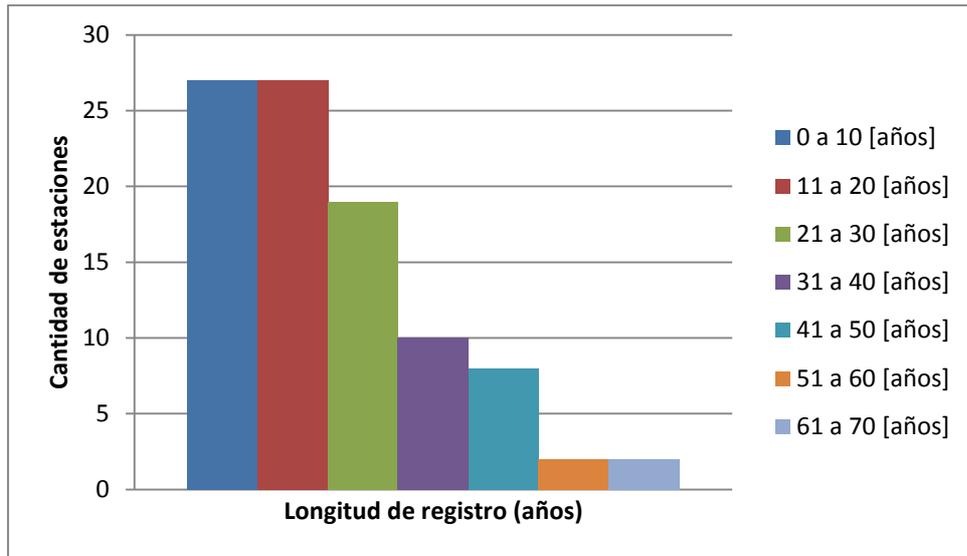


Figura 1: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas encontradas, para la provincias de Salta y Jujuy.

2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas y sus parámetros estadísticos.

En la Figura 2 puede apreciarse la disposición espacial de las mismas pre-seleccionadas. Puede observarse una mayor concentración en la zona centro este. En esta instancia del desarrollo del trabajo se incluyeron muy pocas estaciones en el sector este y oeste de Salta y Jujuy.

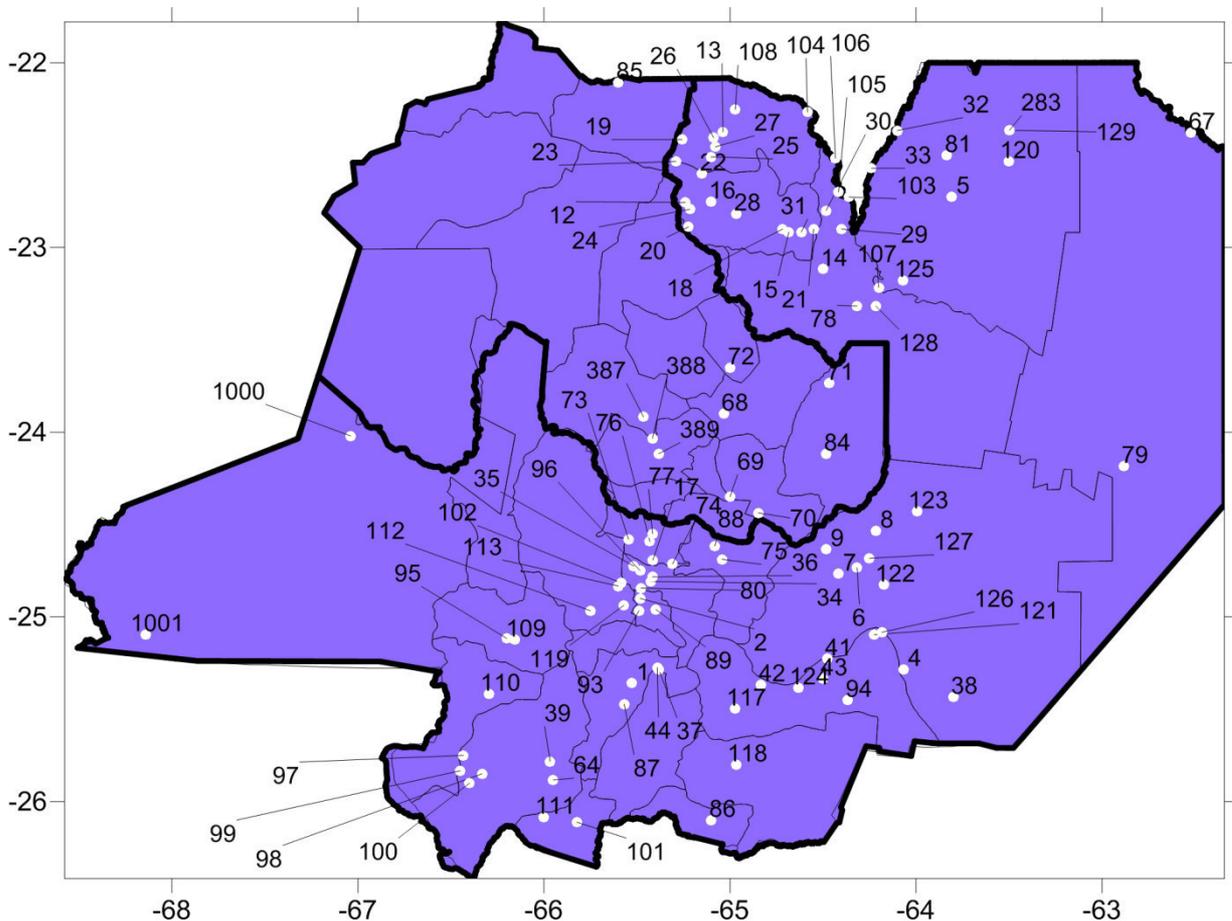


Figura 2: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas.

3. Determinación del año hidrológico para la región en estudio.

Para el análisis y procesamiento estadístico de las lluvias es recomendable dividir las series históricas en “años hidrológicos”. Este concepto, se define como el período anual que no fracciona el ciclo estacional de lluvia, pudiendo ser distinto al año calendario. Se observó, para los registros encontrados, que las máximas lluvias se daban entre los meses de Octubre a Abril, por ende, para el análisis se optó por determinar cómo año hidrológico al periodo desarrollado de Julio a Junio del año (calendario) siguiente.

4. Generación de la serie hidrológica de lámina de lluvia máximas diarias.

Luego de fijar el año hidrológico se elaboraron la serie hidrológica de máximos anuales de lámina de lluvias diarias. Se pudo determinar que los máximos de lluvia máxima diaria ocurrieron generalmente entre los meses de Octubre y Abril, inclusive. Por ello cuando no se contaba con datos en algunos de esos meses, se prescinde de ese año hidrológico, dado que en esos meses es probable que se dé la precipitación máxima anual, lo que podría ocasionar subestimaciones en los análisis estadísticos que se realizarán sobre ellas.

5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas anuales de lluvia diaria.

5.1. Detección de presencia de datos Atípicos.

Las series de máximos anuales de lluvia diaria de las 67 estaciones pluviométricas preseleccionadas que tenían una longitud de serie acorde fueron sometidas a la detección de datos atípicos. Si las series tenían un valor atípico, este se removía pero si tenía más de un valor atípico toda la serie era descartada. De las mismas, (Ver tabla 2) solo la estación El Ceibal ha evidenciado más de un valor atípico y fue descartada. Dicha eliminación solo representa el 1% de las estaciones que tenían una longitud de serie acorde.

Tabla 2: Estación pluviométrica con más de dos Datos Atípicos.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
El Ceibal	16	-64,3166	-24,7333

5.2. Prueba de Independencia.

Las 66 estaciones que verificaron la hipótesis anterior fueron sometidas a la prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz). En la Tabla 3 se muestra la estación depurada. Del total de estaciones analizadas una estación no pasó la prueba, lo cual constituye el 2% del total de estaciones que verificaron datos atípicos.

Tabla 3: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Tuc-Tuca	31	-65,2575	-22,4155

5.3. Prueba de Estacionalidad.

Las estaciones que verificaron las hipótesis anteriores fueron sometidas a la Prueba de Estacionalidad (Kendall). Las 3 estaciones que se encuentran en la Tabla 4 han rechazado esta prueba, lo cual constituye el 5% del total de estaciones que verificaron independencia.

Tabla 4: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Estacionalidad.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
---------------------------	-------------------	---------	----------

Nazareno	30	-65,1014	-22,5094
Poscaya	29	-65,0797	-22,4550
Peña Alta	21	-65,0000	-23,6500

5.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

Las 62 estaciones restantes fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad (Wilcoxon) de sus registros históricos. La estación que se muestra en la Tabla 5 no paso la prueba siendo el 2% del total de estaciones que pasaron la prueba de Estacionalidad.

Tabla 5: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Homogeneidad.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Peñas Bayas	24	-65,7500	-24,9667

Finalmente se decidió descartar la estación “129 - Jujuy Aeródromo” debido a que esta presentaba problemas en los registros de lluvia, como ser 6 datos de lluvias que superan los 350 mm, lo cual se considera un registro excesivo. Debido a esta anomalía se decidió prescindir de la estación en cuestión (Ver Tabla 6). Como hay varios datos dudosos (con registro excesivo), estos no son detectados por el test que detecta los datos atípicos. Las estaciones que verificaron las hipótesis estadísticas fueron analizadas estadísticamente y los resultados de este análisis se detallan a continuación.

Tabla 6: Estación que mostraba datos dudosos.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Jujuy Aeródromo	37	-63,4980	-22,3660

De esta manera se concluye que de las 104 estaciones pluviométricas de las cuales se partió este trabajo, 60 pasaron las pruebas representando estas el 58% del total. En la Figura 3 se puede observar la distribución espacial de las estaciones que pasaron las pruebas y se observa una vacancia de datos en la zona oeste (Puna).

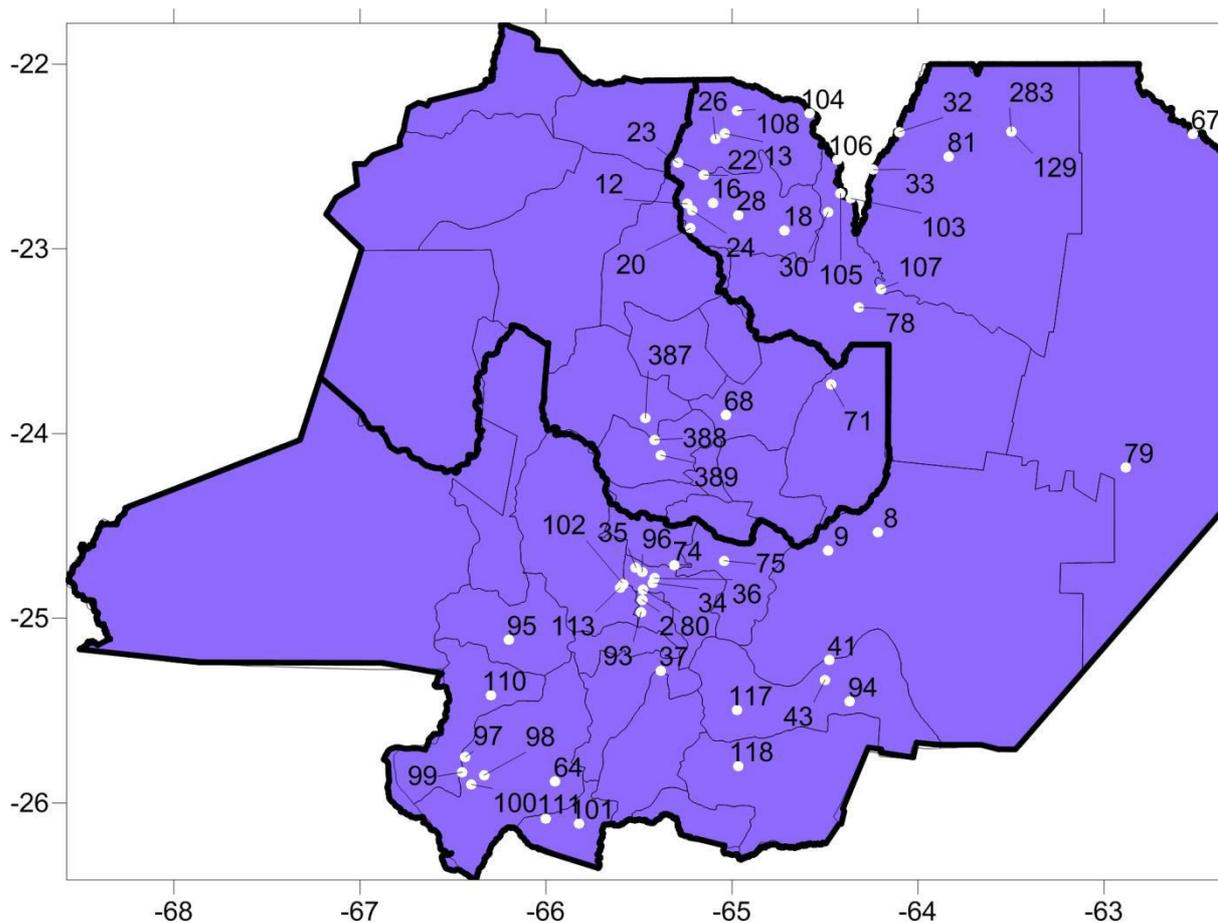


Figura 3: Estaciones finalmente seleccionadas.

6. Análisis de estadística descriptiva

En la Tabla 4 se presenta una tabla resumen con los datos estadísticos más importantes de las series anuales de máximos de lluvia diaria de las estaciones finalmente seleccionadas: Valor máximo observado en la serie, promedio aritmético y desvío estándar para las series. Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

Tabla 4: Parámetros de estadística descriptiva de las series anuales de máximos de lluvia diaria de las estaciones finalmente seleccionadas en las provincias de Salta y Jujuy.

Codigo Interno	Nombre de la estación	Máximo	Media	Desvío
2	INTA - Cerrillos	153,5	68,83	23,04
8	Dorado - San Felipe - Sombrero	167	94,63	29,15
9	Seco - San Fernando	138,4	93,41	22,59
12	San Isidro	45	30,60	7,09
13	Bermejo - Trigo Huayco	57	38,96	8,81
16	Iruya - Las Higueras	55	25,89	9,75
18	Iruya - San Jose	214	119,77	31,28
20	Iruya - Colanzuli - Salta	34,5	22,71	4,54
22	Iruya - El Molino - Salta	50	29,20	7,88
23	Iruya - El Pabellón - Salta	48	29,46	5,13
24	Iruya - Iruya - Salta	42	26,78	6,34
26	Iruya - Paltorco - Salta	70,5	35,90	11,11
28	Iruya - San Antonio - Salta	102,5	55,61	21,56
30	Pescado - Cuatro Cedros	176,5	110,84	28,41
32	Tarija - Astilleros	185	113,25	34,08
33	Tarija - San Telmo	204,3	120,42	33,80
34	Arias - Desvio	135,2	78,95	23,26
35	Arias - Filtro	144	89,75	24,57
36	Arias - Oficina	127	74,53	21,40
37	Arias - San Gabriel	123	56,85	17,80
41	Juramento - El Tunal	206,2	80,66	25,29
43	Medina - Desembocadura Pasaje	177,2	90,31	29,22
64	San Carlos	26	19,39	2,57
67	Pikomayo - La Paz	239	92,53	33,35
68	Candelaria - Arrayanal	137,7	91,23	19,94
71	San Francisco - Caimancito	174,6	96,07	29,85
74	Mojotoro - El Angosto	149	79,23	37,13
75	Mojotoro - Güemes	114	25,83	27,89
78	Orán	203,6	102,76	34,03
79	Rivadavia	116,6	67,65	19,23
80	Salta Capital	136	73,03	22,06
81	Tartagal	179	104,21	31,46
93	La Merced	140	65,66	18,92
94	Colonia Santa Rosa	155,6	87,67	24,76
95	Cachi	47	26,06	9,79
96	Las Costas- salta capital	176,9	74,65	27,94
97	PUCARA, PUCARA	45	22,34	6,40
98	PUCARA-EL ANGOSTO	43,6	19,85	8,12
99	PUCARA-GUASAMAYO	37	23,69	7,27
100	PUCARA-VALLECITO	28	18,53	4,06
101	DE LAS CONCHAS - LA PUNILLA	37	20,85	8,47
102	ARENALES-POTRERO DE DIAZ	130	80,04	14,84
103	BERMEJO - AGUAS BLANCAS	225,5	104,34	29,45
104	BERMEJO-ALARACHE	226,4	132,75	30,07
105	BERMEJO-ARRASAYAL	277,8	141,75	51,67
106	BERMEJO - BALAPUCA	250	125,72	39,67
107	Bermejo - Pozo Sarmiento	199,6	96,64	29,32
108	BERMEJO - SANTA VICTORIA OESTE	65	37,86	8,25
110	CALCHAQUI-LOS MOLINOS	56	22,74	9,14
111	CHUSCHA-SAN LUIS	278,8	95,60	31,34
113	TORO Y BLANCO-CAMPO QUIJANO	100	73,18	12,64
117	METÁN (municipalidad)	131	87,90	18,04
118	Rosario de la Frontera	125	82,27	23,71
283	Campamento Vespucio	257,3	98,13	68,54
387	Volcan	88	30,73	17,92
388	Leon	125	59,44	23,89
389	Yala	155	64,33	32,77

7. Análisis de estadística inferencial.

En primer lugar, se determinaron las probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual observado, utilizando la Ecuación de Weibull en cada estación pluviométrica.

Luego, dichos datos se ajustaron a las 6 funciones de distribución de probabilidad teóricas siguientes:

- g) GEV (Método de Máxima Verosimilitud).
- h) Gumbel (Método de Máxima Verosimilitud).
- i) Log. Normal (Método de Máxima Verosimilitud).
- j) GEV (Método de Momentos).
- k) Gumbel (Método de Momentos).
- l) Log Pearson tipo III (Método de Momentos).

Debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina (Audagna, 2014; Belli et al., 2012; Caamaño Nelli y Dasso, 2003; Catalini et al., 2010; Catalini et al., 2012; y Lencinas, 2014), es que se adopta la misma función de distribución adoptada en esos estudios: Log Normal con parámetros ajustados por el método de Máxima Verosimilitud para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales. Se analiza a continuación la máxima diferencia en porcentaje de los valores de la lámina de lluvia para 100 años de periodo de retorno asociadas a las distintas funciones de distribución con respecto a la "Log Normal". Se puede observar en la Figura 4 que la máxima diferencia de los valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la Log Normal disminuye a medida que aumenta la longitud de registro.

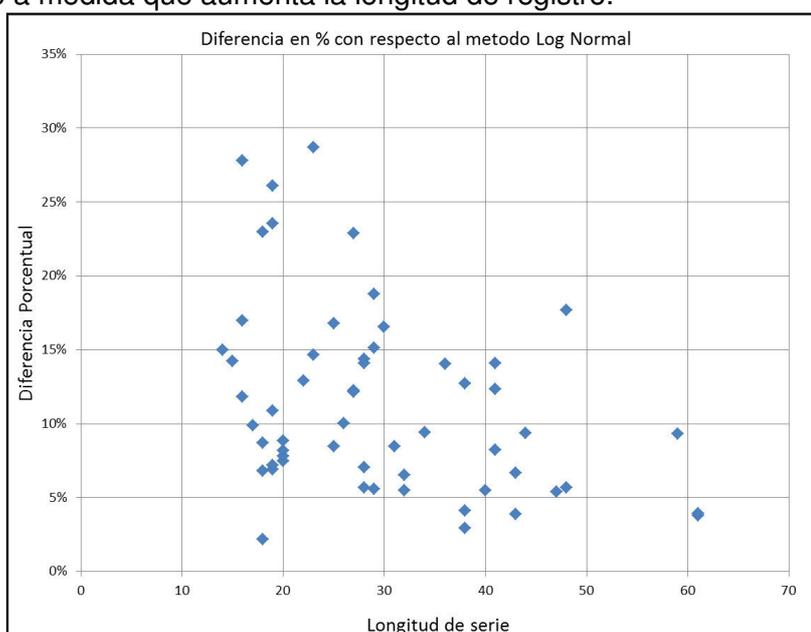


Figura 4: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y las otras funciones ensayadas a medida que aumenta la longitud de la serie, para la provincia de Salta y Jujuy.

Para analizar la importancia relativa de la selección de la función de distribución óptima se realiza un análisis para 100 años de periodo de retorno. Se elige este valor (y no los asociados a otros periodos de retorno) por ser el que más diferencia muestra en relación a los demás. En este análisis se compara la diferencia porcentual mostrada en la Figura 4 con un valor denominado "Incertidumbre del método Lognormal" representativo del tamaño de los intervalos de confianza calculado como la diferencia relativa (límite superior – valor medio) / valor medio. En la Figura 5 se puede ver el análisis realizado. Así se verifica que todas las funciones de distribución se hallan dentro del intervalo de confianza de la función Lognormal.

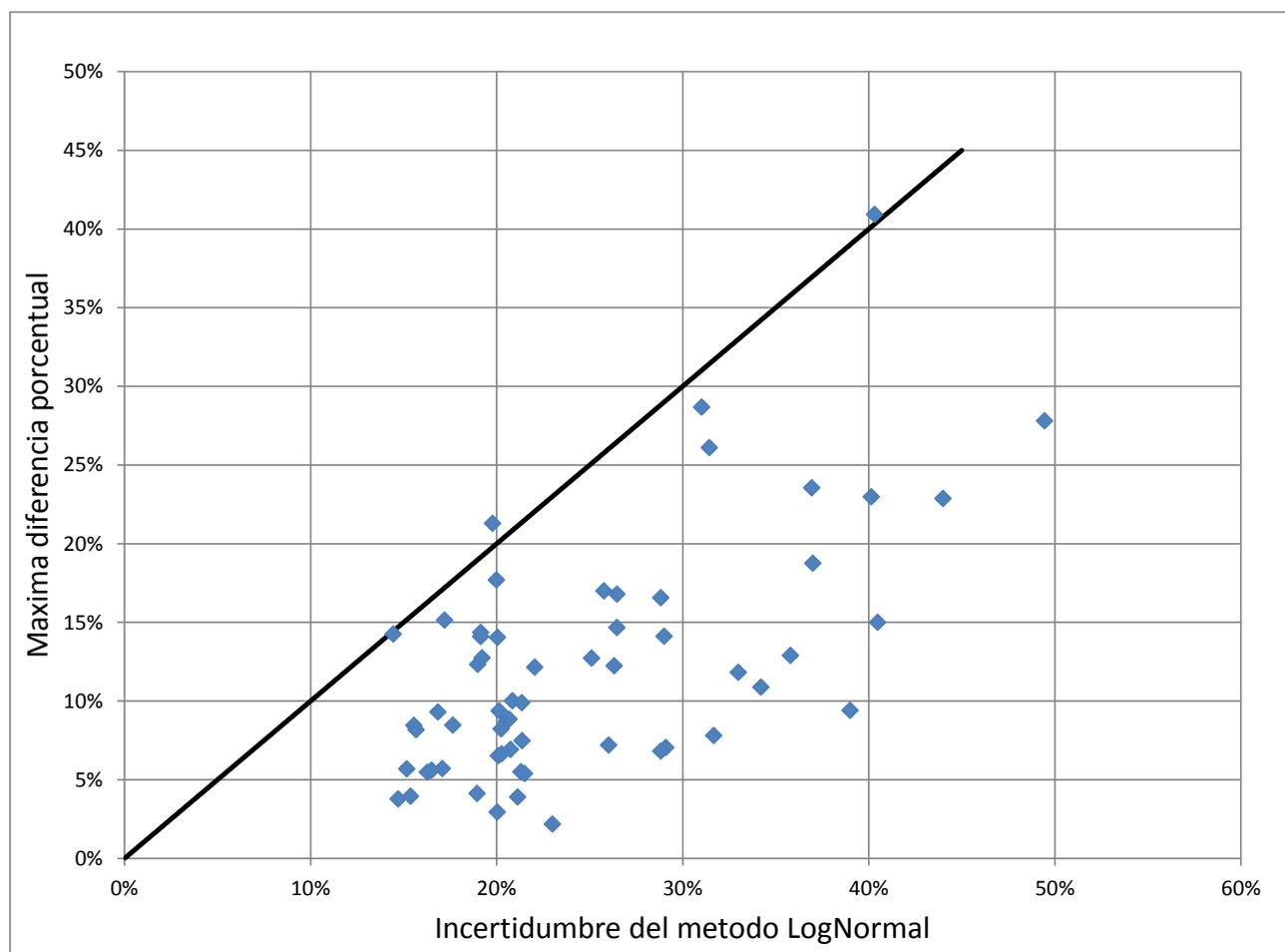


Figura 5: Contraste entre de la máxima diferencia porcentual observada entre los valores estimados con la distribución LogNormal (denominada Máxima diferencia porcentual) y la "Incertidumbre del método Lognormal" representativo del tamaño de los intervalos de confianza calculado como la diferencia relativa $(\text{límite superior} - \text{valor medio}) / \text{valor medio}$.

8. Interpolación de la información puntual utilizando SIG

Con los valores de lámina de lluvia estimados para los distintos periodos de retorno en cada una de las estaciones pluviométricas se utilizaron técnicas de análisis espacial para poder interpolar la información puntual con el objeto de generar grillas de información pluviométrica.

En este proceso se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual es definido como un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos geográficos. En la actualidad, se encuentran disponibles una gran variedad de herramientas y paquetes computacionales para asistir estas tareas. El paquete computacional elegido fue el Idrisi Selva versión 17.00, el cual permite generar un archivo vectorial o de tipo raster georreferenciado. Utilizando esta herramienta se realizó la interpolación espacial de los valores de lámina de lluvia estimados para los distintos periodos de retorno a través del método de Kriging. Específicamente este método permite generar archivos raster a partir de la totalidad de los archivos vectoriales anteriormente creados con la información de lluvia máxima diaria estimada para cada localización. La figura 6 muestra el Raster interpolado por el método Kriging para la precipitación diaria media máxima anual estimada para un período de retorno de dos años [en mm].

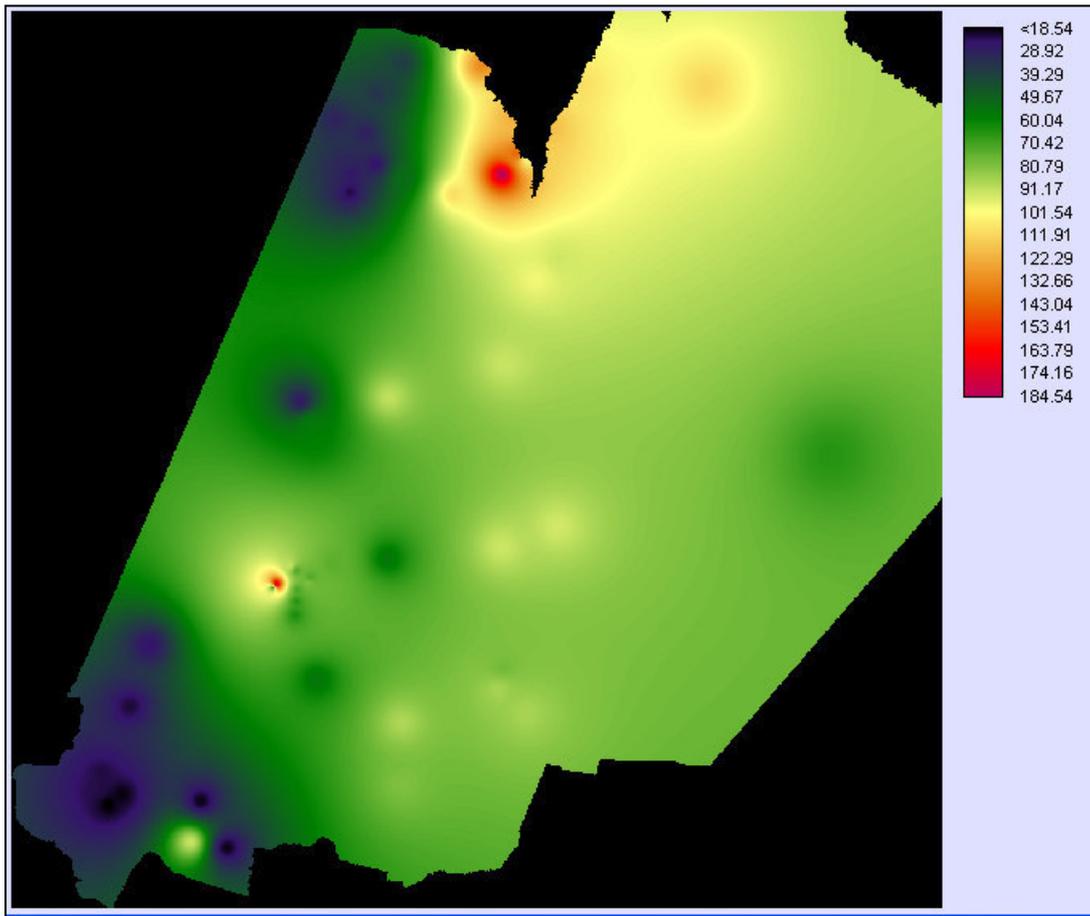


Figura 6: Raster interpolado por el método Kriging para la Precipitación media máxima estimada para un período de retorno de dos años [en mm].

9. Generación Mapas tendenciales de lluvias diarias máximas anuales para distintos periodos de retorno

En base a las interpolaciones obtenidas por el método de Kriging de los valores medios de precipitación diaria para distintas recurrencias, se generó una imagen de superficie tendencial que suaviza las variaciones locales observadas. En las Figuras 7 a 12 se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes períodos de retorno analizados.

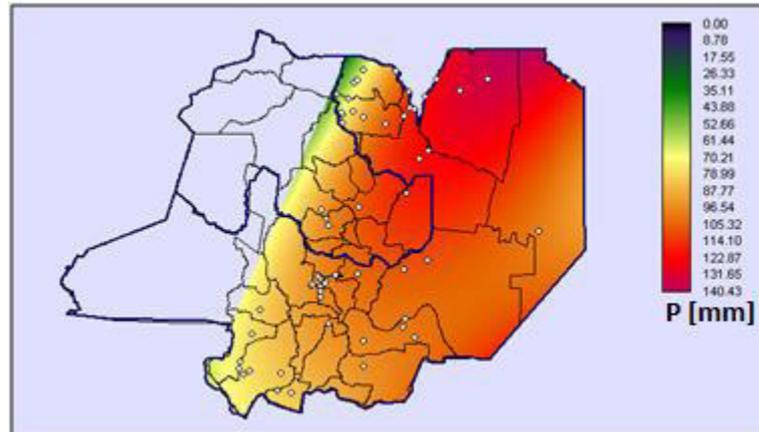


Figura 7: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 2$ años [en mm].

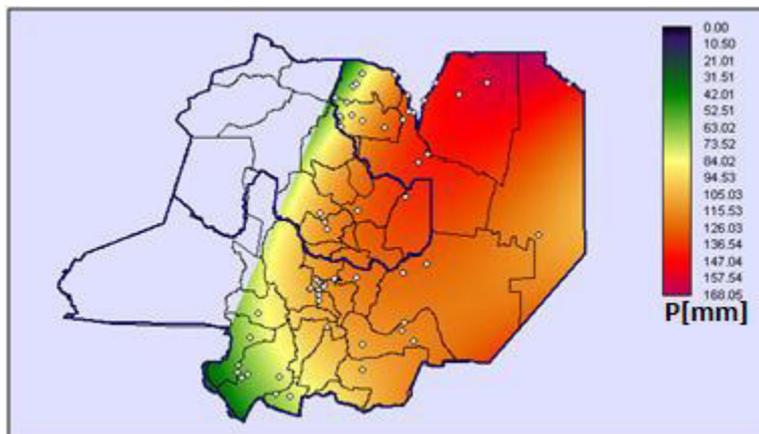


Figura 8: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 5$ años [en mm].

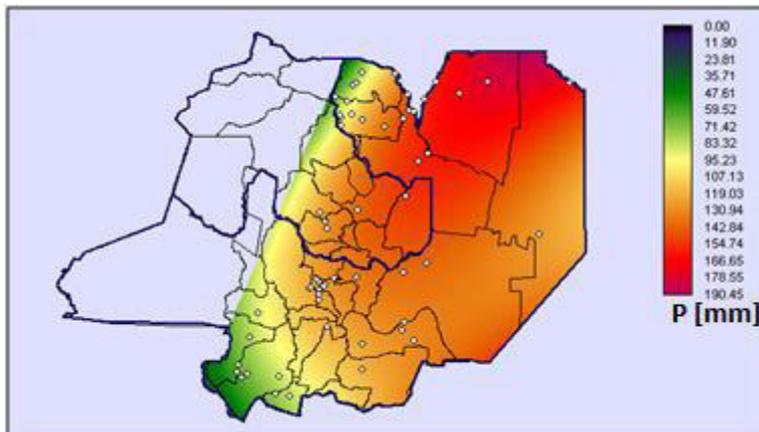


Figura 9: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 10$ años [en mm].

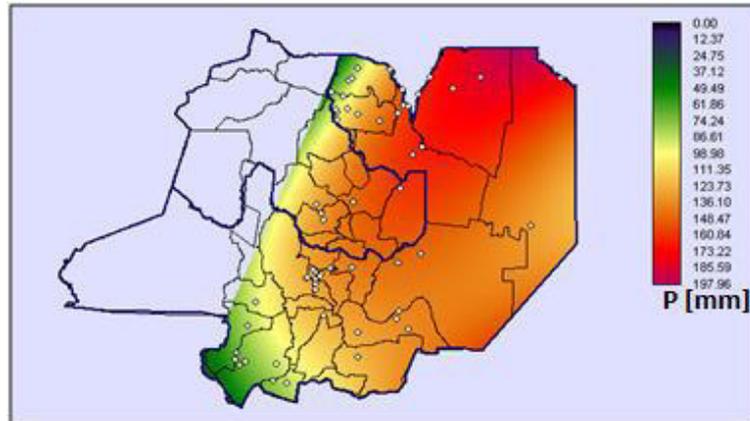


Figura 10: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=20$ años [en mm].

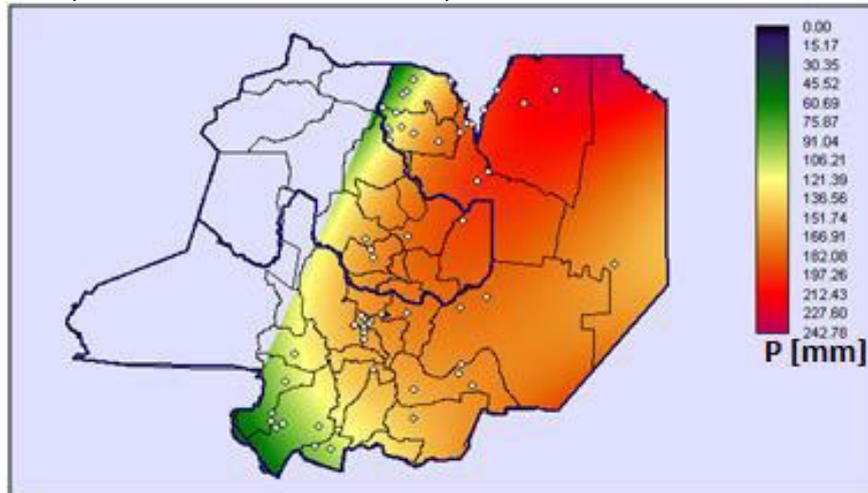


Figura 11: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=50$ años [en mm].

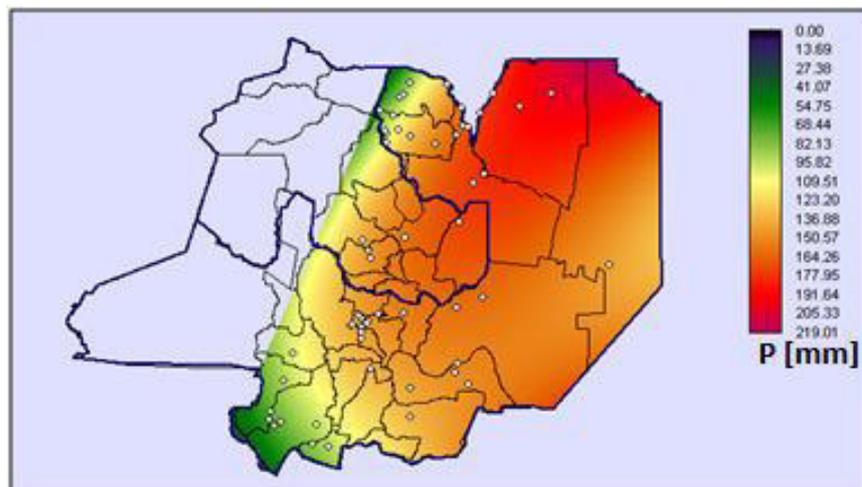


Figura 12: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=100$ años [en mm].

CONCLUSIONES

1. Se recopilaron y procesaron registros de 104 estaciones pluviométricas en la región de estudio.
2. Se ubicaron espacialmente las estaciones notando una ausencia de las mismas en la zona de la Puna.

3. La determinación del año hidrológico Julio-Junio resulto ser el más adecuado para la región de estudio.
4. Se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas, dando como resultado que los registros de 60 estaciones verificaron estas pruebas.
5. De las 6 alternativas de función de distribución de probabilidad y de método de ajuste ensayado se adoptó la función LOGNORMAL con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud como representativo y se verifico que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativo que la incertidumbre debido al modelo probabilístico utilizado.
6. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva17.00.
7. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de valores anómalos en el espacio.
8. Se crearon mapas tendenciales de isohietas de láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes períodos de retorno.

REFERENCIAS

Belli, Virginia Soledad; Cueto, César Agustín; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio (2012). "Regionalización de lluvias máximas – Aplicación a las provincias de Córdoba y Santa Fe" - Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería – Universidad Católica de Córdoba – Córdoba, Argentina.

Caamaño Nelli, Gabriel; Dasso, Clarita (2003). "Lluvias de Diseño – Conceptos, Técnicas y Experiencias".

Catalini, Carlos G.; Maidah, Andrea; García, Carlos M.; Caamaño Nelli, Gabriel (2010). "Mapas digitales de isohietas de lluvias máximas diarias para la provincia de Córdoba".

Catalini, Carlos G.; Caamaño Nelli, Gabriel E.; García Carlos M., Belli, Virginia Soledad; Bianchiotti, Bernabé; Cueto, César Agustín; Lérída, Gastón; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio; Sánchez, Ezequiel. (2012). "Regionalización Paramétrica De Funciones I-D-T. Aplicación A Las Provincias De Córdoba Y Santa Fe"

Lencinas, Matías Javier (2014). "Validación de la tormenta de diseño para la Presa Los Molinos - Jujuy - utilizando técnicas de regionalización" - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.

ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS MÁXIMOS DE PRECIPITACIÓN: CASO OBSERVATORIO CENTRAL BUENOS AIRES.

Lorena Ferreira y Karina Flores

Servicio Meteorológico Nacional - Departamento de Hidrometeorología 25 de Mayo 658, Buenos Aires,
Argentina
(011) 5167-6767 kflores@smn.gov.ar

RESUMEN

En el último tiempo han ocurrido en Argentina eventos meteorológicos de gran envergadura en los cuales se han registrado precipitaciones cuyos valores han superado las mediciones existentes de los últimos años. Estos registros fueron relevantes no sólo en los valores diarios sino también en la intensidad en la que estos ocurrieron. La gran variabilidad de la frecuencia e intensidad de la precipitación registrada ha generado una gran necesidad de un mayor conocimiento de la misma. Un conocimiento que abarca no sólo entender los patrones meteorológicos que la generaron sino también su impacto en la superficie terrestre.

En este trabajo se determinan los máximos de precipitación para el cálculo de curvas de intensidad, duración y frecuencia, y se efectúa un análisis preliminar de la tendencia de los máximos de precipitación de distinta duración. Por último, y tratando de buscar herramientas alternativa ante la falta de información, se emplean datos no convencionales (estimaciones de precipitación satelitales) para el análisis de los máximos de precipitación. Si bien se está trabajando con toda la información disponible tanto de la red pluviométrica como de la pluviográfica del Servicio Meteorológico Nacional en este estudio se muestran los resultados de la estación Observatorio Central Buenos Aires.

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista hidrológico, la caracterización de una determinada región de acuerdo al comportamiento de las lluvias extremas es fundamental para el correcto manejo y gestión de los recursos hídricos disponibles.

Variadas son las investigaciones que muestran el comportamiento (variabilidad y tendencias tanto de la componente media como de los extremos) de la precipitación en escalas que van desde la diaria hasta escalas mayores como la decádica, mensual, intra-estacional, estacional, etc. Pocos son los trabajos que muestran como es la precipitación en escalas menores a la diaria. Por un lado, por la falta de información de calidad de precipitación en alta resolución temporal y espacial, y por el otro por desconocimiento de la precipitación en sí. Desde el punto de vista meteorológico conocer como es la variabilidad de la precipitación en alta resolución es un tema de interés que ha cobrado gran interés en los últimos años. Sobre todo dado a la ocurrencia de eventos extremos.

Profundizar temas sobre los máximos de precipitación, el ciclo diurno, la existencia de tendencias o no de extremos de precipitación permitirá conocer mejor el clima de nuestra región, mejorar los modelos de predicción. Avanzar en el plano de la meteorología.

Por otro lado, desde el punto de vista hidráulico resulta imprescindible cuantificar el tipo de tormenta que la obra de infraestructura deberá soportar y el correspondiente riesgo asociado. La información necesaria (los parámetros) incluye nivel de agua caída, la distribución temporal del evento hidrometeorológico y, la intensidad, duración y frecuencia de la tormenta (curvas IDF). Contar con series temporales de precipitación de longitud adecuada, representativas de la región y de calidad es uno de los aspectos cruciales a la hora de obtener los parámetros mencionados previamente. Esta información no es sencilla de obtener y pocos son los organismos que la poseen. Entre ellos podemos mencionar al Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Actualmente el SMN cuenta con una red de aproximadamente 36 pluviógrafos activos y, si bien cuentan con extensos registros dado que son estaciones de muchos años de antigüedad, es una limitante la distribución espacial de las mismas, quedando importantes regiones del país sin cobertura de datos pluviográficos. Una posible alternativa para subsanar esta falta de información, es la utilización de datos satelitales para la estimación de la precipitación en un punto determinado. Los satélites de órbita polar han incorporado la presencia de sensores de microondas que han mejorado la calidad de las distintas estimaciones de precipitación respecto de la información que utilizan los satélites geoestacionarios. Los productos de precipitación que resultan ser los de mejor rendimiento son los que derivan de una combinación de observaciones infrarrojas (mayor frecuencia temporal) y observaciones de microondas (alta calidad) (Ebert y otros 2007).

En este trabajo se determinan los máximos de precipitación para el cálculo de curvas de intensidad, duración y frecuencia, y se efectúa un análisis preliminar de la tendencia de los máximos de precipitación de distinta duración. Por último, y tratando de buscar herramientas alternativas ante la falta de información, se emplean datos no convencionales (estimaciones de precipitación por satélite) para el análisis de los máximos de precipitación. Si bien se está trabajando con toda la información disponible tanto de la red pluviométrica como de la pluviográfica del Servicio Meteorológico Nacional, en este estudio se muestran los resultados de la estación Observatorio Central Buenos Aires.

DATOS

Información pluviográfica

Para la elaboración de este trabajo se utilizaron datos provenientes del pluviógrafo tipo Casella con fajas PG-99 de la estación meteorológica Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA). Las fajas se colocan a las 12 UTC (9 Horas Local, según indicación de la Organización Meteorológica Mundial) y se retiran a las 12 UTC del siguiente día. El registro analizado comprende los años 1961 a 2013.

Al iniciar el trabajo se contaba con gran parte del registro de fajas digitalizado hasta el año 1998. Sin embargo, la digitalización estaba hecha con distintos métodos, había datos faltantes y no había certeza de la magnitud de los errores en la digitalización. Por lo tanto fue necesario, previo al análisis, hacer una consistencia y control de calidad de la base de datos pluviográficos. Se tomó cada faja del registro y se comparó su acumulado con el dato pluviométrico registrado en la misma estación. Si la faja ya estaba digitalizada, se constató que los máximos calculados en la base de datos sean consistentes con el trazo del registro de la faja.

Se volvieron a digitalizar los datos erróneos, y se completó el registro hasta el año 2013.

Se eliminaron aquellas fajas cuyos registros presentaban deficiencias en el trazo o la digitalización no lograba representar adecuadamente al evento de lluvia.

Desde el inicio del registro hasta el año 1998 la metodología de digitalización de los datos era por faja pluviográfica, sin discriminar la cantidad de eventos ocurridos en cada fecha pluviométrica. Mediante este método se obtienen los máximos de precipitación en todas las duraciones desde 5 min hasta 24 hs, sin importar la duración del evento.

A partir del año 1999 se modificó la metodología, la digitalización se realizó mediante un software desarrollado en el Servicio Meteorológico Nacional, que permite la obtención de los máximos de intensidad diarios en 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 40 min, 50 min, 60 minutos, 90 min, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 6 horas, 12 horas y 24 horas por eventos de lluvia. La separación entre eventos se define como un período superior a 1 hora en el que la cantidad de precipitación es inferior a 1 mm. Es decir, aquellos períodos en los que la intensidad de la precipitación es inferior a 1 mm/h se toman como límite de dos eventos de lluvia diferentes. Mediante este método los máximos que se obtienen van desde 5 min hasta la duración del evento.

Para unificar ambas metodologías dos opciones fueron consideradas. La primera opción consiste en truncar los máximos de la primera metodología hasta la duración del evento, es decir si el evento duró 3 horas, no se computan los máximos superiores. La segunda opción es extender los máximos de la primera metodología hasta la duración de 24 horas, es decir si el evento duró 3 horas y su máximo en 3 horas fue de 50 mm, los máximos siguientes hasta 24 horas se llenaron con el valor de 50 mm.

Las diferencias que aparecen entre ambas opciones al calcular los máximos anuales son despreciables, y se observan mayormente en las duraciones superiores a 6 horas.

En este trabajo se realizaron todos los cálculos aplicando la primera opción, truncando los máximos a la duración del evento. Por este motivo la duración de 12 horas tiene años sin datos, lo que significa que ese año no se registró ningún evento de 12 horas. En todo el registro no hubo ningún evento de 24 horas de duración, esta duración corresponde al acumulado del evento.

Una vez consistida la base de datos pluviográficos de máximos de precipitación, se computaron los máximos anuales, eliminándose los años incompletos, estos son 1965/1966, 1966/1967, 1967/1968, 1981/1982 y 1982/1983 los cuales no registraron eventos extremos importantes.

Por otro lado, también se emplea los máximos anuales de precipitación en 24 horas provenientes del pluviómetro de la estación OCBA. El error porcentual estimado entre la serie completa de pluviografía y la de pluviometría es de aproximadamente un 10%.

Información de Estimaciones de precipitación por satélite.

En este análisis preliminar se emplean el producto de estimación de precipitación por satélite Tropical Rainfall Monitoring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis (conocido como 3B42; Huffman y otros 2013) en su versión 7. Estos datos, poseen una resolución espacial de 0.25° de latitud-longitud y una resolución temporal de 3 horas. La serie empleada corresponde del 1 marzo de 1998 a 1 marzo de 2014. Se consideró este intervalo temporal, ya que es el momento en que se inicia la disponibilidad de datos. El algoritmo de 3B42 realiza una comparación entre los campos de IR y los campos de microondas modificando el campo de precipitación acumulado. Considera datos mensuales de precipitación observados a fin de obtener curvas de calibración, y a través de la técnica de "histogram matching" recalcula los datos acumulados cada 3 horas de las estaciones en superficie obteniendo tasas de precipitación instantánea. Sobre la verificación y performance de este producto en nuestra región puede encontrarse en Houbouchian y otros (2012).

Dado que los datos de 3B42V7 están en un reticulado regular se emplea el conjunto de datos más cercano a la estación OCBA.

Una consideración importante a tener en cuenta es que el producto de precipitación es obtenido en horas fijas: 0-3hs, 3-6hs, 6-9hs, 9-12hs, 12-15hs, 15-18hs, 18-21hs y 21-24hs. Por lo tanto, esto puede afectar la selección de los máximos del evento.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Análisis descriptivo y tendencia de Máximos de precipitaciones.

Se muestra en la tabla 1 un análisis descriptivo de la serie de máximos diarios de intensidad de precipitación de la estación OCBA que incluye los valores medios de la serie de datos en su registro completo 1961-2012, su desvío estándar y el máximo absoluto para cada duración, así como la cantidad de datos contemplada. También se efectuó el análisis descriptivo para la primera década del registro y para la última.

Tabla 1. Descripción estadística de la serie de datos. Media, Desvío estándar (Desv.) y Máximo absoluto (Máx.) en mm. N es la cantidad de datos.

	Primer Década (1961-1970)				Última Década (2003-2012)				Registro Completo (1961-2012)			
	Media	Desv.	N	Máx.	Media	Desv.	N	Máx.	Media	Desv.	N	Máx.
10 min	3,05	3,88	552	28,9	3,17	3,99	797	30	2,89	3,68	3899	30
15 min	3,61	4,46	546	39	3,97	5,00	788	34,2	3,58	4,50	3847	39
20 min	4,12	5,10	536	46,5	4,69	5,96	771	44,2	4,17	5,26	3775	46,5
30 min	4,94	6,02	527	56,1	5,82	7,18	726	53,7	5,14	6,39	3637	56,9

De la tabla se desprende que en la primera década los valores máximos son mayores para las duraciones menores a 50 minutos. Esta situación se invierte para las duraciones mayores a 50 minutos. En la segunda década la dispersión de los datos es mayor. Cabe señalar que por la

metodología empleada encontramos menor cantidad de eventos para las duraciones mayores a 90 minutos.

El análisis estacional de la serie indica que el año hidrológico para Buenos Aires comienza en julio y finaliza en junio, es decir el mínimo de precipitación anual se registra en julio, mientras que el máximo se da en octubre-marzo. Por este motivo se realizó el análisis considerando los años hidrológicos. O sea, cuando se menciona el año 1961/1962, se refiere al período comprendido entre julio 1961 hasta junio de 1962. No se tienen en cuenta los años hidrológicos 1965/1966, 1966/1967, 1967/1968, 1981/1982, 1982/1983 ya que no se dispone del registro completo. Esos años no registraron eventos extremos importantes, por lo que la información perdida no afectaría al cálculo de los máximos anuales. De esta manera se obtienen 46 datos (uno por cada año) para cada una de las 15 duraciones, además se calcularon los máximos anuales de la serie pluviométrica.

En una primera instancia se efectuó un análisis de tendencia de la serie de máximos anuales de distinta duración. Se consideró separadamente la serie total (registro completo, desde 1961 hasta 2012), los primeros 30 años (1961-1990), los últimos 30 años (1983-2012) y todas las décadas incluidas en el período completo. Las décadas fueron consideradas móviles, por ejemplo, la primera década es 1961-1970, la segunda es 1962-1971, la tercera es 1963-1972, y así hasta llegar a la última década 2003-2012. Estos rangos espaciales ya fueron empleados en otros trabajos como Penalba y Vargas (2004), Skansi y otros (2012), entre otros.

Se analizó la tendencia de cada serie de duración desde 5 minutos hasta 24 hs, utilizando el test no paramétrico de Mann-Kendal (Mann, 1945). También se compararon los resultados testeando el coeficiente R2, y para aquellos períodos con pocos años, por ejemplo para el análisis decádico, se utilizó un test de t-student para evaluar la significancia de la tendencia (Wilks, 1995). Se tomó 95% como nivel de significancia de todos los tests.

Los resultados muestran que para la serie total (1961-2012) las duraciones de entre 10 y 120 minutos, se observa una tendencia positiva. El resto de las duraciones (5, 10 minutos y las mayores 180minutos), incluyendo la serie pluviométrica, no mostraron una tendencia significativa.

Con respecto a los primeros 30 años del registro (1961-1990) así como los últimos 30 años (1983-2012), no presentan una tendencia lineal significativa en ninguna de las duraciones analizadas.

Con respecto al análisis decádico, la tabla 2 muestra los resultados para el análisis de cada década de las series en las duraciones indicadas.

Tabla 2. Resultados del análisis de la tendencia de los máximos pluviográficos en las duraciones indicadas y para los datos pluviométricos para todas las décadas comprendidas entre 1961-2012.

Duraciones analizadas	Análisis de tendencia decádica
30 min	Tendencia significativa positiva: década 1993/2002. Tendencia significativa negativa: década 1999/2008
60 min	Tendencia significativa negativa: década 1999-2008
90 min	Tendencia significativa negativa: década 1999-2008
120 min	Ninguna década presenta tendencia significativa
360 min	Series con tendencia positiva significativa: 1990-1999, 1991-2000, 1994-2003. Tendencia significativa negativa: década 1999-2008
24 hs	Tendencia positiva significativa: 1991-2000, 1992-2001, 1993-2002, 1994-2003. Tendencia negativa significativa: 1998-2007, 1999-2008, 2000-2009, 2001-2010, 2002-2011.
Serie pluviométrica	Tendencia positiva significativa: 1964-1973*, 1965-1974*, 1992-2001, 1993-2002, 1994-2003. Tendencia negativa significativa: 1986-1995, 1987-1996, 1988-1997, 1998-2007, 1999-2008, 2000-2009, 2001-2010.

*décadas no analizadas en la serie pluviográfica porque tienen años faltantes

Se observa que la década 1999/2008 presenta para casi todas las duraciones analizadas tendencia significativa negativa, es decir que se puede inferir que el valor de precipitación máxima ha disminuido en el transcurso de esta década.

Para la década que empieza en el año 1994 se encontró tendencia significativa positiva para las duraciones de 360 minutos, 24 horas y para la serie pluviométrica, en estas dos últimas también

se encontró que las décadas que empiezan en 1992 y 1993 con la misma tendencia. Estos resultados están de acuerdo con los encontrados por Re y otros (2009).

La comparación del dato pluviográfico de 24 horas con la pluviometría arroja resultados similares. Puede observarse que las tendencias de máximos de precipitación en las décadas que inician en los años 90 son positivas y significativas, mientras que las décadas que inician del 2000 en adelante las tendencias son significativas pero negativas.

Motivados por el trabajo de Re y otros (2009), se realizó un análisis de tendencia en dos períodos de 20 años cada uno, que son 1961-1981 y 1983-2002, y para la duración de 24 horas, 360 minutos y 60 minutos. A partir de la serie empleada en este trabajo no se encontraron tendencias significativas en la intensidad de los máximos.

Estimación de curvas IDF

Para predecir la magnitud de eventos extremos a futuro, se utilizan comúnmente las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Estas curvas se construyen asumiendo que la serie de datos utilizada es estacionaria, es decir que sus valores medidos a lo largo del tiempo no presentan aumentos o disminuciones significativas.

En la sección anterior se estudió la variabilidad de la serie analizando su tendencia en todas las duraciones. Se concluyó que, excepto en la duración de 60 minutos, la serie empleada 1961-2012 no presenta tendencia significativa, es decir se puede asumir con un 95% de confianza que la serie es estacionaria. Con respecto a la serie de máximos del período 1961-2012 con tendencia positiva en las duraciones indicadas en la sección anterior se les aplicó una transformación para volverlas estacionarias.

Ajuste Gumbel

La serie de datos muestra un ajuste aceptable a la distribución Gumbel (95% de confianza). Se computaron las curvas IDF mediante esta distribución y se muestran los resultados en la tabla 3 para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

Tabla 3. Valores de intensidades máximas en mm/h para cada tiempo de retorno y cada duración indicada en minutos.

	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min	360 min	720 min	1440 min
2 años	96,58	79,66	70,39	54,54	48,99	42,75	37,40	27,55	21,90	17,61	14,25	10,01	5,48	3,28
5 años	128,30	106,40	94,78	74,62	66,32	57,90	51,31	39,24	31,32	24,83	19,89	13,57	7,79	4,40
10 años	149,31	124,11	110,92	87,92	77,79	67,92	60,52	46,98	37,55	29,61	23,61	15,92	9,33	5,15
20 años	169,45	141,09	126,41	100,67	88,80	77,54	69,36	54,41	43,54	34,20	27,19	18,18	10,79	5,87
50 años	195,53	163,08	146,46	117,18	103,04	89,99	80,79	64,02	51,28	40,14	31,82	21,10	12,70	6,79
100 años	215,07	179,55	161,49	129,55	113,71	99,32	89,37	71,22	57,08	44,58	35,29	23,29	14,12	7,49

Se obtienen así las curvas IDF para la estación OCBA aplicando el ajuste de Gumbel mostradas en la figura 1.

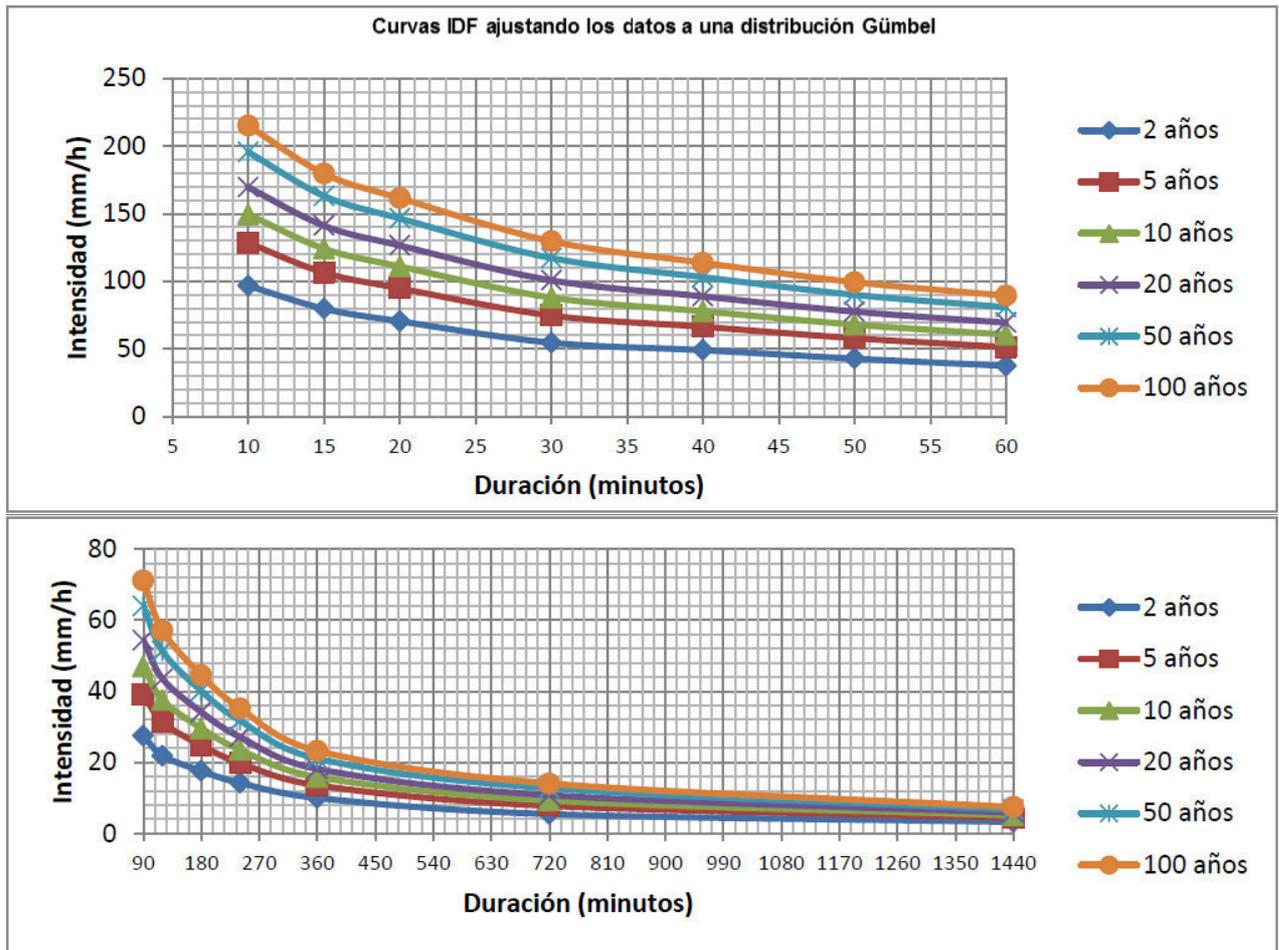


Figura 1. Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia para OCBA usando el ajuste de Gumbel.

Ajuste Log-Normal

En esta sección se computaron las curvas IDF con otro método. La metodología empleada es la aplicada por Caamaño Nelli y García (1999), con un modelo simplificado de 3 parámetros ajustando los datos a una distribución log-normal. La calibración del modelo a los datos utilizados arroja los siguientes parámetros óptimos: $A=0.39$, $B=0.14$ y $C=5.11$. Estos valores se hallan dentro del rango encontrado en la bibliografía citada para la estación OCBA, aunque son levemente superiores. En la figura 2 se muestran las curvas IDF obtenidas mediante este modelo para algunas duraciones y tiempos de retorno.

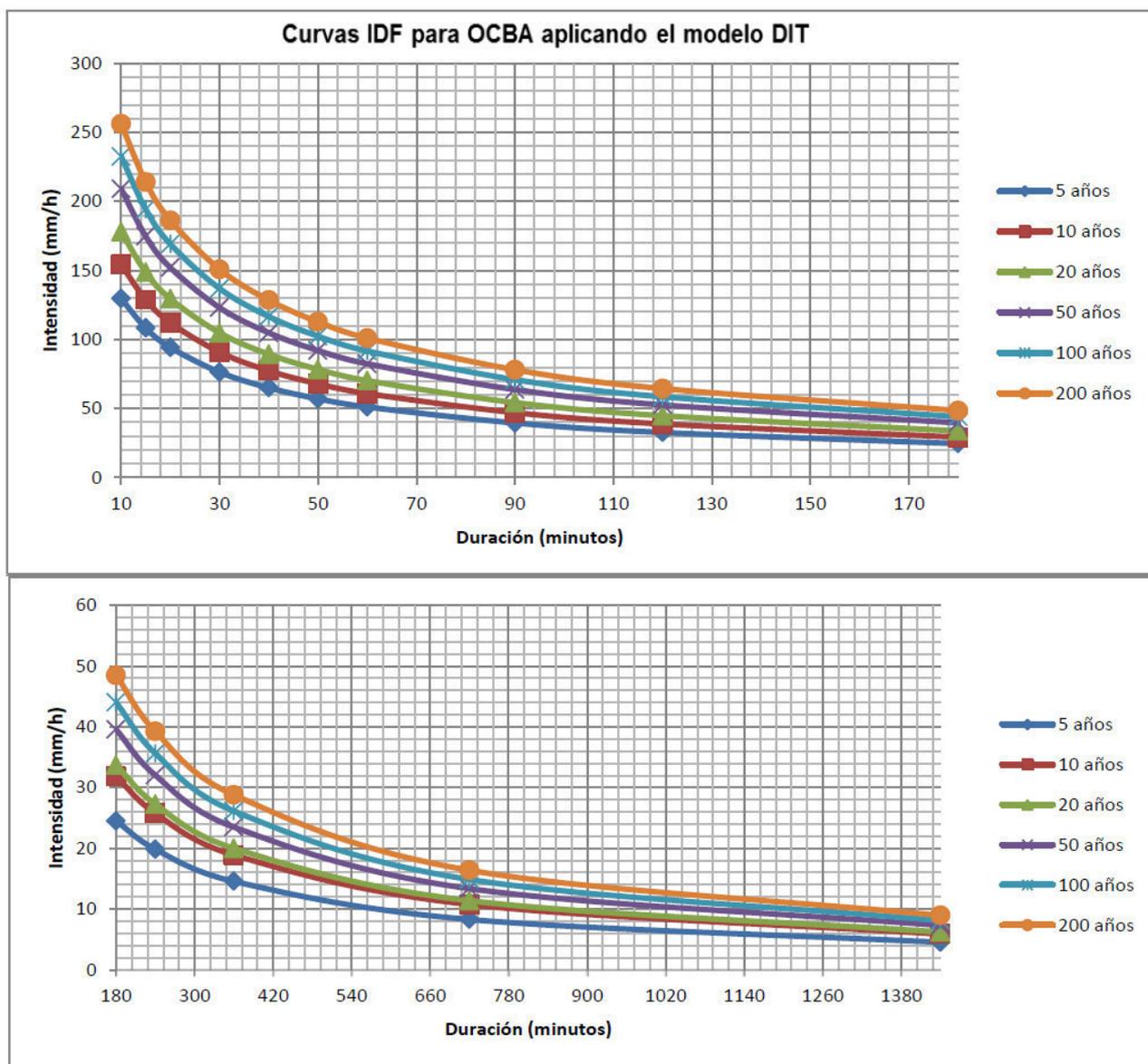


Figura 2. Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia para OCBA usando el modelo DIT.

Se observan diferencias en comparación con la aplicación del modelo Gumbel. En primer lugar los valores obtenidos usando este modelo son en su mayoría inferiores a los de la figura 1. Las diferencias porcentuales no superan el 10% en algunos casos.

Se encuentran diferencias con los valores obtenidos por Caamaño y otros (2011). En líneas generales los valores encontrados en este trabajo son mayores. Esto podría estar explicado con la mayor extensión de la serie empleada. En este trabajo la serie es de 47 años en tanto que la de los autores emplearon 38 años.

Ajuste Gumbel con Datos Satelitales

En esta sección se muestran los resultados de las curvas IDF usando los máximos anuales de las estimaciones de precipitación satelital TRMM-3B42V7 en los puntos de retículo más cercanos a la estación OCBA. El análisis de la tendencia arrojó que la serie es estacionaria para los 4 puntos de retícula utilizados y para todas las duraciones. Los datos ajustan a una función Gumbel con un 95% de confianza.

La tabla 4 muestra las intensidades de precipitación en mm por hora para eventos de duración de 3, 6 y 12 horas, y períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Entre paréntesis se detalla las diferencias porcentuales entre la metodología con datos satelitales y con datos pluviográficos.

Tabla 4. Resultados del cálculo de las intensidades máximas usando datos de estimación satelital TRMM-3B42V7, los valores están en mm/h. Entre paréntesis se indican la diferencia entre estos valores y los encontrados usando los datos pluviográficos.

TRMM (mm/h)	180min	360 min	720min
2 años	21,31 (21%)	13,47 (34,6%)	12,15 (121%)
5 años	26,35 (6,1%)	16,89 (24,5%)	14,89 (91%)
10 años	29,70 (0,3%)	19,16 (20,3%)	16,70 (79,1%)
20 años	32,90 (-3,8%)	21,33 (17,4%)	18,44 (70,8%)
50 años	37,05 (-7,7%)	24,14 (14,4%)	20,69 (62,9%)
100 años	40,15 (-9,9%)	26,25 (12,7%)	22,38 (58,4%)

En el análisis se observó que las fechas de los máximos obtenidas por las estimaciones satelitales rara vez coinciden con las fechas máximas obtenidas de los datos pluviográficos. Se observa que los datos satelitales sobreestiman los valores de precipitación medidos convencionalmente, esto ya fue analizado por Hobouchian y otros (2012) para precipitaciones acumuladas en 24hs.

Puede observarse que al calcular las curvas IDF utilizando los datos satelitales para las duraciones de 6 y 12 horas se obtienen intensidades siempre mayores a las obtenidas con el uso de datos pluviográficos. En cambio para la duración de 3 horas las diferencias dependen del período de retorno. Siendo que para períodos de retornos menores a 10 años las intensidades son sobreestimadas y en períodos de retorno mayores a 20 años se subestiman las intensidades máximas.

También se observa que para la duración de 12 horas los errores obtenidos son importantes, superando el 50% de error porcentual y llegando a superar el 100% para la recurrencia de 2 años.

Cabe mencionar que los registros utilizados para las estimaciones satelitales abarcan el período 1998-2013 mientras que los datos pluviográficos tienen un registro de 1961-2013. Además, como ya se mencionó antes, los datos satelitales registran la precipitación cada bloques trihorarios (de 0 hs a 3 hs, de 3 hs a 6 hs, etc) de esta forma para un evento que abarque varios bloques pueden quedar acotados sus máximos.

Se repitió el análisis para otros puntos de grilla también cercanos a la estación OCBA. Los resultados fueron similares. En líneas generales, las diferencias con los datos pluviográficos son mayores y positivas para la duración de 12 horas, y menores y negativas para las duraciones de 3 horas y períodos de retorno entre 5 y 100 años (resultados no mostrados).

CONCLUSIONES

Obtener una base de datos pluviográficos en alta resolución que sea confiable y fidedigna es un desafío ambicioso para todos aquellos que de alguna u otra manera requieren este tipo de información. Desde la toma de datos, su consistencia, el proceso de la información y la obtención de resultados es un proceso que requiere constantes cuestionamientos de la información obtenida y la metodología aplicada para su procesamiento. Aquí se realizó un análisis exhaustivo de la serie, minimizando los errores que cada dato pudiera tener, ya sea por defectos en las fajas o errores introducidos en la digitalización. Obteniéndose los máximos anuales de intensidades de precipitación para 15 duraciones, desde 5 minutos hasta 24 horas, para el período 1961-2012 de la estación OCBA.

Del análisis de las tendencias, podemos concluir que una disminución o aumento de los máximos anuales (es decir una tendencia significativa en cualquier duración) no necesariamente está acompañado de un aumento o disminución de la precipitación anual acumulada. Como ejemplo, la precipitación media a nivel anual presenta un aumento en casi todo el país en el período 1961-2010 (año calendario, datos web SMN) lo que puede estar relacionado con un aumento de los días con precipitación. Con respecto a la frecuencia de eventos extremos, Re y otros (2009) empleando una serie entre 1959-2002 del centro-este de Argentina encuentran que en las últimas décadas se registra un aumento en la frecuencia de este tipo de eventos.

Por otro lado es llamativa la década 1998-2007 y 1999-2008, que presenta en casi todas las duraciones hasta 3 horas tendencia significativa negativa. Al respecto podemos observar que en el año 2001 se registró un evento extremo que ocupa el 6to lugar en el ranking de precipitación acumulada en 24 horas para todo el registro de la estación OCBA en el período 1906-2013. Este mismo evento ocupa el 1er lugar en el ranking de todas las duraciones hasta 3 horas de la serie de datos analizada en este trabajo, con un máximo de 141 mm en 3 horas. La presencia de este evento, que fue superado recién en el año 2013, de cierta manera sesga la tendencia de la serie hacia valores negativos. Si eliminamos dicho evento de la serie obtenemos que las tendencias de estas décadas no son significativas.

El cálculo de las curvas IDF realizado en este trabajo muestra los resultados preliminares de la aplicación de las metodologías convencionales en este campo. Los valores encontrados son mayores a los obtenidos por otros autores particularmente en las duraciones mayores a 2 horas.

Se requieren estudios posteriores para poder calibrar correctamente los modelos utilizados y determinar para el resto de las estaciones operativas del SMN cuál es la metodología que mejor se ajusta a la serie de datos de cada lugar partiendo de los análisis efectuados por otros autores.

Los datos de estimaciones satelitales son un aporte valioso al estudio de la precipitación en alta resolución, aquí se muestran resultados preliminares que requieren un análisis más exhaustivo de la metodología aplicada.

Este trabajo es un puntapié para el desarrollo y la aplicación operativa de este tipo de estudio en todas las estaciones pluviográficas pertenecientes al SMN.

REFERENCIAS

Caamaño Nelli, G. y C. M. Dasso (2003) Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias, ISBN 987-9406-43-5, pp. 125-136. Editorial Universitas. Córdoba, RA.

Caamaño Nelli, G. y C. M. García (1999) “Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso Lognormal”. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XIV, N° 3, septiembre-diciembre, pp. 37-44. D.F., México.

Catalini , C. G., Caamaño Nelli, G., Dasso, C. M. (2011) Desarrollo y Aplicaciones sobre Lluvias de Diseño en Argentina; Editorial Académica Española, ISBN-10: 384549722X, ISBN-13: 978-3845497228, 284 pp.

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1994) “Hidrología Aplicada”. McGraw – Hill Interamericana, S.A. Bogotá. Colombia.

Houbouchian, P, P. Salio, D. Vila y Y. Garcia Skabar, (2012): Comparación de productos de precipitación de alta resolución sobre Sudamérica utilizando una red de observaciones de alta resolución espacial. Congremet XI, Mendoza, Argentina. 28 de mayo al 1 de junio de 2012.

Huffman, G., and Bolvin, D. (2013): TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation; en ftp://precip.gsfc.nasa.gov/pub/trmmdocs/3B42_3B43_doc.pdf

Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245-259.

Re, M., Barros, V.; Extreme Rainfalls in SE South America; *Climate Change* (2009) 96, 119-136.

Penalba, O and Vargas, W. (2004): Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *International Journal of Climatology* 24:1565–1580.

Skansi, M.; Vera, C. y Podestá, G. (2012): Descripción de la Variabilidad Observada de la Precipitación en la Zona Húmeda y Semi húmeda Argentina durante 1911-2010. Congremet XI, Mendoza, Argentina. 28 de mayo al 1 de junio de 2012.

Wilks D. (1995) *Statistical methods in atmospheric science – An Introduction*, Academic Press, International Geophysics Series, Vol 59.

**MAPAS DE INFLUENCIA DEL NÚCLEO DE TORMENTA SOBRE EL CAUDAL Y TIEMPO
PICO:
CASO CUENCA DEL RÍO DE LA SUELA**

Juan F. Weber, Pablo T. Stehli

Laboratorio de Hidráulica – Dpto. de Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba Universidad Tecnológica Nacional. Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina, jweber@civil.frc.utn.edu.ar - 51485@civil.frc.utn.edu.ar, <http://www.frc.utn.edu.ar>

RESUMEN

Se presenta la aplicación del modelo hidrológico distribuido TREX, para obtención de la variabilidad en la respuesta de la cuenca del río La Suela (pcia. de Córdoba) para distintas posiciones del núcleo de la tormenta. Este tipo de resultados sólo son viables en modelos distribuidos como TREX, ya que los modelos agregados (de uso general en la aplicación ingenieril) no pueden considerar la variabilidad espacial, tanto de las propiedades de la cuenca como de la propia tormenta.

La cuenca del río La Suela se encuentra ubicada totalmente en la provincia de Córdoba. Tiene una superficie de 131,8 km² comprendida entre los 900 y los 2200 msnm. La cuenca está localizada en el núcleo central de las Sierras Pampeanas. Hidrográficamente el río de La Suela es tributario del Anizacate, afluente a su vez del Xanaes o Río Segundo. Se utilizó una clasificación de los tipos de suelo de la cuenca según el origen de los materiales de superficie: rocas graníticas, metamórficas o sedimentos aluvionales. Desde el punto de vista del uso del suelo, se clasificó en 5 tipos, según la especie y porcentaje de la cobertura vegetal.

Los procesos hidrológicos considerados por el modelo incluyen la precipitación, interceptación, infiltración, almacenamiento en depresiones, flujo terrestre hortoniano y el flujo en los canales. Las pérdidas por interceptación se restan de la precipitación para determinar la precipitación neta que llega a la superficie de la tierra. La infiltración es simulada con las relaciones de Green y Ampt. El flujo superficial se rige por la ecuación de conservación de masa y de momento (St. Venant - onda difusiva) en dos dimensiones. El flujo en los cauces también se rige por la misma ecuación, pero en una dimensión. La cuenca se discretiza en una malla regular de pixeles, de 90 x 90 m. Los parámetros del modelo fueron los ajustados en base a información histórica de precipitaciones y caudales, en trabajos previos.

La tormenta hipotética tuvo las siguientes características: una duración de 3 horas, una lámina total de 50 mm distribuida según un diagrama trapecial, un abatimiento areal dado por el modelo CoDA (Caamaño y Dasso, 2003) según un patrón circular. El centro de este patrón o núcleo de tormenta fue sistemáticamente posicionado en cada uno de los 17844 pixeles que constituyen la cuenca; obteniéndose, y asociándose a dicho pixel, el caudal pico Q_p y el tiempo de ocurrencia del pico t_p del hidrograma de crecidas resultante. Esto genera dos mapas, denominados "mapas de influencia" del núcleo de tormenta sobre Q_p y t_p .

Del análisis de estos mapas se concluye que existe una región central de la cuenca que maximiza la respuesta de la misma en términos de la magnitud del caudal pico (alcanzando su máximo absoluto en el sector NNW), disminuyendo esta respuesta en las zonas más cercanas o más alejadas a la sección de cierre; en tanto que en relación al tiempo de ocurrencia del pico, la respuesta más rápida se obtiene con núcleos de tormenta cercanos a dicha sección. Los resultados de este trabajo pueden replicarse en otras cuencas de la zona, lo que permitiría eventualmente detectar comportamientos similares regionalmente escalables.

INTRODUCCIÓN

Un modelo hidrológico, en términos generales, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. Los modelos pueden ser físicos, donde se representan a escala las cuencas reales, o matemáticos, los cuales parten de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta de la unidad hidrológica bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas.

La modelación hidrológica comienza a principios del siglo XIX utilizándose para el diseño de canales, redes de drenaje, presas, puentes, diques y sistemas de distribución de agua. Hasta mediados del siglo XX, la modelación hidrológica se limitó a tratar de explicar mediante expresiones matemáticas simples, los mecanismos individuales involucrados en los principales procesos del ciclo hidrológico. Entre ellos se pueden nombrar: el método racional, la curva de infiltración de Horton, los trabajos de Thornthwaite y Penman para la estimación de la evapo-transpiración, etc.

En la década de los 60, con el advenimiento de la revolución digital, se realizó el primer intento por representar casi en su totalidad al ciclo hidrológico en una cuenca. Surge así el Stanford Watershed Model-SWM de Crawford y Linsley en 1966 (Singh, 1996). Sin embargo, las máquinas disponibles eran caras y muy lentas respecto a los estándares actuales, por lo tanto los programas eran limitados en tamaño y complejidad (Beven, 2001). Como consecuencia, la modelación hidrológica fue planteada principalmente en forma agregada (Vieux, 2004). La aparición de computadoras más potentes, la mayor disponibilidad de datos distribuidos arealmente provenientes de sensores remotos y las herramientas proporcionadas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han permitido el desarrollo de modelos distribuidos que consideran explícitamente la variabilidad espacial y temporal tanto en las entradas del sistema (precipitación) como de los resultados (contenido de humedad, altura de almacenamiento de agua, infiltración, etc.).

Motivación

La caracterización de las lluvias de diseño involucra un conjunto de rasgos de índole diversa, algunos de los cuales se traducen en variables concretas interrelacionadas (Caamaño y Dasso, 2003). Entre estos rasgos o componentes se pueden citar: magnitud, persistencia, probabilidad, ubicación, distribución, y atenuación. Esta última se define como la reducción de lluvia local a escala de cuenca, para predecir descargas. La disminución del valor de la lámina precipitada depende del área de la cuenca, A , y de la duración de la lluvia. La forma usual de representarla es mediante curvas h-d-A. En lugar de la altura de lámina, se utiliza a veces el coeficiente de reducción areal. Estas funciones son propias de cada región y están afectadas en especial por su topografía, razón por la cual no es recomendable su transposición (Caamaño y Dasso, 2003).

El coeficiente de reducción areal CDA es un número comprendido entre 0 y 1 (para cuencas de superficie infinita y menores o iguales a 25 km², respectivamente) que tiene en cuenta, para su determinación, la posición de la estación núcleo en relación a la topología de la cuenca, en un sentido unívoco: para una determinada posición y lámina de la estación núcleo, y asumido algún valor del CDA , la precipitación media de la cuenca es única. La relación no es unívoca en sentido inverso, esto es, es posible obtener la misma precipitación media en la cuenca para infinitas posiciones de la estación núcleo, ajustando el valor puntual en la misma.

Un modelo hidrológico agregado produciría, en todos estos casos, el *mismo* hidrograma de

crecidas. La versatilidad de un modelo hidrológico distribuido, que le permite considerar la geomorfología de la cuenca (representada por su red de drenaje), la variabilidad espacial de las propiedades del terreno (resistencia al flujo, capacidad de infiltración), y la distribución espacial de la precipitación, permitiría identificar la variabilidad en la respuesta hidrológica (hidrograma de crecidas) de la cuenca, ante la misma precipitación media, e indirectamente, una estimación de los errores provenientes de la aplicación de modelos agregados.

LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y es posible que nunca se los entienda en su totalidad. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de sistema. Un sistema es un conjunto de partes interconectadas entre sí que forman un todo (Chow et al., 1994). Desde este punto de vista, el ciclo hidrológico puede considerarse un todo compuesto por: agua atmosférica, agua superficial y aguas subterráneas, entre otros elementos. Este sistema global a la vez puede agrupar parte de sus elementos conformando subsistemas menores que faciliten su comprensión.

Un sistema hidrológico se define como: una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas. El objetivo del análisis de estos sistemas, es estudiar la operación del mismo y predecir su salida.

Clasificación de los modelos hidrológicos

Según Ponce (1994) los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos grandes categorías: modelos físicos o materiales y modelos formales o matemáticos: estos últimos conciben el sistema por medio de un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico con el objeto de simular la transformación de las entradas en salidas del sistema.

Seguindo a Ponce (1994), en la práctica, pueden distinguirse cuatro tipos generales de modelos:

1. **Determinísticos:** son formulados siguiendo las leyes de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales.
2. **Probabilísticos:** por el contrario, se formulan siguiendo las leyes del azar o probabilidad. Pueden ser de dos tipos: estadísticos o estocásticos.
3. **Conceptuales:** son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales.
4. **Paramétricos:** o también conocidos como empíricos o de caja negra. Son los más simples, consisten en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico.

Los fenómenos hidrológicos cambian en las tres dimensiones espaciales, pero tener en cuenta toda esta variación, puede hacer que los modelos sean muy complejos. De acuerdo a Chow et al. (1994), los modelos determinísticos y los conceptuales pueden clasificarse en:

1. **Modelos agregados:** el sistema es promediado en el espacio o considerado como un

punto único sin dimensiones.

2. Modelos distribuidos: considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales.

De acuerdo a la escala temporal, los modelos hidrológicos pueden clasificarse en:

1. Modelos de eventos aislados: son de corto plazo, diseñados para simular en eventos individuales la transformación de la lluvia en escurrimiento.
2. Modelos de procesos continuos: toman en cuenta todos los componentes del escurrimiento, incluyendo flujos superficiales, subsuperficiales y subterráneos. El objetivo de este tipo de modelos es tener en cuenta el balance de humedad a largo plazo de toda la cuenca.
3. Modelos de simulación mixta: intentan representar ambas escalas temporales en una forma computacionalmente económica y con un acuerdo razonable con la realidad.

Desde esta perspectiva, el modelo que se utilizará en este trabajo puede ser clasificado como un modelo matemático determinístico-conceptual, distribuido, de simulación de eventos.

EL MODELO TREX

TREX (Two-dimensional Runoff, Erosion, and eXport model) es un modelo bidimensional de escurrimiento, erosión y transporte de sedimentos y contaminantes. Está basado en el modelo de cuencas CASC2D. Los procesos hidrológicos simulados son: precipitación e interceptación, infiltración y pérdidas por transmisión en el cauce, almacenamiento, flujo superficial y en canales y derretimiento de nieve (England et al, 2007; Velleux et al, 2008).

El ciclo hidrológico comienza con la precipitación (pluvial y/o nival), una fracción de la misma quedará retenida en la vegetación, la precipitación excedente está disponible para infiltrar o escurrir superficialmente. En este modelo se utiliza la relación de Green y Ampt para definir la infiltración en la superficie del terreno y en los cauces. Si la tasa de precipitación supera a la de infiltración, el agua se almacena en las depresiones del terreno hasta un determinado umbral que da comienzo al flujo superficial. Este flujo está gobernado por las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, TREX utiliza la aproximación de la onda difusiva unidimensional en cauces y bidimensional en la superficie de la cuenca, suponiendo que el flujo es turbulento y que la resistencia al flujo se puede describir utilizando la formulación de Manning (Stehli et al., 2012).

Para simular el proceso hidrológico, TREX plantea una solución numérica explícita de las ecuaciones de balance de masa mediante la segmentación de la cuenca en elementos cuadrados iguales, a los cuales se le asignan los parámetros relativos a las características de infiltración del suelo y coeficientes de rugosidad.

Este modelo es de código libre, está escrito en el lenguaje de programación C y está disponible en la página web de la Universidad Estatal de Colorado, tiene una fuerte base física en la conceptualización de los procesos superficiales, pero no considera los procesos subsuperficiales y subterráneos (Jorquera et al., 2012).

Procesos hidrológicos en TREX

Se describen someramente a continuación las ecuaciones que representan los procesos hidrológicos relevantes incluidos en el modelo TREX (Velleux et al., 2008).

Precipitación, interceptación y almacenamiento

El volumen bruto de precipitación (V_g) que llega a la superficie en función del tiempo, es igual a la intensidad de precipitación bruta (i_g) por el área de la región donde ocurre la precipitación (A_s). El volumen neto (V_n) resulta de descontarle al bruto el volumen interceptado (V_i). El balance se explicita en la ecuación 1.

$$\frac{\partial V_g}{\partial t} = i_g \cdot A_s \Rightarrow V_n = V_g - V_i \quad (1)$$

Según el volumen interceptado sea mayor o menor al volumen bruto, habrá o no volumen neto de agua sobre la superficie de la cuenca. En este cálculo no se realiza ningún descuento referido a volumen evapotranspirado, ya que es un modelo de eventos y se puede despreciar ese término. El volumen de precipitación neta también se puede expresar como una tasa de precipitación neta (efectiva):

$$i_n = \frac{1}{A_s} \frac{\partial V_n}{\partial t} \quad (2)$$

Infiltración

Para definir la infiltración de agua en la superficie de la cuenca como así también en los cauces que la forman, el modelo TREX utiliza las relaciones de Green y Ampt (1911, citado por Chow et al., 1994).

$$f = K_h \left(1 + \frac{\psi(1 - S_e)\theta_e}{F} \right) \quad (3)$$

donde K_h es la conductividad hidráulica, ψ es la altura de succión del frente de saturación (altura de succión capilar), S_e es el porcentaje de saturación efectiva del suelo, θ_e la porosidad efectiva del suelo, f la tasa de infiltración y F la altura de infiltración acumulada, vinculadas a través de:

$$f = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

lo cual da lugar a una relación no lineal resuelta a través de un método iterativo (Chow et al., 1994).

La aplicación del modelo de Green-Ampt, requiere la estimación de la conductividad hidráulica K_h , la porosidad η y la altura de succión del frente de mojado ψ . La variación de la altura de

succión y de la conductividad hidráulica con la humedad puede expresarse en función de una saturación efectiva, S_e .

Flujo superficial

La fracción de precipitación no retenida ni infiltrada genera un flujo superficial, tanto mantiforme (bidimensional) como en canales (unidimensional). El flujo superficial puede ocurrir cuando la profundidad del agua en el plano terrestre supera el umbral de almacenamiento de la depresión. El flujo superficial se rige por la conservación de la masa (continuidad) y la conservación de cantidad de movimiento. Las ecuaciones de continuidad para el flujo en dos dimensiones gradualmente variado, sobre un plano rectangular en coordenadas (x, y) son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i_n - f + W = i_e \quad (5)$$

donde h es la altura de flujo superficial, W es un término fuente/sumidero (descarga/aporte unitario puntual), i_n es la intensidad de precipitación neta (obtenida a partir de 1), i_e es la intensidad de precipitación en exceso, y q_x , q_y son los caudales unitarios en la dirección x o y. Suponiendo que el flujo es turbulento y la resistencia se puede describir utilizando la formulación de Manning (en unidades del SI), las relaciones de escurrimiento-profundidad son:

$$q_x = \frac{S_{fx}^{1/2} h^{5/3}}{n} \quad (6)$$

$$q_y = \frac{S_{fy}^{1/2} h^{5/3}}{n} \quad (7)$$

mientras que en el flujo superficial en canales (ríos y arroyos) se aplica una formulación equivalente pero unidimensional.

Cálculos en TREX

Para simular el conjunto de los procesos hidrológicos descritos, se deben asignar los valores para cada parámetro del modelo y deben ser resueltas las ecuaciones de balance de masa definidas en el marco del modelo determinístico-conceptual. Las ecuaciones de conservación de masa (7 y 12) son discretizadas en diferencias finitas, mientras que la integración numérica temporal se realiza con un esquema hacia adelante (Euler):

$$s_{i+1} = s_i + s'_i \Delta t \quad (8)$$

siendo $s_{t+\Delta t}$ el valor de la variable del modelo en el tiempo $t + \Delta t$, s_t el valor de la variable del

modelo en el tiempo t , $\partial s/\partial t|_t$ el valor de la derivada de la variable con respecto al tiempo en el tiempo t , y Δt el paso de tiempo para la integración numérica.

La solución numérica explícita se consigue mediante la segmentación de la cuenca hidrográfica entera en elementos cuadrados iguales, a los cuales se les asignan los distintos parámetros relativos del modelo. Como cada parámetro está definido, se supone que es uniforme en toda el área de la celda, este valor actual es asignado a un punto central nodal (figura 1).

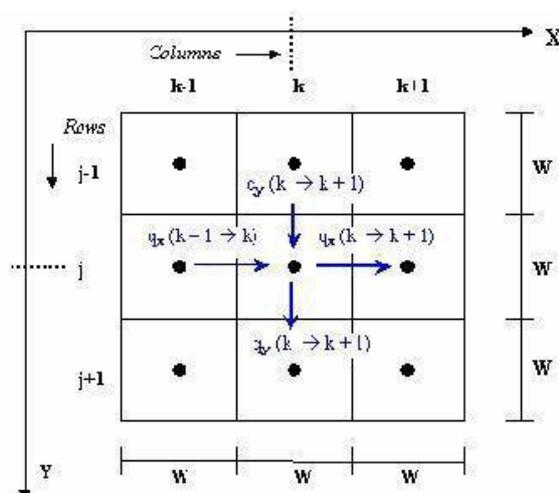


Figura 1: Discretización espacial en el modelo TREX

Datos y Parámetros a ingresar

TREX requiere un archivo de entrada principal que controla la mayoría de los aspectos de la simulación. Dentro de este archivo de entrada principal, las entradas se dividen en seis grupos de parámetros relacionados (Grupos de datos de A a F). Este archivo también especifica una serie de archivos de entrada auxiliares que se requieren para operar el modelo. Los archivos auxiliares de entrada se utilizan para definir las características específicas de la simulación como los límites de la cuenca hidrográfica, la topografía, clases de suelos y uso de la tierra, etc.

La ventaja que posee TREX es que muchos de estos archivos auxiliares (como así también los archivos de resultados) pueden ser procesados y visualizados mediante un sistema de información geográfica (SIG), particularmente GRASS (Neteler y Mitsova, 2008), que tiene un nivel de integración muy alto con TREX a través de sus interfaces de lectura-escritura.

CUENCA EN ESTUDIO

La aplicación y calibración de modelos hidrológicos continuos requiere una calidad y densidad, tanto espacial como temporal, de datos de campo. En ese sentido, la cuenca del río de La Suela reúne dichos requisitos en su carácter de haber sido una de las ocho cuencas piloto representativas instaladas en distintas regiones como parte del Programa de Investigación sobre Cuencas Pilotos y Experimentales desarrollado en nuestro país a través de la UNESCO durante el Decenio Hidrológico Internacional (1960-1970) declarado por Naciones Unidas (Bustamante, 1978). El equipamiento instrumental y la medición sistemática de los procesos del ciclo hidrológico en estas cuencas, permitieron el desarrollo de metodologías con base científica y tecnológica en el área de la hidrología y los recursos hídricos. La alta densidad areal de su red histórica de estaciones de lluvia, de observaciones

meteorológicas (temperatura, viento, humedad y otras variables) y de mediciones hidrológicas (niveles hidrométricos y caudales), hacen posible la implementación y experimentación de algoritmos que permitan simular, ya sea en forma total o parcial, los componentes y procesos del ciclo hidrológico. Los estudios específicos en aspectos climáticos, geológicos, geomorfológicos, de suelos, vegetación, infiltración, escurrimientos entre otros, brindan por su parte, antecedentes importantes para la modelación hidrológica (Weber et al., 2010).

Ubicación geográfica y aspectos fisiográficos

La cuenca del río de La Suela se encuentra ubicada totalmente en la provincia de Córdoba, al sur de la localidad de Villa Carlos Paz accediendo a ella por la Ruta Nacional 20 (Figura 2). Tiene una superficie de 131,8 km² comprendida entre los 900 y los 2200 metros sobre el nivel del mar. La cuenca está localizada en el núcleo central de las Sierras Pampeanas, entre los 31° 40' y 31° 30' de latitud sur y los 64° 30' y 64° 45' de longitud oeste, sobre el cordón de las Cumbres de Achala y sus estribaciones orientales. Hidrográficamente el río de La Suela es tributario del Anizacate, afluente a su vez del Xanaes o Río Segundo.

Geología y geomorfología

De acuerdo a un trabajo antecedente de Barbeito y von Müller (1981), los materiales de superficie de la Cuenca, corresponden a un basamento cristalino antiguo compuesto por: un 66 % de rocas graníticas y un 25 % de metamorfitas, correspondiendo el 9 % restante a sedimentos aluviales modernos asentados en pequeños valles. Las fuerzas orogénicas que actuaron a lo largo de la evolución geológica de acuerdo a la rigidez de las rocas, resolvieron dos ambientes diferenciales: las cumbres propiamente dichas y sus estribaciones escalonadas. El primero, es producto de una intensa fracturación y posterior sobre elevación del basamento o zócalo que alcanzó los 2.200 m.s.n.m y el segundo, en respuesta a una tectónica menos intensa, adoptó una morfología escalonada con descenso hacia el este. Las cumbres de Achala en su conjunto, constituyen desde el punto de vista estructural, un Pilar Tectónico o "Horst", limitado por dos fallas transversales de rumbo meridional. Sobre estas, en el sector occidental de la Cuenca, comienza a organizarse el drenaje a través de un paisaje con predominio de formas abruptas, que evidencian un estado de juventud morfológica. Los interfluvios son angostos y de vertientes generalmente empinadas en donde aflora con frecuencia la roca granítica. Las pendientes medias varían desde un 30 % hasta un 50 % en los sectores de mayor intensidad tectónica (Quebradas - Abruptos de Falla) y las formas planas son escasas y limitadas casi exclusivamente a las máximas altitudes.

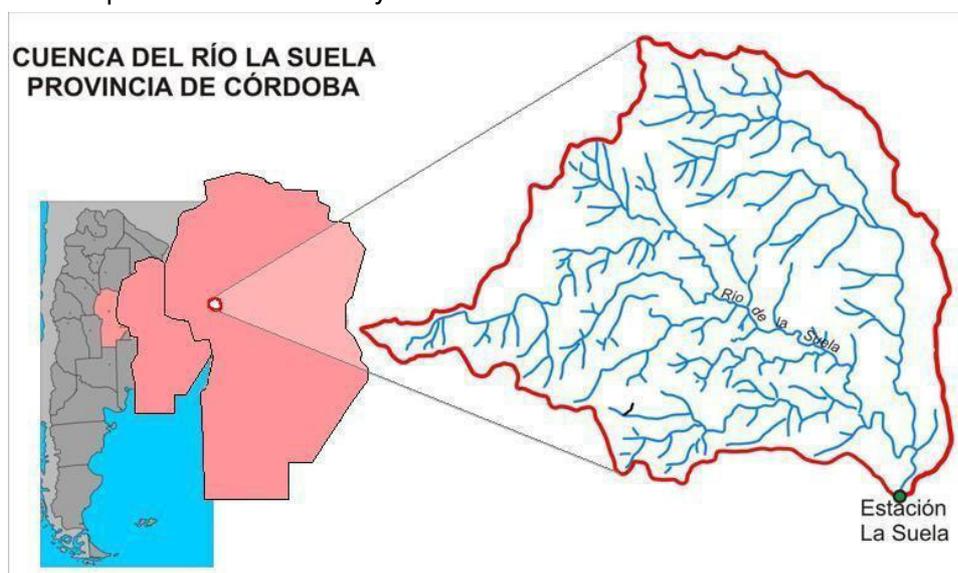


Figura 2: Ubicación geográfica cuenca del río de La Suela

Hacia el este, las estribaciones de la unidad estructural adquieren una fisonomía más suavizada. El paisaje aquí se representa por la abundancia de colinas convexas con gradientes medios entre 10 % y 15 %. Los interfluvios son más amplios y de laderas menos energéticas en donde es mayor el asentamiento de suelos, disminuyendo por ende la rocosidad. La escasez de formas accidentadas limitadas a la acción erosiva lineal de los cursos de agua o a la tectónica, evidencia una cierta madurez morfológica. Estas dos grandes áreas geomorfológicas, influyen de acuerdo a sus medios físicos en las condiciones ecológicas con implicancia en la distribución de la vegetación.

Hidrografía e hidrología

La cuenca del río de La Suela constituye desde el punto de vista hidrográfico, la naciente norte de la cuenca imbrífera del río Segundo o Xanaes con desagüe en el sistema endorreico de la Laguna de Mar Chiquita o de Ansenúza. Dos subcuencas de carácter bien definidas que unen sus aportes a menos de 2 Km del cierre de la cuenca conforman el drenaje: la subcuenca del río de La Suela propiamente dicha que localiza sus nacientes en el Cordón de Achala a 2.200 m.s.n.m y la subcuenca del Arroyo de la Estancia, que lo hace a 1.500 m.s.n.m sobre las estribaciones de este, en la localidad de Copina.

La subcuenca La Suela (60 % del área) ubicada en el sector sudoeste de la cuenca, con nacimiento en el borde oriental de las Sierras Grandes. Su punto de mayor altitud se encuentra en las nacientes del arroyo del Carnero, uno de sus principales afluentes (Dasso, 1983). Se pueden nombrar varios arroyos perennes que aportan sus aguas a este tributario como: el arroyo del Carnero, el arroyo del Hinojo, el arroyo del Colgado, luego colecta las aguas del arroyo intermitente El Durazno y los últimos aportes los recibe del arroyo de Las Moras y el arroyo Puma Huasi. La subcuenca La Estancia es de menor altitud y respuestas más lentas (pendiente 2 %), está conformada por un arroyo de curso permanente: el arroyo San Bernardo que luego continúa como arroyo de La Estancia, y varios arroyos menores de escurrimientos intermitentes.

En la Figura 3 se muestra una imagen satelital con la delimitación de la cuenca y la red hidrográfica principal de ambas subcuencas. La longitud del río principal (Carnero – La Suela) desde sus nacientes, hasta la estación de cierre es de 28,92 Km, con una pendiente media uniforme del 4 % alcanzando una pendiente máxima en el escalón tectónico del 13 %.

distribuidos según dos grandes ambientes; Sub-andino: corresponde a las cumbres por encima de los 1.600 m.s.n.m y el Pedemontano por debajo de esta altitud.

En la baja cuenca, la cubierta está compuesta por elementos típicos del Monte Serrano entremezclados con ejemplares pertenecientes al Monte Xerófilo circundante, los que a medida que aumenta la altitud disminuyen para dar lugar a la flora del Monte Serrano típico que se extiende según sectores, hasta los 1.500 m.s.n.m con una textura abierta configurando manchones de grupos arbóreos (cocos – molles). Por encima de esta altitud el estrato del Monte, forma ecotonos con el piso del Romerillal y los pastos de altura, sin el predominio marcado de uno de ellos. Sobrepasando los 1.600 m.s.n.m, aparece el piso de los Pastizales y bosquecillos de altura, ya en el ambiente Sub-andino de las cumbres. En este caso los ejemplares arbóreos típicos del piso (tabaquillos), están limitados a quebradas que influyen localmente en las condiciones climáticas.

APLICACION

Modelado de la cuenca

La cuenca fue modelada en base al procesamiento de la información disponible a través de GRASS GIS (Neteler y Mitasova, 2008). El mapa digital de elevación de la cuenca fue generado a partir de la información disponible públicamente de la misión del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Esta misión se llevó a cabo con el objetivo de generar datos topográficos digitales de gran parte del mundo. La resolución de las celdas de los datos fuente es de 1 segundo de arco, sobre Estados Unidos y en el resto del mundo, 3 segundos de arco, lo cual se traduce en la región de las sierras de Córdoba en un pixel de aproximadamente 90 x 90 m.

Con estos datos, y con ayuda de GRASS GIS, se delimitó la cuenca del río La Suela, obteniendo así el mapa máscara de la cuenca, el mapa digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés), como así también mapa de cauces y de segmentos de cauces. En la figura 4 se presenta el modelo digital de elevación de la cuenca del río La Suela (Stehli et al., 2012). A partir del mismo TREX permite generar la red de drenaje de la cuenca, como se muestra en la figura 5. El modelo de cuenca así obtenido quedó discretizado en 17844 celdas (pixeles) activas en la cuenca.

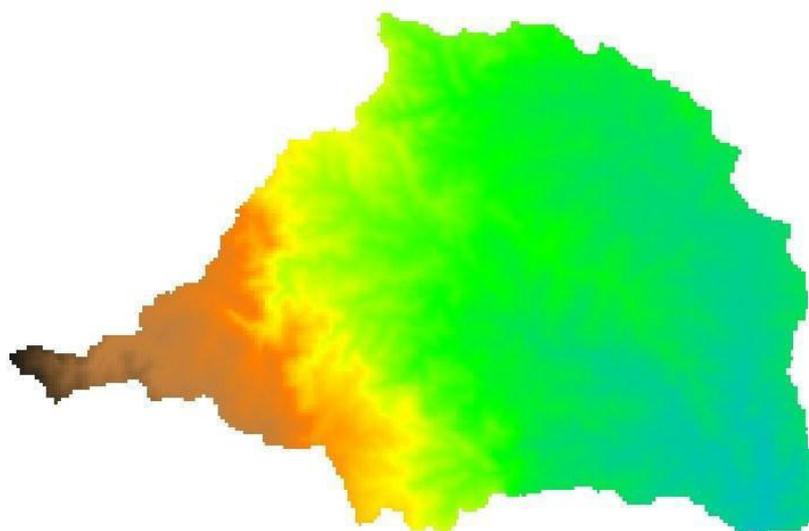


Figura 4: Modelo digital de elevación de la cuenca del río de La Suela

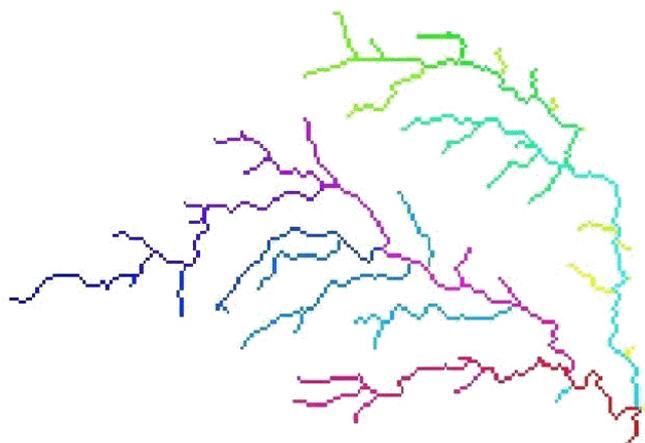


Figura 5: red de drenaje de la cuenca del río de La Suela

Cada mapa es utilizado por T-REX para realizar sus cálculos; el mapa máscara identifica las celdas activas que pertenecen a la cuenca, el DEM sirve para definir las pendientes en la cuenca, número de cauces indica los cauces y el orden de cálculo (definiendo cual se encuentra aguas abajo y cual aguas arriba), por último el mapa de número de segmentos de cauces, divide a cada cauce en segmentos de igual tamaño (en correspondencia del tamaño de la celda) para poder definir sus características específicas (coeficiente de rugosidad de Manning, sección, altura, sinuosidad, etc), luego, en un archivo auxiliar.

Otro conjunto de información requerida por TREX lo constituyen los mapas de tipo y usos de suelo (este último caracterizado por el grado de cobertura vegetal). Para la elaboración de estos mapas, se realizó la digitalización de mapas elaborados por trabajos precedentes (Font y Bustamante, 1983), sobre vegetación y erosión en cuencas de carácter torrencial. En la figura 6 se muestran los dos mapas indicados que fueron digitalizados a partir de la información original en formato analógico.

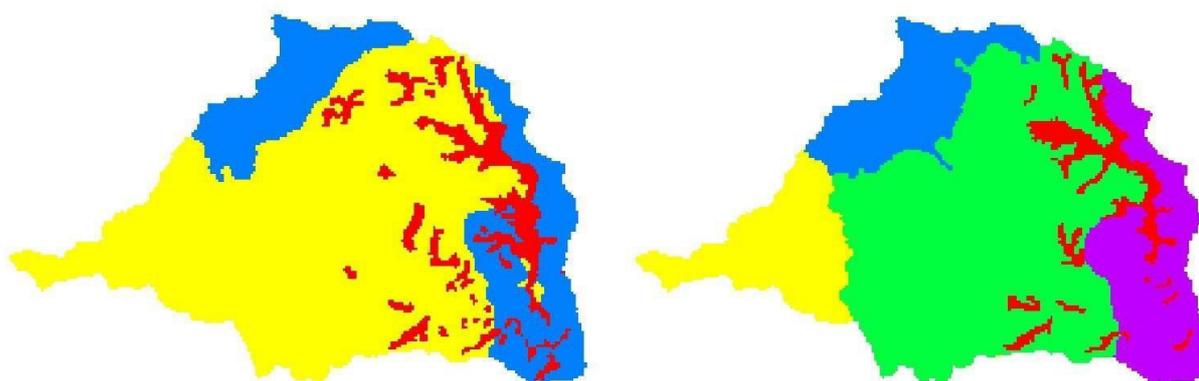


Figura 6: mapas del tipo (izquierda) y uso (derecha) del suelo de la cuenca del río de La Suela

Simulaciones hidrológicas previas

Stehli et al (2012) presentan la calibración de los parámetros del modelo TREX para tres eventos con registros simultáneos de precipitaciones y caudales. En las Figuras 7 y 8 se presentan los hidrogramas observado y calculado correspondiente a los eventos del 14 de

enero de 1979 y 27 de enero del mismo año.

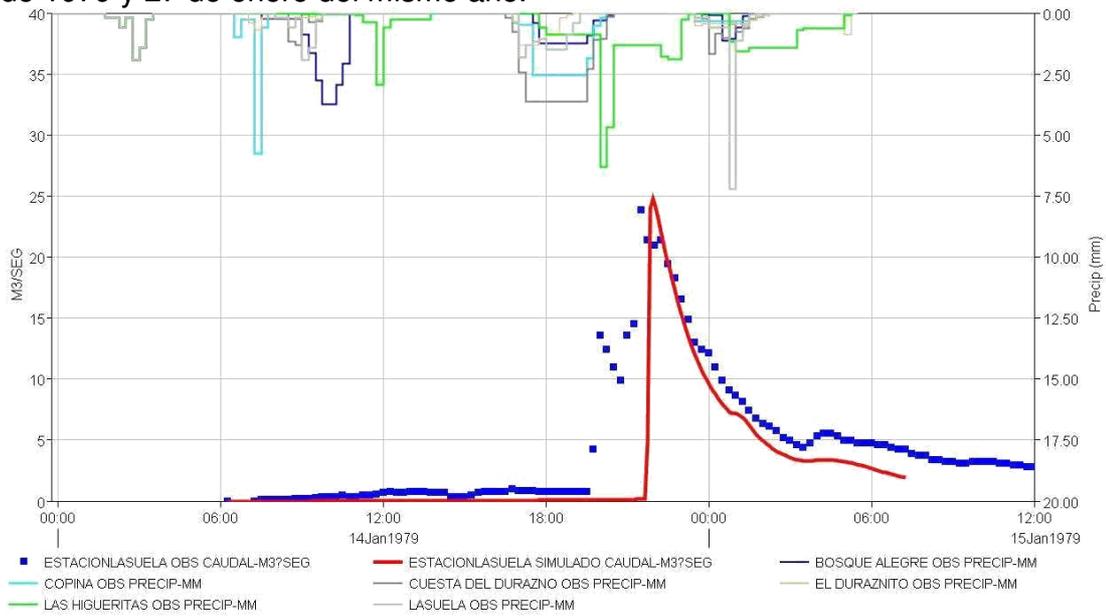


Figura 7: Hidrograma simulado para el evento del 14 de Enero de 1979

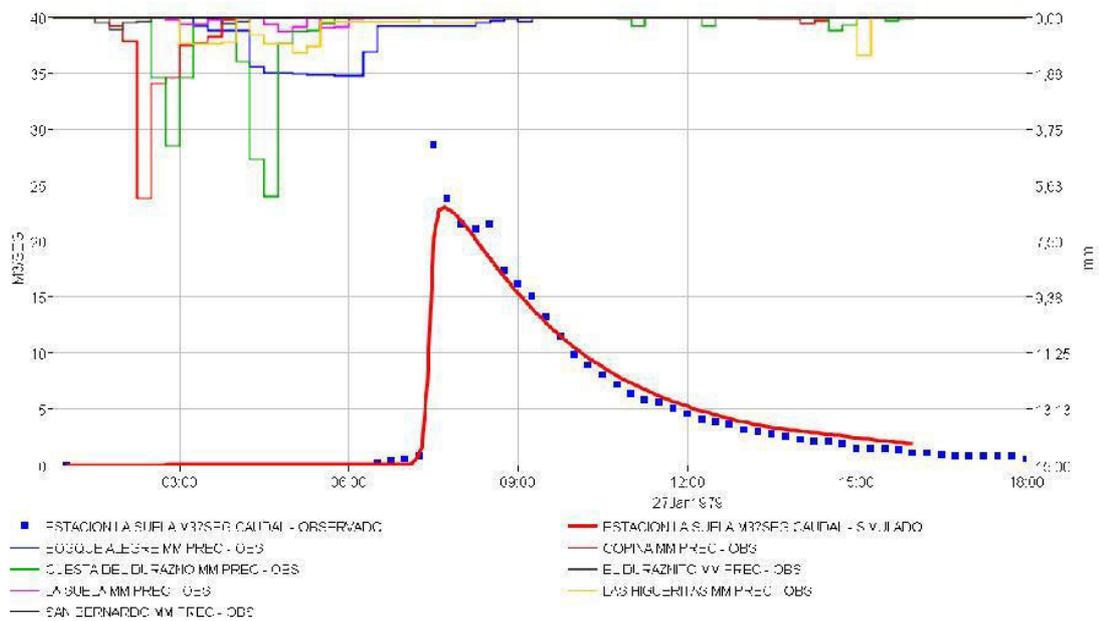


Figura 8: Hidrograma simulado para el evento del 27 de Enero de 1979

Se realizó una calibración manual de los parámetros de infiltración, como así también los parámetros de rugosidad superficial y de los cauces para los eventos seleccionados. Para la calibración de los parámetros de infiltración, en primer lugar, se estableció la textura del suelo según el contenido de cada fracción del mismo (arena, limo y arcilla), luego, teniendo en cuenta que esos parámetros varían en función del grado de saturación de los mismos, se utilizó para establecer la conductividad hidráulica las relaciones de Rawls et al (1982) . Para establecer el nivel de saturación de los suelos en la cuenca, se utilizó como dato de entrada los valores obtenidos por la calibración de un modelo hidrológico continuo desarrollado en la misma cuenca (Jorquera , 2010).

Definición de tormentas de análisis

Considerando la representación raster de la cuenca, es posible definir para cada pixel una tormenta cuyo centro o núcleo esté posicionado en dicho pixel y decaiga, según alguna ley, a medida que se aleja de éste. En la Figura 9 se aprecian cuatro tormentas centradas en distintos pixeles pertenecientes a la cuenca.

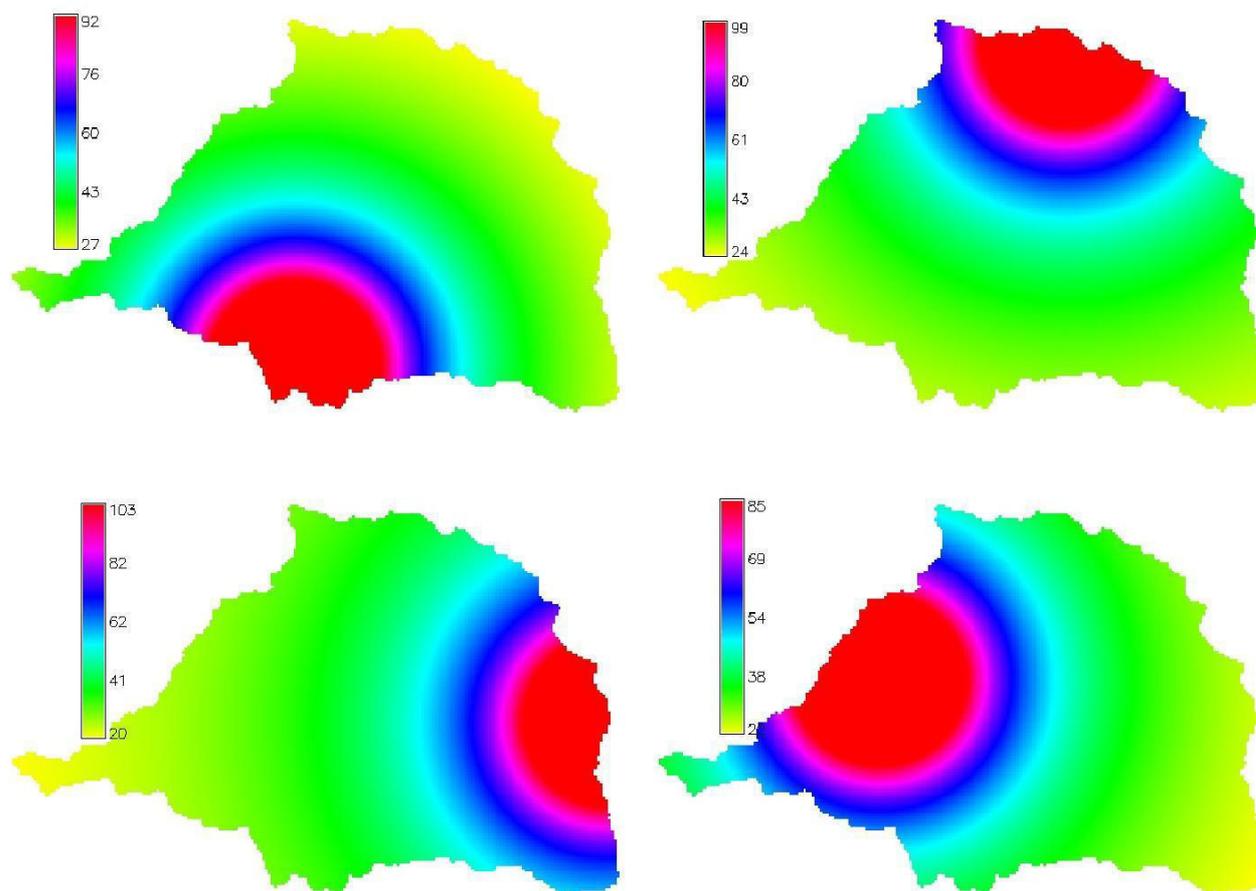


Figura 9: Distintas posiciones de la tormenta

Las tormentas así definidas poseen las siguientes propiedades:

- patrón espacial circular, con intensidad máxima en el centro y decaimiento en función de la distancia al centro según lo establecido en el modelo CoDA (Caamaño y Dasso, 2003), dado por:

$$CDA = 25^{-k} A^k \quad (9)$$

donde A es el área del círculo centrado en el pixel núcleo (en km) y k un exponente función de la duración d dado por:

$$k = -2.0759 d^{-0.5073} \quad (10)$$

donde d es la duración de la tormenta, en minutos. La aplicación de este modelo CoDA en base a áreas circulares concéntricas da lugar a una distribución radial simétrica de la intensidad de lluvia, cuyo coeficiente de decaimiento areal decae en función de la distancia al núcleo como se muestra en la Figura 10.

- distribución temporal según se indica en la Figura 11, para cada pixel de la cuenca, donde i_{max} es la máxima intensidad definida para ese pixel, según se describió previamente;
- la posición de la tormenta permanece fija a lo largo de la simulación.

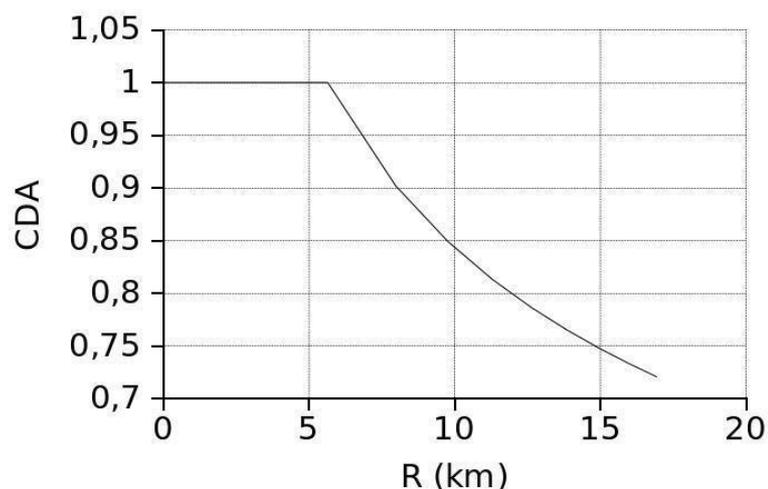


Figura 10: decaimiento del CDA en función de la distancia al núcleo de tormenta

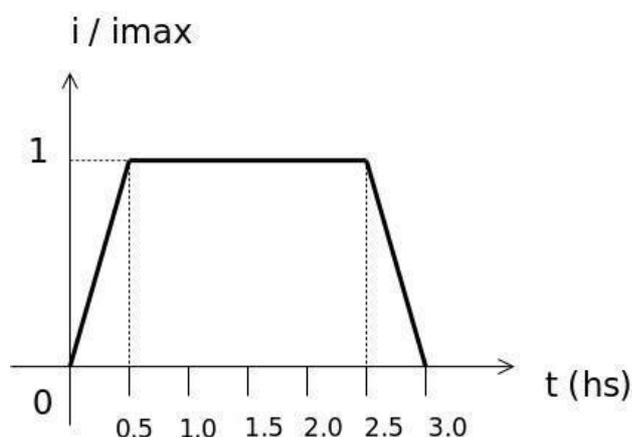


Figura 11: distribución temporal de la intensidad relativa de lluvia

Los valores así obtenidos de intensidad de precipitación pixel a pixel fueron escalados de modo que la precipitación media en la cuenca fuera la misma para cada una de las 17844 tormentas así generadas, e igual a 50 mm. De esta forma se construyeron 17844 mapas de entrada de precipitación para TREX en el formato "radar" materializado a través de dos archivos de entrada:

- Un archivo con las coordenadas de cada celda de la cuenca.
- Otro archivo que siguiendo el orden de celdas definido en el archivo anterior define la intensidad de la lluvia en cada intervalo para cada pixel.

Definición de mapas de influencia

Como resultado de la aplicación del modelo TREX, a partir de cada una de las tormentas de análisis es posible obtener un hidrograma de crecidas. En la Figura 12 se presentan los hidrogramas de crecidas correspondientes a las tormentas de la Figura 9.

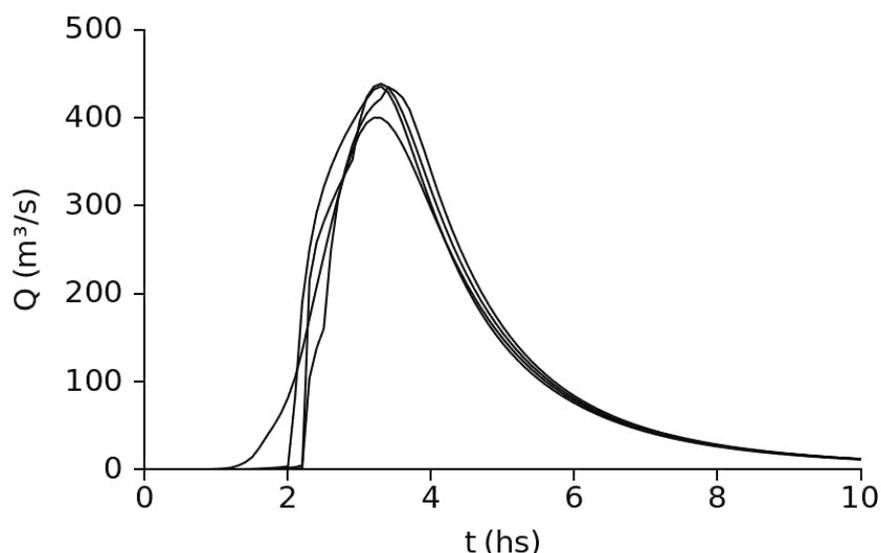


Figura 12: ejemplos de hidrogramas de crecida

De este modo se obtuvieron 17844 hidrogramas de crecidas, de los cuales se extrajeron como información relevante la magnitud (Q_p) y tiempo de ocurrencia (t_p) del caudal pico.

Como cada pixel activo de la cuenca corresponde a un hidrograma de crecidas resultante, es posible asignar a cada pixel el valor de Q_p o t_p , generando de este modo dos mapas, denominados en lo que sigue mapas de influencia del caudal pico o del tiempo del pico, según se indica en la Figura 13.

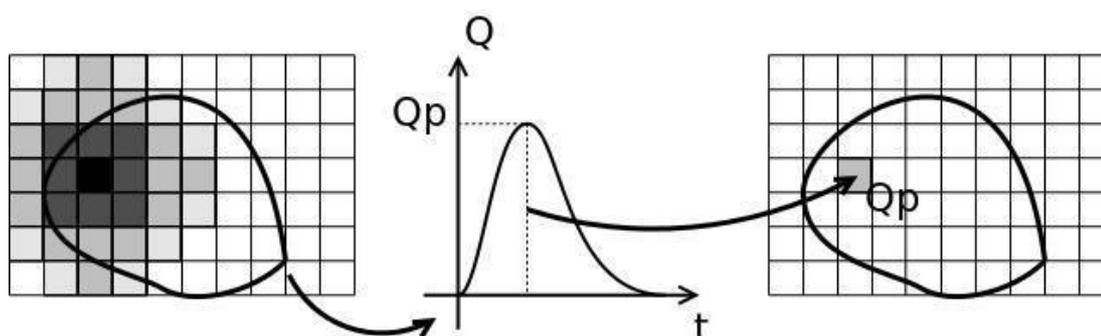


Figura 13: construcción conceptual del mapa de influencia del caudal pico

El nombre de mapa de influencia se eligió por analogía evidente al concepto de “línea de influencia” en la Estática Gráfica: es la representación gráfica de la función que corresponde a la respuesta de una variable del sistema ante un desplazamiento de la sollicitación (la carga en el caso de una viga). En la Figura 14, se muestra, a modo de ejemplo, la línea de influencia de la reacción R_B ante el desplazamiento de la carga P . En el problema bajo análisis, la sollicitación es representada por la precipitación (que se desplaza pixel a pixel a lo largo de la cuenca) y la variable del sistema cuya variación se analiza es el caudal pico Q_p o el tiempo de ocurrencia del pico t_p .

De este modo se obtiene la representación raster de un par de funciones continuas $Q_p(x,y)$ y $t_p(x,y)$ donde x e y representan las coordenadas del núcleo de tormenta. En cada pixel queda almacenado el correspondiente valor de Q_p o t_p .

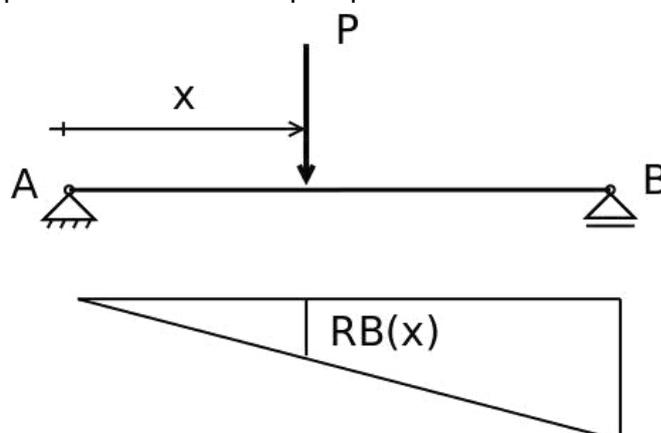


Figura 14: línea de influencia de la reacción R_B ante el desplazamiento de la carga P

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 15 y 16 se presentan los mapas de influencia de Q_p y t_p , respectivamente, para la cuenca del río de La Suela, mientras que en la Tabla 1 se presentan los estadísticos principales de los resultados obtenidos. Además, en la Figura 17 se presenta el histograma de Q_p obtenido.

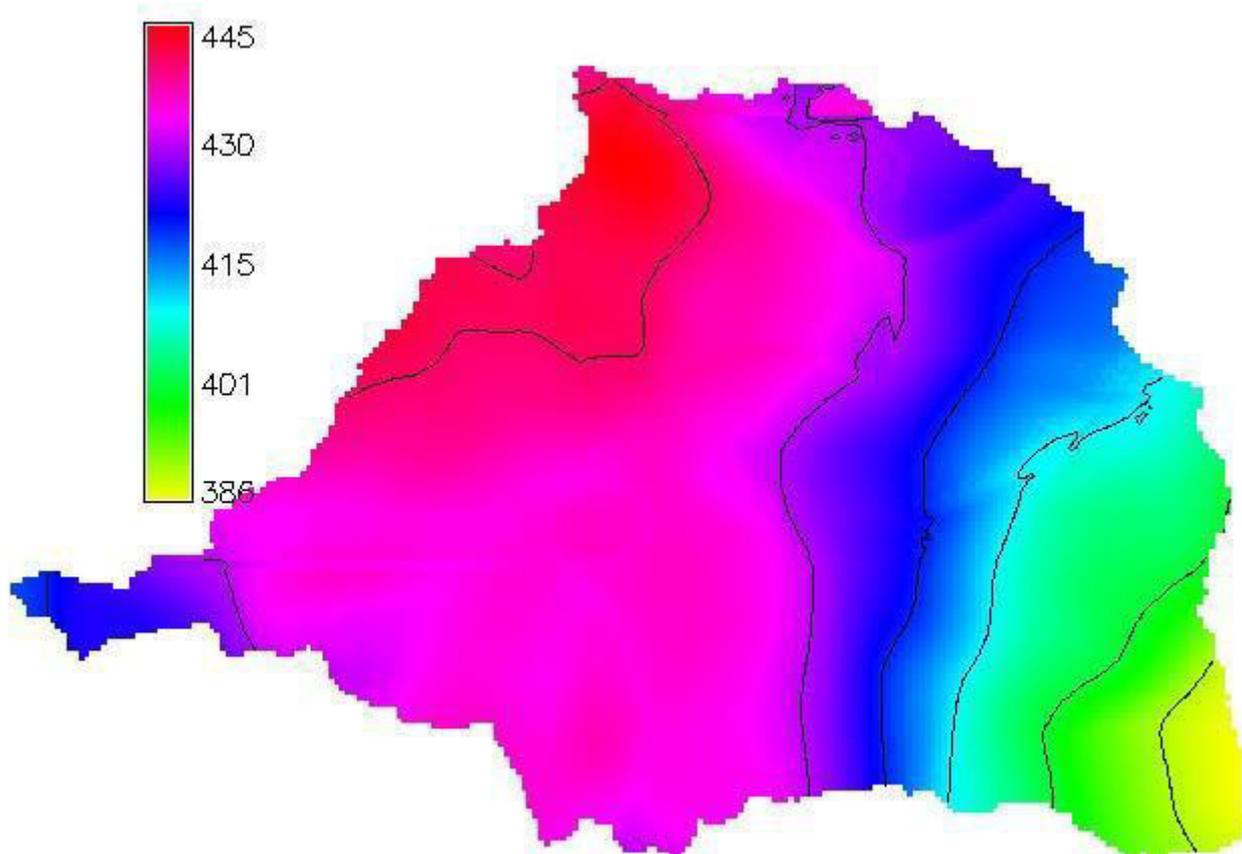


Figura 15: mapa de influencia del caudal pico Q_p – cuenca del río de La Suela

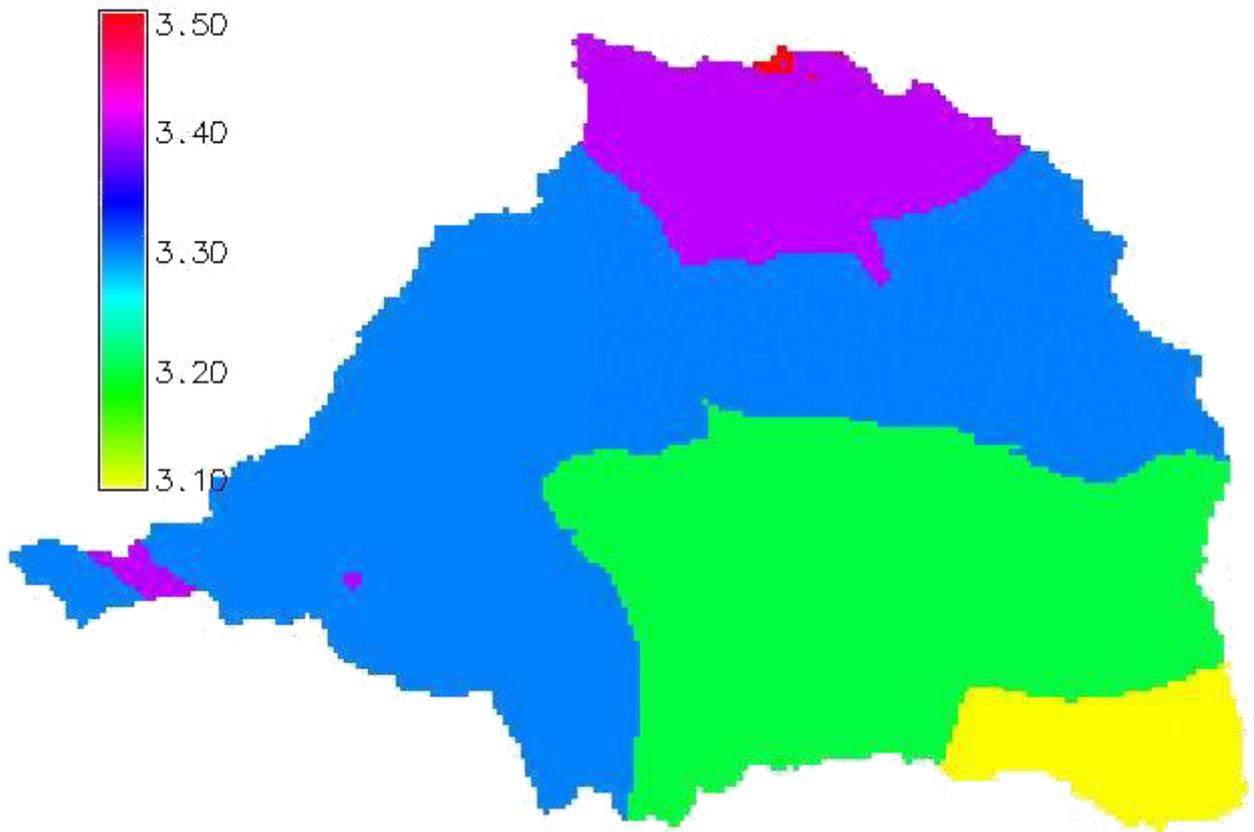


Figura 16: mapa de influencia del tiempo de ocurrencia del caudal pico tp – cuenca del río de La Suela

Tabla 1: propiedades estadísticas de la distribución de Qp y tp – cuenca del río de La Suela

Estadístico	Qp (m ³ /s)	tp (h)
Tamaño de la muestra	17844	17844
mínimo	386.24	3.1
máximo	444.51	3.501
rango	58.27	0.401
media	425.67	3.26979
Desvío estándar	13.85	0.0759144
Varianza	191.88	0.005763
Coefficiente de variación	3.25416 %	2.32169 %

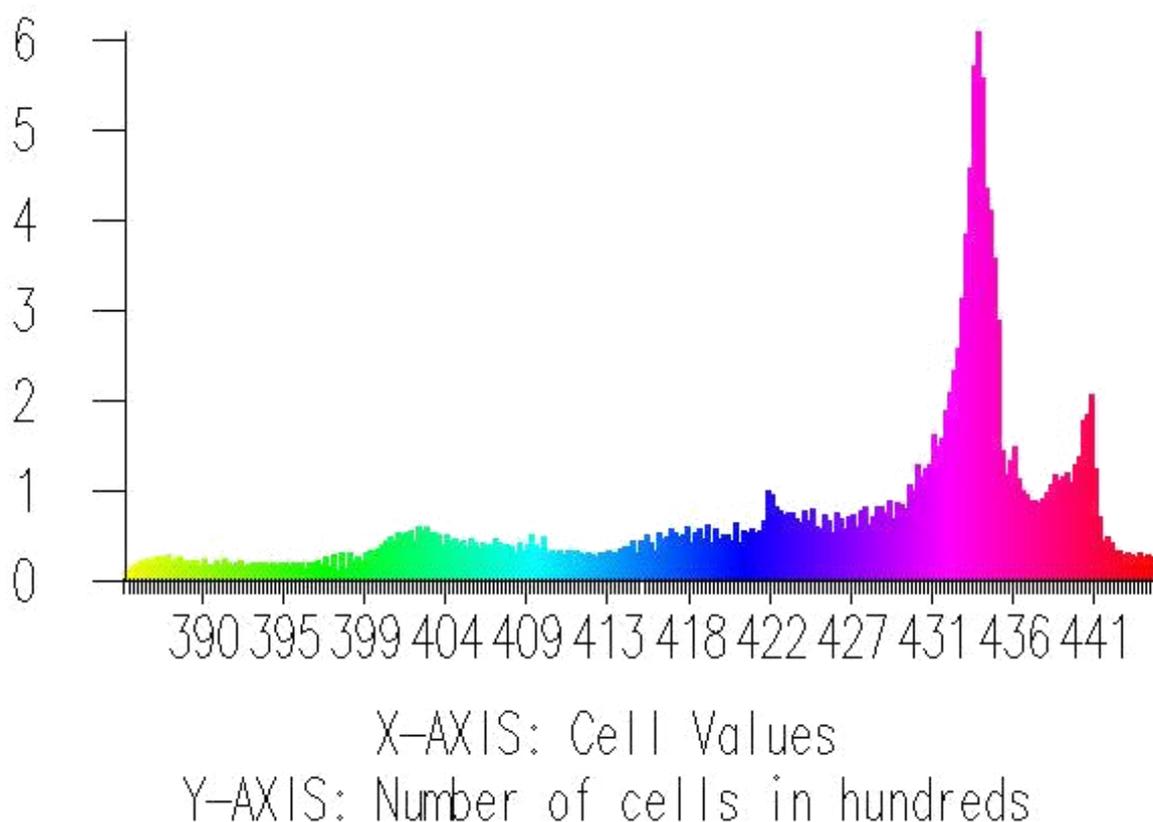


Figura 17: histograma de frecuencias del caudal pico Q_p – cuenca del río de La Suela

En el mapa de influencia de Q_p (Figura 15) puede apreciarse una zona ubicada en el extremo norte de la cuenca (color rojo) que maximiza el valor de Q_p para la misma precipitación media, decayendo esta respuesta para el extremo oeste (punto más alejado de la sección de cierre) y para la zona sudeste (sector próximo a la sección de cierre). El intervalo modal de Q_p se desarrolla en una amplia zona central de la cuenca (ver Figura 17). Un comportamiento similar se aprecia en el mapa de influencia de t_p (Figura 16) aunque no con el mismo patrón espacial de distribución.

El rango de caudales pico obtenidos se desarrolla aproximadamente entre los 386 y los 444 m^3/s , con un valor medio de 426 m^3/s , lo cual corresponde a un rango porcentual de (-9.4% ; +4,2%), es decir una amplitud de 13.6%; mientras que el rango de tiempos de ocurrencia del pico se desarrolla aproximadamente entre las 3,1 y 3,5 hs, con un valor medio de 3,27 hs, y un rango porcentual de (-5.2%; +7%) y una amplitud de 12,2%.

La distribución de frecuencias de Q_p representada en el histograma de la Figura 17 muestra un comportamiento asimétrico, con un pico principal en el orden de los 434 m^3/s y una asimetría positiva, con una cola a izquierda ampliamente desarrollada correspondiente a las zonas cercanas a la sección de cierre y una cola a derecha más corta correspondiente a la región crítica que maximiza la respuesta de la cuenca para Q_p . Además, se aprecian picos secundarios en el histograma de la Figura 17, tanto a izquierda como a derecha del pico principal.

CONCLUSIONES

Ha sido posible, utilizando en conjunto un modelo hidrológico distribuido y un algoritmo para el abatimiento areal de la lámina precipitada, analizar la respuesta de una cuenca ante diversas posiciones del núcleo de tormenta. La representación gráfica de la relación unívoca entre ubicación del núcleo y magnitud de Q_p o t_p , variables hidrológicas características del hidrograma de descarga resultante, ha sido denominada mapa de influencia.

Estos mapas de influencia muestran que existe una región central de la cuenca que maximiza la respuesta de la misma en términos de la magnitud del caudal pico (alcanzando su máximo absoluto en el sector NNW), disminuyendo esta respuesta en las zonas más cercanas o más alejadas a la sección de cierre; en tanto que en relación al tiempo de ocurrencia del pico, la respuesta más rápida se obtiene con núcleos de tormenta cercanos a dicha sección.

Los resultados de este trabajo pueden replicarse en otras cuencas de la zona, lo que permitiría eventualmente detectar comportamientos similares regionalmente escalables. Además permitirían identificar, en tareas de diseño de redes de monitoreo hidrometeorológico orientadas al reconocimiento de eventos extremos (redes de alerta), los sitios más apropiados para la ubicación de futuras estaciones pluviométricas/pluviográficas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbeito O.L. y von Müller N.B. Estudios de erosión cuenca experimental del río de la suela – reconocimiento y mapeo de la cubierta vegetal. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1981.

Beven K.J. Rainfall-Runoff modelling. The Primer. John Wiley & Sons, 2001.

Bustamante E. Cuencas piloto representativas y experimentales – programa de investigación en Argentina. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1978.

Caamaño G. y Dasso C. Relaciones paramétricas en el modelo exponencial infiltración - percolación generalizado. Incidencia de la distribución espacial de la lluvia. In Actas del XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, volumen 2, páginas 627–638. IAHR, Montevideo, Uruguay, 1990.

Caamaño G. y Zamanillo E. Desarrollo de modelos hidrológicos de simulación para planeamiento y proyecto. Informe Técnico, CONICOR, 1991.

Caamaño Nelli G. y Dasso C.M. Lluvias de diseño. Universitas, Córdoba, 2003. **Chow V.T., Maidment R., y Mays L.** Hidrología Aplicada. Mc Graw-Hill, 1994.

Dasso C.M. Cuenca piloto experimental del río de la suela: caracterización geométrica y topológica de su sistema de drenaje. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1983.

Eaton J.W., Bateman D., y Hauberg S. GNU Octave: a high-level interactive language for numerical computations. Free Software Foundation, www.octave.org, 2007.

Font P.M. y Bustamante E. El comportamiento del suelo frente a la erosión, valoración de los distintos índices de erosión en cuencas de carácter torrencial. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1983.

Jorquera, E. Desarrollo, calibración e implementación de un modelo hidrológico de simulación mixta para una cuenca de la región semiárida. Tesis de Grado, Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina. 2010.

Jorquera E., Weber J.F., Reyna S.M. Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As. 2012.

Neteler M. y Mitasova H. Open Source GIS: A GRASS GIS Approach, volumen 773 de The International Series in Engineering and Computer Science. Springer, New York, 2 edición, 2008. Ponce V.M. Engineering Hydrology. Principles and practices. Prentice Hall, 1994.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. y Saxton, K.E. Estimation of Soil Water Properties. Transactions of the ASAE 25(5): 1316 – 1330 pp. 1982.

Singh P.V. Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, 1996.

Stehli P.T., Weber J.F., y Jorquera E. Implementación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido de simulación de eventos. In Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As., 2012.

Velleux M., England J., y Julien P. Trex: Spatially distributed model to assess watershed contaminant transport and fate. Science of the Total Environment, 404(1):113–128, 2008.

Vieux B.E. Distributed hydrologic modeling using GIS, volumen 48. Water Science and Technology Library, 2004.

Weber J.F., Dasso C.M., y Jorquera E. Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. Mecánica Computacional, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 29:4013–4037, 2010.

REDUCCIÓN DE RIESGO DE INUNDACIÓN URBANA MEDIANTE INCREMENTO DE ÁREAS VERDES.

Erik Zimmermann¹ y Laura Bracalenti²

¹Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, CONICET. ²Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño, UNR. Rosario, Argentina. E-mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

Riobamba 245 bis. 2000 Rosario. TeleFax 0341-4808541

RESUMEN

Se describen efectos producidos por el incremento de las áreas verdes en espacios urbanos y periurbanos, como techos verdes, agricultura y silvicultura. Como efectos positivos que tienden a capturar el escurrimiento y mejorar el funcionamiento de la infraestructura de drenaje pluvial se reconocen los incrementos de la capacidad de intercepción y de la capacidad de almacenamiento e infiltración en el suelo.

Se presenta un método simple para estimar un indicador, basado en el coeficiente de esorrentía del método racional, que permita cuantificar la magnitud del impacto de áreas verdes en el escurrimiento pluvial de una cuenca urbana.

Finalmente, se propone una metodología para relacionar cambios en el indicador, conforme a diversos escenarios futuros de uso del suelo, con modificaciones del riesgo de inundaciones. Esta relación permite detectar que los pequeños aumentos de zonas verdes en los sistemas urbanos reducen significativamente el riesgo de inundaciones.

INTRODUCCIÓN

La escorrentía superficial constituye un componente del ciclo hidrológico que provoca alto impacto en las zonas urbanas. Para su evaluación se deben considerar las entradas por precipitación, los procesos de intercepción de la lluvia por parte del follaje y su infiltración en las áreas permeables. En función de cómo se den estos procesos resultarán los volúmenes de agua almacenados en el suelo que permitirán, luego, la evapotranspiración y la recarga de acuíferos.

En las ciudades, el aumento sostenido del exceso de precipitación -o precipitación efectiva- debido a la creciente impermeabilización del suelo, se ha convertido en una preocupación ambiental seria a la que se suma el incremento de las lluvias anuales, en determinadas áreas, debido a las consecuencias del calentamiento global.

La inundación repentina en estas áreas ante lluvias intensas por sobrecarga de los sistemas de drenaje, constituye un problema recurrente con impactos negativos de gran importancia social y económica. Pueden citarse las sucesivas inundaciones de barrios de la ciudad de Rosario provocados por los desbordes del arroyo Ludueña, tales como Empalme Graneros (1986), Nuevo Alberdi (2007), Fisherton (2012), etc.

Ante el aumento de la pavimentación y de las lluvias, el hidrograma de crecida en cuencas en proceso de urbanización se va modificando, presentando caudales pico más altos y tiempos de ascenso más cortos a medida que la impermeabilización del suelo aumenta. Las condiciones en base a las cuales se han diseñado los distintos elementos de la red de drenaje urbano (hidrograma de proyecto) se modifican significativamente debido a la impermeabilización del suelo, implicando un desajuste entre las demandas y la capacidad de respuesta del sistema. Frente a las tendencias crecientes de los procesos de urbanización, este problema se tornará más complejo y difícil de resolver si no se toman medidas inmediatas que puedan desarrollarse paralelamente a los mencionados procesos de pavimentación y edificación.

Dado que además, en estas áreas urbanas la adecuación necesaria de la infraestructura pluvial -conforme aumentan las precipitaciones y la impermeabilización- demanda grandes inversiones e intervenciones muchas veces inviables en sectores con alta densidad edilicia, es prioritario definir estrategias sinérgicas de solución -para éste y otros problemas ambientales asociados- que permitan reducir los volúmenes de salida por escorrentía a través de incrementar el agua interceptada, la absorbida por el soporte edáfico y la almacenada en receptáculos de diverso tipo.

Planificar y diseñar ciudades con mayores superficies permeables para reducir y retardar el volumen de agua a derivar a la red de drenaje, es una alternativa que puede implicar, además, otros muchos efectos positivos. Es un hecho probado que, frente a los conflictos que plantea el crecimiento urbano y la incertidumbre que genera el cambio climático, preservar áreas verdes en cantidad, calidad y conectividad adecuadas, es un modo de garantizar la prestación de servicios ecosistémicos indispensables para la vida en las ciudades.

De hecho, existe la tendencia en países que han alcanzado un alto grado de urbanización y desarrollo, no sólo a preservar, sino también a recuperar los espacios de la "infraestructura verde" o sistema espacial formado por relictos de naturaleza (bosques, pastizales, cuerpos de agua con poca incidencia antrópica, etc.), o creados (agroecosistemas, parques, plazas,

paseos y otros espacios con cobertura vegetal), que hacen posible y mejor la vida en las ciudades

Caso de la ciudad de Rosario

Los sectores ubicados al norte de la ciudad se encuentran afectados por frecuentes desbordes del arroyo Ludueña, y sus afluentes, los canales Salvat e Ibarlucea. La cuenca de aporte del mencionado arroyo se ubica al norte y al oeste del distrito y abarca un área de 700 km².

Existen evidencias físicas que indican que el nivel de protección ante inundaciones 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. La conjunción de factores tales 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 existen trabajos antecedentes que pusieron de manifiesto estos efectos (Zimmermann et al. 2001, Riccardi et al. 2008). 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.

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 del 40 se necesitaron 23 m² de sección transversal de conducciones cerradas para entubar, en aproximadamente 1400 m, el caudal de diseño del arroyo (caudal aproximado de diseño 100 m³/s)
- en la década del 60 se debió incrementar a 36 m² la capacidad de las conducciones debido a inundaciones con fuerte impacto en el barrio de Empalme Graneros de Rosario (caudal aproximado de diseño 150 m³/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 m² la capacidad de las conducciones cerradas con el agregado de una presa de retención para laminar el caudal máximo proveniente de casi un 60 % del área de la cuenca (caudal aproximado de diseño 300 m³/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 m³/s

A partir de 2008 se comenzaron a detectar nuevas urbanizaciones, barrios cerrados y abiertos, estos últimos de libre acceso lo cual implica la apertura de calles en predios antes utilizados para las actividades agrícola-ganaderas sin la instalación de cercos perimetrales. Los barrios abiertos son desarrollados por emprendedores inmobiliarios pero, en algún momento, pasan a depender respecto a las tareas de mantenimiento de las respectivas Comunas o Municipios. El incremento de la superficie a urbanizar solicitada año a año puede resumirse en la Tabla 1 (Dirección Provincial de Protección Urbana Contra Inundaciones, 2012).

Si se compara esta superficie futura a urbanizar (oficialmente declarada) con la actualmente urbanizada en la cuenca, que es de 4920 hectáreas, resulta que se está planteando un incremento para el Gran Rosario de un 76% en el mediano plazo.

Tabla 1. Evolución de las Solicitudes de Urbanización en Superficie a Urbanizar.

AÑO	SUPERFICIE (has)	SUPERFICIE ACUMULADA (has)
2008	206	206
2009	1170	1376
2010	1079	2455
2011	840	3295
OTROS	420	3715

El hecho es que el impacto presente y futuro de este incremento de la impermeabilización será muy dificultoso (además de injusto) de absorber mediante obras de infraestructura urbana debido a la densidad edilicia de los sectores que afectarían.

ESTRATEGIAS AFUP

La agricultura y la forestación urbana y periurbana (AFUP) implica una estrategia adecuada para la planificación de interfases periurbanas y el aprovechamiento de espacios vacantes intraurbanos, porque posibilitan la producción de alimentos sanos cerca de los espacios de consumo, trabajo genuino y espacios verdes diversos que garanticen una mejor calidad ambiental al futuro intraurbano.

Desde un punto de vista hidrológico, estos espacios verdes fomentan la infiltración y almacenamiento de agua de lluvia. Esto implica mantener la porosidad del suelo natural, aumentar la cubierta vegetal, especialmente en las zonas inundables para protegerlas de posibles urbanizaciones.

A través de la recuperación de suelos degradados compactados y puestos en producción agroecológica, se mejora significativamente sus propiedades básicas, tales como capacidad de infiltración e intercepción. Para favorecer la infiltración, la superficie pavimentada de calles, veredas, espacios públicos y techos de viviendas pueden convertirse a superficies verdes ("terrazas vegetadas" o "techos verdes").

Un "techo vegetado" consiste en la construcción de espacios verdes "contenidos" por encima de una estructura hecha por el hombre. Este espacio verde puede estar sobre o por debajo del nivel del suelo, pero en todos los casos, la vegetación no es nativa. La capacidad de retención de las cubiertas verdes puede dar lugar a cambios en los procesos hidrológicos. P. ej. Reducción de la escorrentía por la retención de la lluvia. La diferencia entre la humedad volumétrica inicial del sustrato y la que corresponde a la capacidad de campo se retiene en el medio poroso y luego regresa a la atmósfera mediante evapotranspiración. Experiencias realizadas por la EPA muestran que en modelos experimentales la precipitación anual capturada es de alrededor del 50 % al 95 % en la temporada de verano. Resultados experimentales muestran también una reducción de caudales pico de la escorrentía de aproximadamente el 50 % (EPA 2009).

MODELOS E INDICADORES PARA MEDIR IMPACTO POTENCIAL SOBRE EL ESCURRIMIENTO

Una metodología sencilla, que se puede utilizar para estimar el impacto de AFUP en la escorrentía urbana, consiste en la aplicación de la, actualmente utilizada, fórmula racional.

El método racional fue desarrollado por Mulvaney (1850), el cual describe por primera vez el concepto de tiempo de concentración. La idea fundamental introducida por Mulvaney fue la siguiente: dada una cuenca de área A con un tiempo de concentración T_C , si se produce una lluvia P con duración $D = T_C$ el caudal generado en el punto de salida será el máximo ya que estará aportando toda la cuenca.

El método plantea una proporcionalidad entre el caudal máximo y la intensidad de lluvia y puede expresarse como:

$$Q = C_u \cdot C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

donde: Q es el caudal de diseño (L^3 / T), C_u es el coeficiente de conversión de unidades, C es el coeficiente de escurrimiento (adimensional), i es la intensidad de la precipitación de diseño (L / T), y A es el área de drenaje de cuencas (L^2). El coeficiente de conversión de unidades, C_u , es necesario porque el producto iA , mientras que tiene unidades de L^3 / T , no es una unidad estándar en el sistema de unidades tradicionales.

El coeficiente de escurrimiento, C , es la variable que presenta mayor incertidumbre en su determinación, y representa una relación adimensional entre la lámina de escorrentía superficial generada por una determinada cuenca y la lámina de la precipitación. El coeficiente de escorrentía varía con la pendiente, condiciones de la superficie y de la cubierta vegetal y el tipo de suelo hidrológico. Las superficies que son relativamente impermeables como las calles y plazas de aparcamiento tienen coeficientes de escorrentía se aproximan uno. Las superficies con vegetación para interceptar la escorrentía superficial y las que permiten la infiltración de las precipitaciones tienen coeficientes de escorrentía más bajas (cercasas a 0). Todos los demás factores son iguales, una zona con una mayor pendiente tendrán más escorrentía de aguas pluviales y así un coeficiente de escorrentía más alto que una zona con una pendiente inferior. Los suelos que tienen un alto contenido de arcilla no permiten mucha infiltración y por lo tanto tienen coeficientes relativamente altos de escurrimiento, mientras que los suelos con alto contenido de arena tienen mayores tasas de infiltración y bajos coeficientes de escorrentía.

Este coeficiente se puede cuantificar en términos de tipo de suelo, pendiente topográfica y el tipo de cobertura. En el caso de que haya heterogeneidades en dichos parámetros, debe ser estimado mediante áreas de ponderación un valor representativo del coeficiente de escurrimiento. En este caso un C compuesto se puede definir como:

$$C_c = \frac{\sum C_i A_i}{\sum A_i} \quad (2)$$

donde C_c es el coeficiente de escorrentía compuesto, C_i son los coeficientes de escorrentía de áreas homogéneas y A_i son áreas individuales con C homogéneo. Esta información se puede estimar mediante imágenes satelitales, cartografía de suelos y modelos digitales del terreno.

La intensidad media máxima, i , se determina a partir de curvas Intensidad-Duración-Recurrencia (IDR) construidas con datos medidos en el sitio en estudio. Con dichas curvas se

adopta una duración de diseño igual al tiempo de concentración de la cuenca y para una recurrencia especificada se obtiene la intensidad media máxima.

El tiempo de concentración de una cuenca, t_c , se define como el tiempo que demora el sector más alejado de la cuenca en aportar a la sección de salida. El tiempo de concentración se calcula como la suma de los tiempos de escurrimiento mantiforme (no encauzado) y el tiempo de flujo canalizado (encauzado). Pueden existir varios recorridos posibles de flujo par a las diferentes áreas drenadas, el mayor tiempo de concentración de todos los tiempos, para los diferentes recorridos, es el tiempo de concentración crítico a adoptar para el área drenada.

Indicador para la evaluación de impactos

Teniendo en cuenta la descripción anterior, un indicador que permita evaluar el impacto de las zonas verdes en una urbanización determinada sería la variación del coeficiente de escorrentía. En consecuencia, la ecuación racional podría ser una herramienta útil para evaluar los diferentes escenarios, por ejemplo, la comparación de antes y después de cambios de usos de suelo. Podemos comparar situaciones con y sin AFUP, evaluando el impacto relativo entre ellos.

Los datos recogidos podrían ser utilizados para calcular la reducción en la escorrentía debido a una mayor ocupación de áreas AFUP en las cuencas urbanas. Se propone medir la "reducción en el coeficiente de escorrentía (ΔC) para el seguimiento de los impactos a nivel urbano (Zimmermann y Bracalenti 2012). Valores ΔC negativos para cualquier período de tiempo indican una disminución neta de la escorrentía (y consecuente reducción de riesgo de inundación), provocado por un aumento en la infiltración/ almacenamiento de la precipitación en esa superficie urbana. El indicador ΔC , en términos porcentuales, se puede calcular la de la siguiente manera:

$$\Delta C = 200 \frac{C_{t+1} - C_t}{C_{t+1} + C_t} \quad (3)$$

donde C_{t+1} = es el coeficiente de escurrimiento para escenarios futuros (hipotéticos) y C_t = el coeficiente para un escenario actual.

Escenarios a considerar

Escenario actual (línea de base).

Este estudio se realiza a través de la lectura de imágenes aéreas y/o satelitarias de buena resolución, verificando en campo las clases detectadas de acuerdo a parámetros preestablecidos. Las clases se definen considerando las características de uso, morfología y materialidad, en base a las cuales se les asignará un coeficiente de escorrentía (C).

Escenarios Hipotéticos

La información construida para el análisis del Escenario Actual es aplicable al análisis de los escenarios hipotéticos, variando los coeficientes de escorrentía según el tipo de cobertura planteada. Se construirán cartografías representativas de estos escenarios utilizando una representación que sistematice las diferentes clases de cobertura planteadas.

Escenario Hipotético 1

Considerando edificada la actual superficie “urbanizable” de acuerdo a índices máximos permitidos por normativa actual y diferentes coberturas verdes en las áreas “no urbanizables”.

Pueden definirse dos sub-escenarios posibles para las áreas “urbanizables”:

- 1) Sin terrazas vegetadas ni veredas que incorporen el verde;
- 2) Con terrazas vegetadas y veredas que incorporen el verde

Pueden definirse dos sub-escenarios posibles para las áreas “no urbanizables”:

- 1) Considerando usos y coberturas verdes actualmente existentes;
- 2) Considerando usos y coberturas AFUP (espacios verdes públicos, áreas inundables, laterales de carreteras y ferrocarriles).

Escenario Hipotético 2

Considerando edificada la totalidad del área estudiada (áreas “urbanas”, “urbanizables” y “no urbanizables”) de acuerdo a índices máximos permitidos por normativa actual; a excepción de las áreas verdes públicas previstas por Código Urbano y Reglamento de edificación y las áreas de libre escurrimiento fijadas por normativa de inundación (si existiesen cursos de agua en el área estudiada).

RELACIÓN ENTRE LA REDUCCIÓN DE C Y LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

Las áreas verdes urbanas mejoran el aire, el agua y los recursos del suelo al absorber contaminantes del aire, incrementar las áreas de captación y almacenamiento de agua y estabilizar los suelos. Los bosques urbanos actúan como amortiguadores de la temperatura -- al dar sombra en el verano y detener el viento en el invierno-- además de reducir la contaminación por ruido y los niveles de CO₂ y proporcionar hábitat para la fauna silvestre. Los beneficios económicos incluyen madera y productos agrícolas, así como una variedad de productos forestales no maderables, tales como artículos artesanales y miel de abejas. Además de éstos servicios ambientales que brindan los espacios verdes, desde un punto de vista específicamente hidrológico y de la protección de inundaciones, es interesante analizar en qué grado generan el beneficio, es decir, cuantificar el beneficio.

Es importante definir la magnitud que reduciría el riesgo de inundación a partir de un incremento de la permeabilidad de la superficie urbana al incorporar más espacios “verdes”.

Usando la ecuación racional, el caudal de diseño para un espacio sin AFUP, en el tiempo t (escenario actual, por ejemplo) puede cuantificarse como:

$$Q_t = C_u \cdot C_t \cdot i_t \cdot A \quad (4)$$

donde Q_t es el caudal de diseño, C_t es el coeficiente de escorrentía e i_t es la intensidad de la lluvia de diseño, todas las variables en el tiempo t. El resto de variables se definió antes. La intensidad i_t tiene una duración equivalente al tiempo de concentración (T_c) de la cuenca, en el tiempo t.

Incluyendo áreas verdes por actividades AFUP (escenario hipotético, por ejemplo), en el tiempo t +1, el caudal de diseño será:

$$Q_{t+1} = C_u \cdot C_{t+1} \cdot i_{t+1} \cdot A \quad (5)$$

En este caso, la intensidad de lluvia tiene una duración equivalente al tiempo de concentración de la cuenca en el tiempo $t + 1$. Incluyendo las zonas verdes, el T_c será mayor que el mismo en situación sin AFUP. Despreciando esta situación, el caudal de diseño en la situación con AFUP será menor que el que corresponde al momento t , debido a que el coeficiente de escorrentía C_{t+1} será menor que C_t . En la situación en el tiempo t , la intensidad de lluvia, se corresponde con un nivel de protección determinado (período de retorno T_t). De acuerdo con Kieffer y Chu (citado por Chow et al. 1988), en el marco de un modelo empírico que ajusta una curva IDR, la intensidad de lluvia se puede expresarse como:

$$i = \frac{g \cdot T^m}{d^e + f} \quad (6)$$

donde T es el período de retorno, d es la duración y g , m , e y f son constantes que dependen de las características geográficas locales.

Podría pensarse la situación siguiente: Con la infraestructura de drenaje actual, supuestamente diseñada para el caudal Q_t , ¿en qué magnitud se reduce el riesgo de inundaciones urbanas (se reduce en probabilidad de excedencia P , o aumenta el período de retorno T) ante el aumento de áreas verdes y la consecuente disminución del coeficiente de escorrentía C_{t+1} ?

En virtud de las consideraciones anteriores, podemos decir que:

$$Q_t = C_u \cdot C_{t+1} \cdot i'_{t+1} \cdot A \quad (7)$$

donde i'_{t+1} es la intensidad de la lluvia, asociada a un período de retorno T_{t+1} que en la nueva situación $t+1$ genera la descarga Q_t .

Igualando las ecuaciones (5) y (7) y teniendo en cuenta la ecuación (6), se tiene:

$$Q_t = C_u \cdot C_{t+1} \frac{g T_{t+1}^m}{d^e + f} \cdot A = C_u \cdot C_t \frac{g T_t^m}{d^e + f} \cdot A \quad (8)$$

Simplificando términos de la igualdad, tenemos:

$$\left(\frac{C_{t+1}}{C_t} \right)^{1/m} = \frac{T_t}{T_{t+1}} = \frac{P_{t+1}}{P_t} \quad (9)$$

donde P_t y P_{t+1} son las probabilidades de excedencia de la intensidad de lluvia en las situaciones t y $t+1$, respectivamente. Si graficamos la ecuación (9), se tiene (Fig. 1):

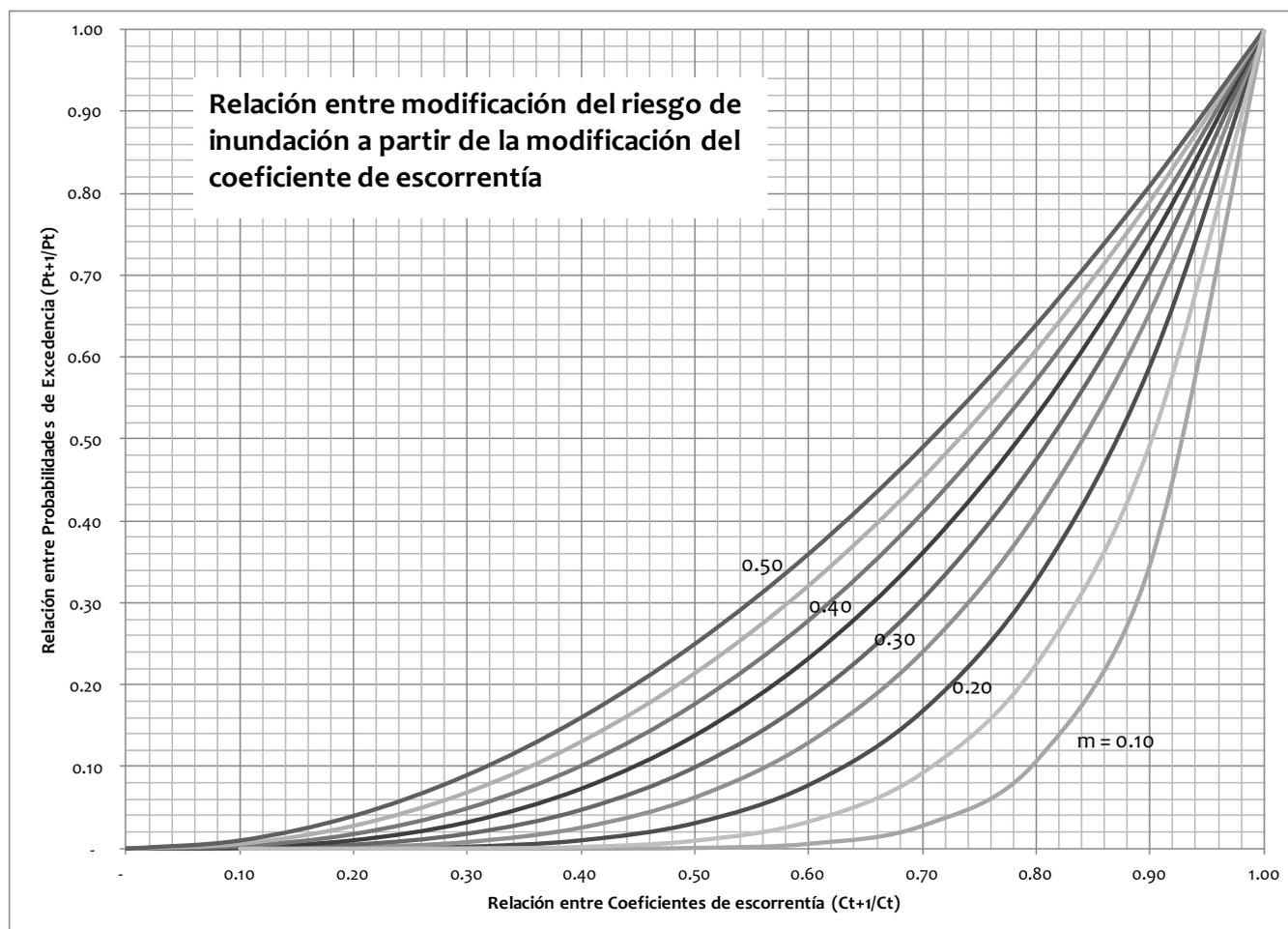


Figura 1. Relación entre cambios del riesgo de inundación y cambios del coeficiente de escorrentía.

Mediante pasos algebraicos se puede demostrar que:

$$\frac{C_{t+1}}{C_t} = \frac{200 + \Delta C}{200 - \Delta C} \quad (10)$$

Por ejemplo, el ajuste de la ecuación 6 para los datos de lluvia de la ciudad de Rosario (Argentina , 32 ° 57 'S, 60 ° 41' W) , es $m = 0,122$. El promedio regional del parámetro m es 0.18 (Zimmermann 2013). Utilizando la Figura 1, una pequeña reducción del coeficiente de escorrentía del 5 % provocaría una reducción de probabilidad de 30 % ($P_{t+1} / P_t = 0,70$). Ampliando el ejemplo, puede interpretarse como : dados , en el diseño urbano de drenaje , una probabilidad de excedencia del 20 % (tiempo de retorno de 5 años), con una reducción del coeficiente de escorrentía del 5%, el nivel de protección alcanzaría el valor $0,70 * 20 \% = 14$ % de probabilidad de excedencia (nuevo tiempo de retorno aproximado 7 años) .

CONCLUSIONES

Se analizan los efectos potenciales sobre el drenaje de aguas pluviales urbanas y suburbanas a través de la ocupación del territorio con actividades de agricultura orgánica, silvicultura y techos vegetados. La reducción de la escorrentía se debe a diferentes mecanismos de captura entre los que se incluyen: el aumento de la infiltración en el suelo recuperado, el aumento de la interceptación causado por el aumento de la cubierta vegetal, retención y posterior evapotranspiración, de lluvia captada por techos verdes.

En términos generales, se espera una reducción de la escorrentía pluvial urbana, lo que resulta en mejoras sustanciales en el sistema de drenaje, cuya infraestructura es muy difícil y onerosa de modificar.

Se propone un indicador, basado en el coeficiente de escurrimiento del método racional, para estimar el impacto en el drenaje pluvial ante cambios de uso del suelo, en particular, la reducción del mismo mediante un incremento de las áreas verdes.

Finalmente, se presenta una metodología para relacionar los cambios en el indicador propuesto con los consecuentes cambios en el riesgo de inundación. Esta última relación permite detectar que pequeños aumentos de zonas verdes en los sistemas urbanos reducen significativamente el riesgo de inundaciones.

REFERENCIAS

- Chow , Ven Te, David R. Maidment , y Larry W. Mays** (1988). Applied Hydrology. McGraw - Hill.
- Dirección Provincial de Protección Urbana Contra Inundaciones** (2012). Informe interno período 2008-2011. Secretaría de Aguas, MASPyMA, Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina.
- EPA - Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos** (2009) Azoteas Verdes para el Control de la escorrentía de aguas pluviales . EPA/600/R-09/026 | febrero 2009 | [www.epa.gov / ord](http://www.epa.gov/ord)
- Riccardi G., Zimmermann E., Basile P., Stenta H., Scuderi C., Garcia M. y Rentería J. ,** (2008), "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.
- 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, Erik y Laura Bracalenti** (2012). Escorrentías pluviales y Regulación del Suelo en el municipio de Rosario. VI Jornadas de Ciencia y Tecnología 2012. Secretaría de Ciencia y Técnica. Universidad Nacional de Rosario.
- Zimmermann Erik** (2013) Ajuste de funciones empíricas a las IDR Regionales. Comunicación personal. Departamento de Hidráulica. FCEIA. UNR.