

CONDICIONES ANTECEDENTES PARA LA TORMENTA DE DISEÑO EN EL ÁREA DEL GRAN ROSARIO.

Erik D. Zimmermann¹, Pedro A. Basile, Carolina López, Gerardo Riccardi², Hernán Stenta, Carlos Scuderi y Juan P. Rentería

Departamento de Hidráulica. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.
Universidad Nacional de Rosario. ¹ídem y CONICET. ² ídem y Cons. Invest. UNR.
Riobamba 245 bis (2000) Rosario. Santa Fe. Argentina, e-mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN:

Con el fin de estimar las condiciones antecedentes a las tormentas registradas se consideró un índice de precipitación antecedente (IPA), cuyo parámetro de decaimiento, variable estacionalmente, reflejó en buena medida la extracción de humedad del perfil del suelo mediante evapotranspiración.

Se consideró una profundidad radicular representativa de las coberturas existentes y una variación del IPA acotada en el entorno de la humedad del perfil para punto de marchitez permanente y saturación. Esto permite asimilar el procedimiento, originalmente de base empírica, a un balance hídrico simplificado. Incluso el valor del IPA refleja el grado de saturación cuando se lo relaciona con los límites de humedad físicos. Se determinaron valores de IPA para los días previos a las tormentas máximas anuales en cada estación considerada (6 estaciones del sur santafecino con períodos de hasta 70 años de datos) y se realizó un análisis estadístico de IPA, considerando esta variable con una distribución probabilística conjunta con la precipitación de diseño. Considerando las tormentas de gran magnitud, superiores a los 200 mm, se seleccionó una muestra de IPA para dichas tormentas y se consideró su distribución marginal.

Se han considerado para las lluvias de 10 años y 100 años de recurrencia dos situaciones de condiciones antecedentes para corridas preliminares del modelo de transformación lluvia-caudal a utilizar: (a) una moderada asociada a una probabilidad de excedencia del 50% y (b) una severa asociada a una probabilidad de excedencia del 5%.

La metodología propuesta constituye una herramienta simple y práctica para la estimación de las condiciones antecedentes y éstas se han vinculado estadísticamente a la variable precipitación considerando su distribución en forma conjunta para analizar la probabilidad de ambos sucesos de manera simultánea.

PALABRAS CLAVE: humedad antecedente, tormenta de diseño, probabilidad conjunta

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la respuesta hidrológica de una cuenca es necesario para distintos fines, desde la estimación de los caudales generados por las tormentas hasta la evaluación del impacto que producen los cambios de uso del suelo en el ciclo del agua. La respuesta hidrológica de una cuenca está determinada por una serie de factores que interactúan entre sí y regulan los procesos hidrológicos. Los factores más relevantes suelen ser la irregularidad espacial y temporal de las precipitaciones, la topografía, la variabilidad espacial de las características superficiales y propiedades físicas de los suelos, la presencia y densidad de la cubierta vegetal y la humedad antecedente (Gómez Plaza, 2000).

En un trabajo general realizado por los autores, e instrumentado mediante un convenio entre la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura y el Ministerio del Agua, Servicios Públicos y Medio Ambiente (provincia de Santa Fe), se persigue como objetivo general la cuantificación de la respuesta hidrológica de cuencas que vierten sobre éjido urbano de Rosario (arroyos Saladillo y Ludueña). Esta cuantificación está expresada en términos de caudales y niveles de agua, en escenarios actual y con proyección futura y ante la presentación de un evento lluvioso con una recurrencia asociada.

Existen evidencias físicas que indican que la conjunción de factores tales como importantes urbanizaciones, 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 (Zimmermann 1995, Zimmermann *et al.* 2001)

Desde otra perspectiva, esto 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 y disminución de nivel de protección son los sucesivos aumentos de la capacidad de descarga del arroyo Ludueña en el río Paraná que debieron y deberán llevarse cabo para mitigar inundaciones (Riccardi *et al.* 2008)

Una vez definidas la precipitación de diseño y su distribución temporal, en este trabajo se persigue el objetivo de asociar la humedad antecedente de la tormenta con la generación de esorrentía en las cuencas analizadas. El estudio de precipitaciones y condiciones antecedentes tiene por objetivo determinar lluvias netas de diseño para la alimentación del modelo hidrológico-hidráulico físicamente basado y espacialmente distribuido CTSS8 (Riccardi, 2000), que permite obtener valores de alturas y caudales en las secciones de interés.

MATERIALES Y METODOS

La cuenca del arroyo Ludueña linda al sur y al oeste con la cuenca del arroyo Saladillo, al norte con el la del A° San Lorenzo y engloba parte del casco urbano de la ciudad de Rosario, desembocando en el río Paraná. Tiene un área de aporte de aproximadamente 800 km², una pendiente media de 1,4 por mil y su cabecera se ubica en la cota 70 IGM. El arroyo fue canalizado hasta 10 km aguas arriba de su desembocadura, finalizando esta obra en el año 1964. Al ingresar en la ciudad de Rosario es entubado

hasta 500 m. aguas arriba de su descarga en el río Paraná.

A los efectos de cumplir con el objetivo propuesto se definieron dos tipos de escenarios de precipitaciones. El primero de ellos consistió en definir lluvias frontales, las cuales pueden alcanzar hasta cinco días de duración y se distribuyen siguiendo un patrón de comportamiento espacial no uniforme en la cuenca.

La información de precipitaciones diarias registradas en distintas estaciones y utilizadas para realizar el estudio estadístico de lluvias frontales se resume en el cuadro siguiente:

Tabla 1. Series de Lluvias Diarias

Nombre Estación	Fuente de los datos	Período de observación
Rosario	SMN- Rosario Aeropuerto	1935-2007
Álvarez	Cooperativa Agrícola	1996-2007
Casilda	INTA-Agencia de Extensión Rural Casilda	1962-2007
Bombal	Estación ExFFCC Mitre (1933-1984) Cooperativa Agrícola(1986-2007)	1933-2007
Maizales	Estación -Ferrocarril	1935-1984
Chabás	Registro- Productor	1970-2007

Por otra parte, para alimentar al modelo, se determinó además una precipitación de tipo convectiva. La misma fue derivada a partir de una curva de regresión ajustada a las intensidades máximas observadas en la región. Las localidades y años en los cuales se verificaron las lluvias convectivas consideradas para tales efectos se sintetizan en el siguiente cuadro:

Tabla 2. Eventos convectivos destacados

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

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

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

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

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

donde k_{ver} y k_{inv} son los coeficientes de decaimiento extremos correspondientes a las estaciones de verano e invierno, respectivamente.

El valor del IPA se considera un parámetro representativo de un estado de humedad antecedente de la cuenca expresado en forma continua en el tiempo. El coeficiente de decaimiento, variable durante el año, trata de reproducir las extracciones por evapotranspiración variables estacionalmente debido a la variabilidad de las condiciones de insolación y estado de humedad ambiente. En la Figura 1 se muestra la variación del mismo a lo largo del año.

Para considerar las condiciones de almacenamiento en el suelo se han definido los siguientes parámetros característicos de las cuencas vecinas a la ciudad de Rosario (sur de Santa Fe):

Profundidad radicular cultivo	: 700 mm
Humedad volumétrica capacidad de campo, θ_{CC}	: 0.36
Humedad volumétrica punto marchitez permanente, θ_{PMP}	: 0.19
Humedad volumétrica saturación, θ_{SAT}	: 0.48
Lámina equivalente capacidad de campo, R_{CC}	: 252 mm
Lámina equivalente punto marchitez perman., R_{PMP}	: 133 mm
Lámina equivalente saturación, R_{SAT}	: 336 mm

Los coeficientes de decaimiento se adoptaron como: $k_{ver} = 0.980$ y $k_{inv} = 0.995$. Se adoptaron de tal forma porque, por ejemplo, para una condición frecuente de humedad IPA = 250 mm, en verano implica un decaimiento de 5 mm y en invierno de 1.3 mm diarios, aproximadamente equivalentes a una tasa media diaria de evapotranspiración para dichas estaciones, según registros de la estación agrometeorológica de Zavalla (UNR).

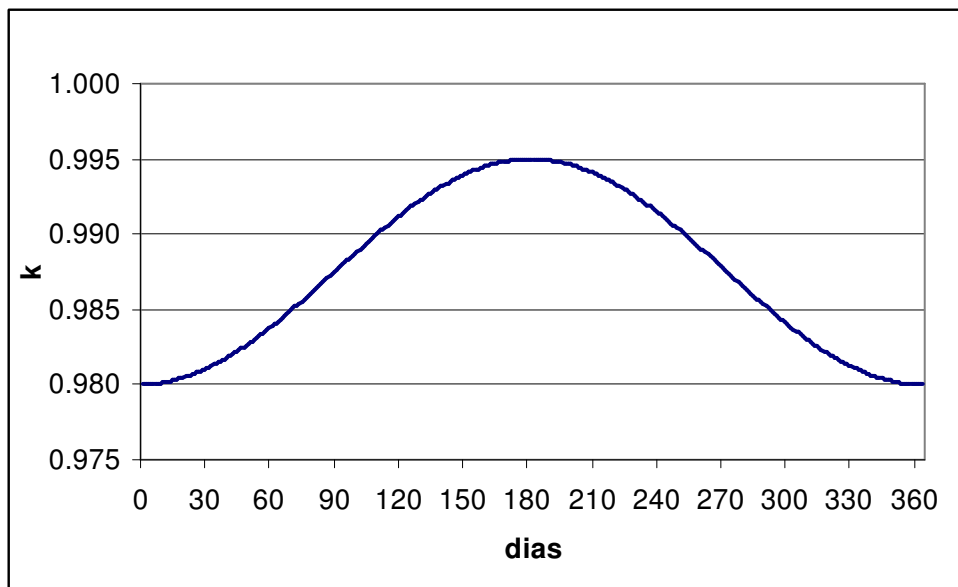


Figura 1. Variación del coeficiente k a lo largo del año.

Con las series de precipitaciones registradas en las estaciones detalladas del Cuadro 1, se calculó el IPA día a día, con las ecuaciones precedentes. En las Figuras 2 y 3 se muestra la evolución del IPA, en el período con que se cuenta con información pluviométrica, para las estaciones de Rosario y Alvarez, respectivamente.

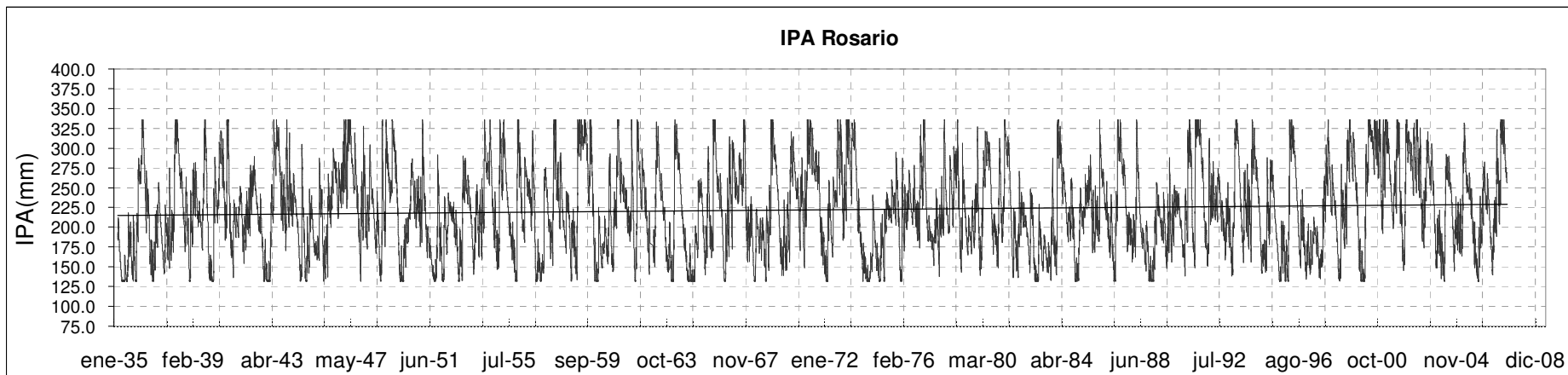


Figura 2 Evolución temporal del IPA. Estación Rosario.

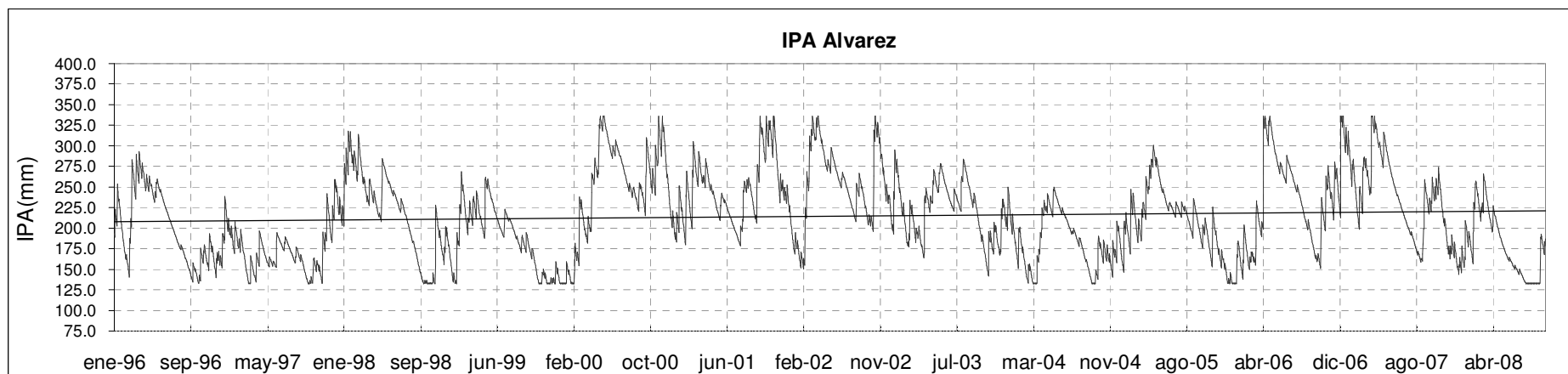


Figura 3. Evolución temporal del IPA. Estación Alvarez.

Índice IPA y parámetros asociados a modelos de pérdidas

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

$$S_e = \frac{IPA_n - R_{PMP}}{R_{SAT} - R_{PMP}} \quad [3]$$

donde S_e es el grado de saturación efectiva y los demás términos han sido definidos previamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Seguidamente, y con el propósito de estimar las condiciones antecedentes a las tormentas de mayores láminas, se seleccionaron las mayores de duración 5 días, para cada año de los registros en las seis estaciones. Identificadas éstas tormentas máximas anuales se extrajo el valor del IPA correspondiente al día previo del comienzo de cada tormenta.

La determinación del IPA para el día previo a las tormentas máximas anuales seleccionadas para la estación Alvarez, se muestran en la Tabla 3, a manera de ejemplo. El mismo procedimiento fue aplicado para las estaciones Casilda, Bombal, Rosario, Maizales y Chabas.

Tabla 3. IPA antecedente a tormentas máximas. Estación Alvarez.

Año	P. máxima: 5 días (mm)	Fecha	IPA (mm)	índice sat Se
1996	103.0	22/02/96	182	0.24
1997	87.0	19/11/97	172	0.19
1998	103.0	13/11/98	133	0.00
1999	80.0	23/04/99	188	0.27
2000	142.0	12/05/00	318	0.91
2001	125.0	28/02/01	199	0.33
2002	130.0	13/10/02	196	0.31
2003	84.0	03/12/03	171	0.19
2004	64.0	30/01/04	151	0.09
2005	82.0	29/01/05	168	0.17
2006	210.0	16/12/06	213	0.39
2007	262.0	25/03/07	243	0.54
Promedio	122.7		194.4	0.3
<i>Desvío estándar</i>	58.7		48.2	0.2

Análisis estadístico de IPA

En la Figura 4 se observa en abscisas los montos de precipitación máxima de 5 días de duración para cada una de las estaciones analizadas y, en ordenadas, los valores del IPA precedente a dichas tormentas, para el conjunto de estaciones pluviométricas analizadas.

Como se observa en la Figura, no existe una marcada correlación entre ambas variables, y su coeficiente de determinación lineal fue muy bajo. No obstante hay que considerar que el coeficiente de determinación no indica que las variables son probabilísticamente independientes, sino que sólo establece que el grado de correlación lineal entre ambas es muy bajo.

Teniendo en cuenta esto, se consideró la dependencia estadística entre P e IPA y su correspondiente distribución probabilística conjunta. Por otra parte, los estudios estadísticos para la lámina de diseño señalan valores cercanos a los 200 mm. Como la intención es definir la función de distribución de probabilidad del IPA para las precipitaciones de diseño, se consideró la distribución marginal comprendida por las muestras de IPA para precipitaciones superiores a los 200 mm (Figura 4).

La muestra confeccionada se detalla en la Tabla 5, donde además se ha calculado la frecuencia experimental de Hazen, y ajustado el modelo probabilístico de Gumbel, considerando probabilidad de ocurrencia y probabilidad de excedencia (Figura 5). Para verificar la bondad de ajuste se aplicó el test de Kolmogorov-Smirnov, aceptando la hipótesis para la distribución ajustada. El modelo de Gumbel fue el mejor ajustado entre otras distribuciones que fueron testeadas (Weibull, Gamma, Pearson, Normal y Log-Normal)

En la Tabla 6 se muestran los valores de IPA y Se para diferentes probabilidades de excedencia y la ley de distribución de Gumbel.

Deben interpretarse estos resultados con un carácter regional, dado que las muestras de IPA que se utilizaron para el estudio probabilístico corresponden a distintas estaciones.

Análisis de condiciones antecedentes para las lluvias de diseño

Se han considerado para las lluvias de 10 años y 100 años de recurrencia dos situaciones de condiciones antecedentes para corridas preliminares del modelo de transformación lluvia-caudal a utilizar: (a) una moderada, asociada a una probabilidad de excedencia del 50% y (b) una severa, asociada a una probabilidad de excedencia del 5%.

En las Tablas 7 a 10 se muestran las combinaciones entre recurrencias de P (10 y 100 años) y de IPA (moderada y severa) para la construcción de los hietogramas netos.

Tabla 5. Ajuste de modelo probabilístico al IPA.

n	IPA	F.Exp. Hazen	F(x)	P(x)	P(x)-F(x)
1	336.0	0.01613	0.969437068	0.030562932	0.014433900
2	313.7	0.04839	0.948672352	0.051327648	0.002940551
3	293.2	0.08065	0.917765845	0.082234155	0.001588994
4	283.7	0.11290	0.898207478	0.101792522	0.011110704
5	277.8	0.14516	0.883747901	0.116252099	0.028909191
6	268.6	0.17742	0.857471118	0.142528882	0.034890473
7	265.8	0.20968	0.848497944	0.151502056	0.058175363
8	263.9	0.24194	0.842118046	0.157881954	0.084053530
9	248.2	0.27419	0.779137604	0.220862396	0.053331153
10	244.6	0.30645	0.761782423	0.238217577	0.068234036
11	242.6	0.33871	0.752128593	0.247871407	0.090838270
12	212.7	0.37097	0.560201939	0.439798061	0.068830319
13	211.0	0.40323	0.546459074	0.453540926	0.050315119
14	210.0	0.43548	0.538715045	0.461284955	0.025801084
15	209.4	0.46774	0.534373586	0.465626414	0.002115521
16	208.3	0.50000	0.525421422	0.474578578	0.025421422
17	201.7	0.53226	0.471047040	0.528952960	0.003305104
18	198.1	0.56452	0.439923696	0.560076304	0.004439825
19	195.9	0.59677	0.421238238	0.578761762	0.018012432
20	194.3	0.62903	0.407926775	0.592073225	0.036959033
21	181.3	0.66129	0.294708095	0.705291905	0.044001583
22	179.2	0.69355	0.276646103	0.723353897	0.029805510
23	175.7	0.72581	0.247436980	0.752563020	0.026756568
24	170.0	0.75806	0.202482856	0.797517144	0.039452628
25	161.3	0.79032	0.140021190	0.859978810	0.069656229
26	160.1	0.82258	0.132669828	0.867330172	0.044749527
27	159.6	0.85484	0.129172856	0.870827144	0.015988435
28	152.2	0.88710	0.087013817	0.912986183	0.025889409
29	144.9	0.91935	0.054947569	0.945052431	0.025697592
30	138.7	0.95161	0.034806163	0.965193837	0.013580934
31	133.0	0.98387	0.021316579	0.978683421	0.005187547
Promedio	214.1			Dif. Máxima =	0.090838270
<i>Desvío Std</i>	<i>54.0</i>			Dcritica =	0.244263211
α	0.0			D<Dc-----OK	
x0	189.8				

Tabla 6. Valores de IPA y Se para diferentes probabilidades de excedencia (Dist. Gumbel)

P(x)	IPA (Gumbel)	índice Saturación Se
0.5	205.2	0.36
0.2	252.9	0.59
0.1	284.5	0.75
0.05	314.7	0.90
0.02	354	1.00
0.01	383.3	1.00

Tabla 7. Evolución temporal de IPA moderado y Se para lluvias de R=10 años.

t(hs.)	P 10 años(mm)	IPA(moderado)	Se
		205.2	0.36
0-24	14.7	217.8	0.42
24-48	30.2	245.9	0.56
48-72	140	383.4	1.00
72-96	18.1	397.7	1.00
96-120	11.8	405.5	1.00

Tabla 8. Evolución temporal de IPA moderado y Se para lluvias de R=100 años.

t(hs.)	P 100 años(mm)	IPA(moderado)	Se
		205.2	0.36
0-24	24.3	227.4	0.47
24-48	46.6	271.8	0.68
48-72	202.4	471.5	1.00
72-96	26.8	493.5	1.00
96-120	15.8	504.4	1.00

Tabla 9. Evolución temporal de IPA severo y Se para lluvias de R=10 años.

t(hs.)	P 10 años(mm)	IPA(severo)	Se
		314.7	0.90
0-24	14.7	326.3	0.95
24-48	30.2	353.2	1.00
48-72	140	489.7	1.00
72-96	18.1	502.9	1.00
96-120	11.8	509.6	1.00

Tabla 10. Evolución temporal de IPA severo y Se para lluvias de R=100 años.

t(hs.)	P 100 años(mm)	IPA(severo)	Se
		314.7	0.90
0-24	24.3	335.9	1.00
24-48	46.6	379.1	1.00
48-72	202.4	577.7	1.00
72-96	26.8	598.7	1.00
96-120	15.8	608.5	1.00

CONCLUSIONES

Con el fin de estimar las condiciones antecedentes a las tormentas registradas se consideró un índice de precipitación antecedente (IPA), cuyo parámetro de decaimiento, variable estacionalmente, reflejó en buena medida la extracción de humedad del perfil del suelo mediante evapotranspiración. El IPA propuesto está físicamente acotado entre los límites de capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Se determinaron valores de IPA para los días previos a las tormentas máximas anuales en cada estación considerada y se realizó un análisis estadístico de IPA, considerando esta variable con una distribución probabilística conjunta con la precipitación. Considerando las tormentas de gran magnitud, superiores a los 200 mm, se seleccionó una muestra de IPA para dichas tormentas y se consideró su distribución marginal. Se fijaron dos condiciones antecedentes, una moderada asociada a una probabilidad de excedencia del 50% y una severa asociada a una probabilidad de excedencia del 5%.

La metodología propuesta constituye una herramienta simple y práctica para la estimación de las condiciones antecedentes y éstas se han vinculado estadísticamente a la variable precipitación para analizar la probabilidad de ambos sucesos de manera simultánea.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Gómez Plaza, Antonio.** (2000) *Variabilidad espacio-temporal del contenido de humedad del suelo en una zona mediterránea semiárida. Efectos de las condiciones antecedentes en la respuesta hidrológica.* Tesis Doctoral. Departamento de Proyectos y Planificación Rural. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. 185p.
- Riccardi, Gerardo A.** (2000). *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos.* Tesis Doctoral, FCEFyN, UNC, Córdoba.
- Riccardi Gerardo A., Zimmermann, Erik D., Basile Pedro A., Stenta Hernán R., Rentería Juan P., Mancinelli Adelma M., Scuderi Carlos M.** (2008). *“Rehidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las Cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo”* Informe técnico, convenio entre Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura y Ministerio del Agua, Servicios Públicos y Medio Ambiente (provincia de santa fe).
- Zimmermann, Erik D.** (1995) *"Implicancias Antrópicas en los Procesos de Inundaciones de Areas Llanas"*. Jornadas Regionales Interdisciplinarias sobre Ambiente, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fe, Argentina.
- Zimmermann, Erik D., 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. Argentina.

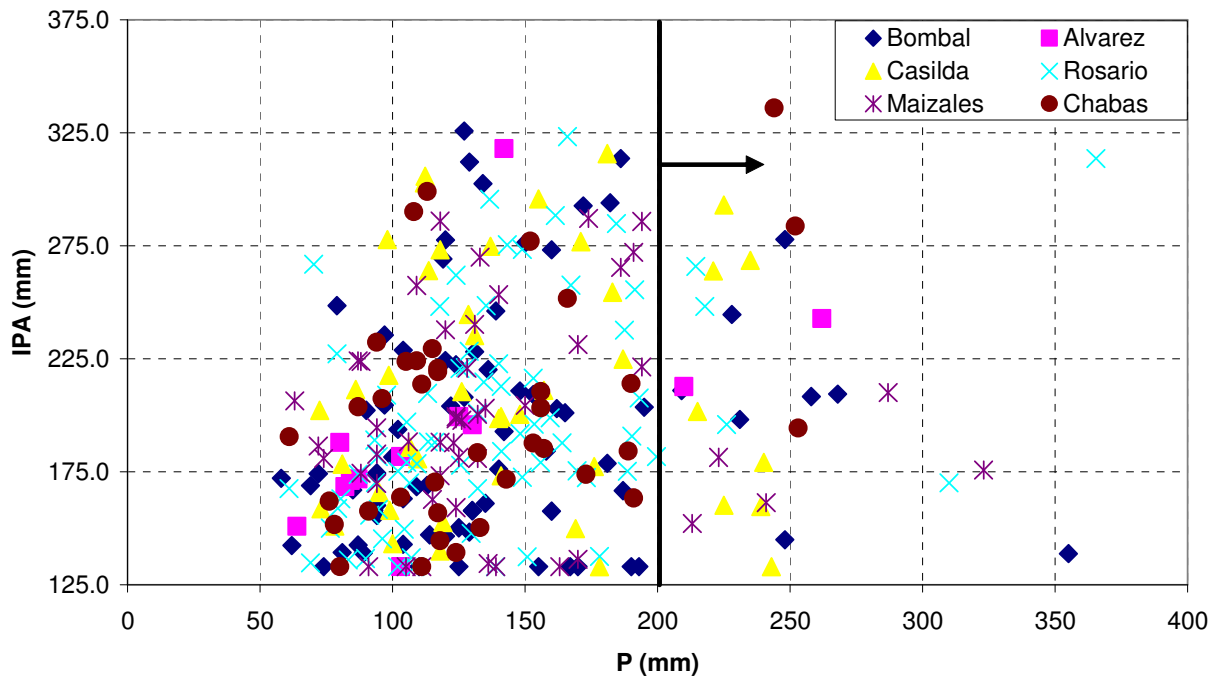


Figura 4. IPA antecedente vs. P max anual.

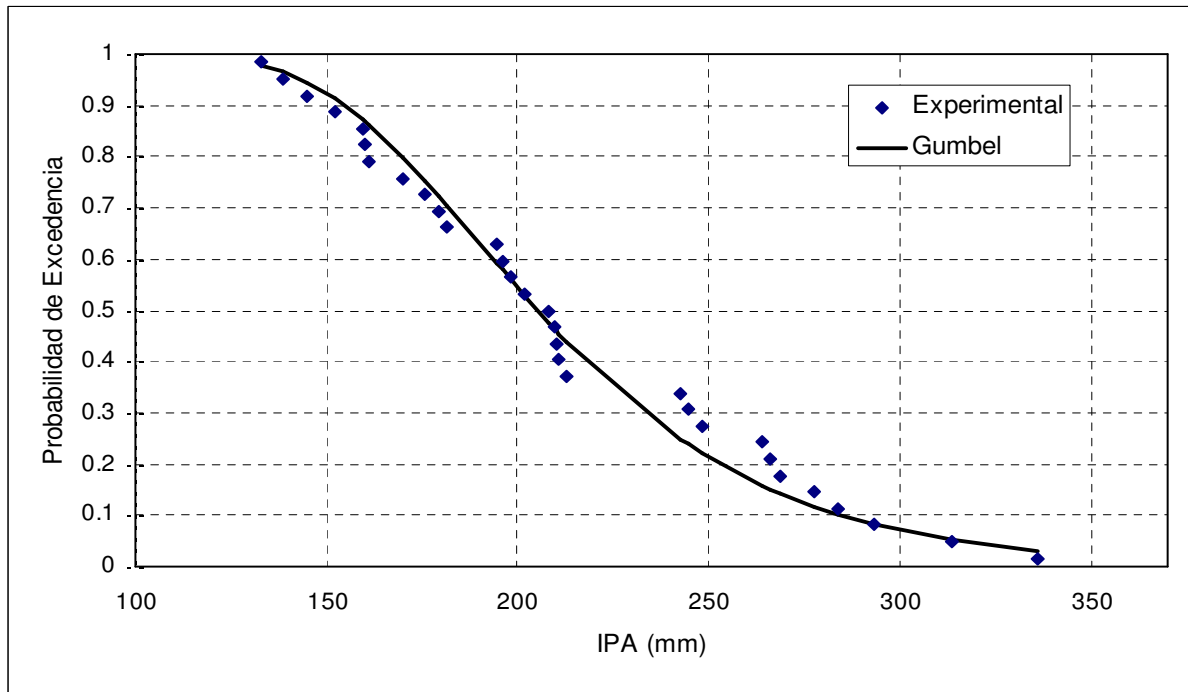


Figura 5. Probabilidad de excedencia para IPA (condicionado a que P > 200 mm).