

ANEXO IV
ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES

INDICE GENERAL

1 INTRODUCCION	4
2 DECAIMIENTO ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN.....	5
2.1 Introducción	5
2.2 Curvas Altura-Área-Duración (AAD)	6
2.3 Coeficiente de Decaimiento Areal (CDA).....	7
2.4 Calibración de ecuaciones de atenuación.....	7
2.5 Elección de estaciones y eventos ha analizar.....	8
2.6 Patrones de Isohietas	8
2.7 Determinación de los coeficientes de decaimiento areal por eventos.....	19
3 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE PRECIPITACIONES	22
3.1 Introducción	22
3.2 Análisis de tendencias observadas en las series	31
4 ANALISIS REGIONAL DE LAS PRECIPITACIONES	32
5 CONCLUSIONES	35

INDICE DE FIGURAS

Figura IV.1. Reducción de altura de lluvia puntual a media areal de la cuenca (según ecuación polinómica de Leclerc y Schaake, 1972).....	6
Figura IV.2. Ubicación de las estaciones pluviométricas empleadas en el análisis de dist. espacial	11
Figura IV.3. Mapa de Isohietas evento ocurrido en Junio 1973.....	12
Figura IV.4. Mapa de Isohietas evento de Marzo de 1977.....	13
Figura IV.5. Mapa de Isohietas evento registrado en Abril de 1981.....	14
Figura IV.6. Mapa de Isohietas evento registrado en Febrero de 1998.....	15
Figura IV.7. Mapa de Isohietas evento registrado en Abril de 2002.....	16
Figura IV.8. Mapa de Isohietas del evento Abr/May 2003.	17
Figura IV.9. Mapa de Isohietas del evento ocurrido en Marzo de 2005.	18
Figura IV.10. Coeficientes de decaimiento areal (CDA) de los eventos analizados.....	19
Figura IV.11. Comparación de los ajustes realizados con el Modelo CoDA.....	21
Figura IV.12. Mapa de ubicación de estaciones pluviométricas.	23
Figura IV.13. Recurrencia de láminas precipitada con duración 1 día.....	24
Figura IV.14. Recurrencia de láminas precipitada con duración 2 días.....	24
Figura IV.15. Recurrencia de láminas precipitada con duración 3 días.....	25
Figura IV.16. Distribución espacial de la tormenta de abril de 2003.....	26
Figura IV.17. Curva de decaimiento espacial de la tormenta de abril de 2003, con indicación de los puntos deducidos del mapa de isohietas y el ajuste de la función potencial.....	28

INDICE DE TABLAS

Tabla IV. 1. Resumen de las estaciones y eventos analizados	9
Tabla IV. 2. Parámetros de los ajustes realizados	21
Tabla IV. 3. Precipitaciones diarias máximas anuales consideradas en el análisis.....	25
Tabla IV. 4. Tiempos de retorno de una lámina 207 mm en distintas estaciones de la cuenca inferior del río Salado.....	28
Tabla IV. 5. Precipitaciones Máximas Anuales en mm (duración 1 día).....	29
Tabla IV. 6. Precipitaciones Máximas Anuales en mm (duración 2 días)	30
Tabla IV. 7. Precipitaciones Máximas Anuales en mm (duración 3 días)	30
Tabla IV. 8. Resultados del test de Kendall sobre series de precipitaciones de la cuenca inferior del río Salado.....	31
Tabla IV. 9. Características estadísticas de las series.....	32
Tabla IV. 10. Recurrencias en las precipitaciones.....	33

1 INTRODUCCION

El estudio de la severidad de una tormenta constituye un importante elemento para caracterizar la crecida originada por la misma. A su vez, del análisis conjunto de esta última y de la precipitación que le dio origen puede deducirse el comportamiento hidrológico de la cuenca en términos de humedad antecedente, porcentajes de lluvia escurrida, tiempos de respuesta, etc.

Las características fundamentales de una lluvia son su lámina total precipitada, su duración y las distribuciones temporal y espacial que la misma presenta.

En este Anexo se presentan los análisis efectuados con el fin de caracterizar la distribución espacial de las tormentas que han generado crecidas máximas extraordinarias en la cuenca inferior del río Salado, en territorio santafesino. Dentro de este contexto un tratamiento especial es destinado a las precipitaciones que generaron la crecida de abril/mayo de 2003.

El presente Anexo se divide en tres partes fundamentales. En la primera de ellas se analiza el decaimiento espacial que presentaron las tormentas que han generado las seis crecidas máximas extraordinarias observadas en la sección hidrométrica de la Ruta Provincial 70 (RP70). En función de ello se concluye en relación al comportamiento del fenómeno observado en la última semana del mes de abril de 2003 y que originó la crecida y posterior inundación de la ciudad de Santa Fe.

En la segunda parte se presentan diversos estudios de frecuencia realizados sobre diversas estaciones pluviométricas localizadas sobre distintos sectores de la cuenca inferior del río Salado.

La tercera y última parte se refiere a las conclusiones resultantes de los análisis realizados.

2 DECAIMIENTO ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN

2.1 Introducción

Las distribuciones temporal y espacial de las tormentas constituyen un elemento fundamental para la caracterización de las mismas.

La distribución espacial de las lluvias intensas no presenta necesariamente un patrón uniforme. El análisis de la variabilidad espacial aleatoria que se verifica en cada tormenta permite determinar en qué grado se han verificado durante su ocurrencia condiciones desfavorables, conducentes a la generación de caudales críticos.

Entre otros enfoques posibles, el análisis de la variabilidad espacial de una tormenta se realiza considerando el patrón de isohietas (líneas de igual lámina precipitada) observado y su correspondiente curva de decaimiento espacial a partir del núcleo de la misma.

En los análisis de variabilidad espacial se asume, por lo general, que las láminas locales representan la lluvia sobre áreas reducidas (2,5 a 25 km² en torno al puesto de medición) dependiendo de las características climáticas y topográficas de la región.

La precipitación media sobre un área (o sobre una cuenca, PMA) se evalúa en torno de una estación núcleo, se trate del epicentro del evento o de un puesto fijo. Por lo general, la primera opción es la más habitual. Por el contrario, fijar el centro de la distribución en una estación facilita el cómputo posterior, ya que se trabaja siempre con la misma configuración. Sin embargo, la misma es razonable en dos casos:

- a. cuando se adopta un punto central de la cuenca para emplazar el núcleo de la tormenta, pretendiendo maximizar el efecto hipotético del evento.
- b. cuando se sabe que en determinada estación hay mayor probabilidad de que se produzcan los máximos de la cuenca, sea por efecto orográfico u otras razones.

En síntesis, la estación adoptada como núcleo sistemático debe reunir dos requisitos: disponer de curvas intensidad-duración-recurrencia y reflejar, a través del análisis de las mismas, que la probabilidad de ocurrencia de lluvias críticas sobre la misma es muy superior a las restantes estaciones de la cuenca.

En este estudio, en función de las informaciones disponibles se adoptó el primer criterio, es decir, el análisis a partir de la estación más próxima al núcleo de la tormenta (o de los núcleos en caso de existir más de uno).

A continuación se revisan los conceptos de curvas altura-área-duración (AAD) y de coeficiente de decaimiento areal (CDA).

2.2 Curvas Altura-Área-Duración (AAD)

Las curvas altura-área-duración constituyen elementos que permiten caracterizar el decaimiento espacial de las lluvias a partir de su núcleo. En la ingeniería hidrológica estas curvas son empleadas para transferir un valor puntual (o local) de lámina precipitada a su correspondiente valor espacial. Existen ábacos que representan a estas curvas asociadas a varias duraciones. Las mismas indican el porcentaje de lluvia local a tomar como promedio sobre la cuenca.

El U.S Weather Bureau (1958) dedujo un algoritmo de este tipo para cuencas situadas al este del río Mississippi, que se popularizó al ser publicado por la WMO (1983). Leclerc y Schaake (Valdés, 1981) ajustaron una ecuación polinómica a esas curvas, reproducidas por la **Figura IV.1**. Por otra parte, investigaciones sobre lluvias extremas en diferentes puntos de la tierra (Occhipinti, 1989), demostraron que la altura pluviométrica máxima varía con la inversa del cuadrado del área considerada. Para los casos en que se analiza la determinación de lluvias de proyecto existen, por ejemplo, patrones de isohietas elípticas obtenidos a partir del análisis espacial de numerosas tormentas severas. Cabe destacar que estos ábacos han sido deducidos a partir de análisis estadísticos de series de eventos registrados en varios puntos de la cuenca.

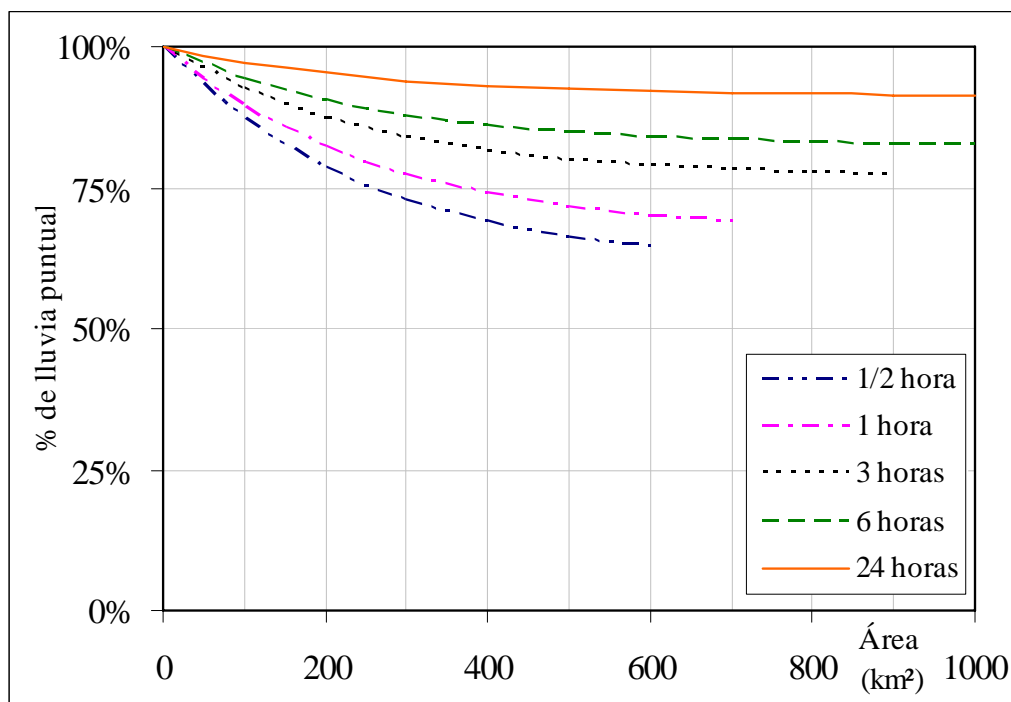


Figura IV.1. Reducción de altura de lluvia puntual a media areal de la cuenca (según ecuación polinómica de Leclerc y Schaake, 1972).

2.3 Coeficiente de Decaimiento Areal (CDA)

La *precipitación media areal* (PMA), es definida como el producto entre la precipitación en el puesto base, $\hat{P}_0 = f(d, T)$, por el coeficiente de decaimiento areal, $\hat{CDA} = f'(d, A)$, siendo d la duración de la lluvia, T su recurrencia y A el área a la que se extrapolará la lámina local

$$PMA = \hat{P}_0 \cdot \hat{CDA} \quad (IV.1)$$

El coeficiente de decaimiento areal (CDA) puede ser obtenido a través de tablas, gráficos o ecuaciones, que lo vinculan con la duración del evento y el área de la cuenca.

2.4 Calibración de ecuaciones de atenuación

Investigaciones realizadas sobre pequeñas áreas con una densa red pluviométrica, sugieren ecuaciones que vinculan la precipitación máxima areal (\bar{P}), de duración dada, con el área (A) y máximos locales ($P_{m\acute{a}x}$) en un epicentro de la lluvia fijo. Por lo general responden a expresiones de los siguientes tipos (Wiesner, 1970; Bertoni y Tucci, 1993):

$$\bar{P} = P_{m\acute{a}x} \cdot e^{-a \cdot A^c} \quad (IV.2)$$

$$\bar{P} = P_{m\acute{a}x} - b \cdot A^c \quad (IV.3)$$

donde b y c son parámetros a calibrar. En algunas versiones de la ecuación IV.2, los parámetros b y c son constantes para un evento en particular y en otras, para una envolvente de duración dada. En cuanto a la expresión IV.3, el parámetro b suele representar el gradiente medio de precipitación, en tanto que se le asigna al parámetro c el valor constante 1/2.

En estudios tomados como base (García et al. 2000; Catalini, 2001; Catalini *et al.* 2002) se ensayaron además, ecuaciones en las que la variable dependiente es el coeficiente de decaimiento, CDA. Dichas funciones, de tipo lineal, exponencial, logarítmicas, potencial y polinomial, se simbolizan respectivamente en las expresiones IV.4 a IV.8, donde a, b y c representan los parámetros a calibrar.

$$\hat{CDA} = a \cdot A \quad (IV.4)$$

$$\hat{CDA} = a \cdot e^{b \cdot A} \quad (IV.5)$$

$$\hat{CDA} = \ln(A) \quad (IV.6)$$

$$\hat{CDA} = a \cdot A^b \quad (IV.7)$$

$$\hat{CDA} = a \cdot A + b \cdot A^2 + c \cdot A^3 \quad (IV.8)$$

Al ajustar por regresión lineal las relaciones IV.2 a IV.8, se obtiene, en cada caso, un estimador del coeficiente de decaimiento areal, dependiente del área de interés y de la duración de la lluvia.

2.5 Elección de estaciones y eventos ha analizar

En el presente estudio se decidió analizar la distribución espacial de 7 eventos. Los mismos surgieron al considerar las 6 tormentas que produjeron los mayores picos de caudal en la sección hidrométrica de la Ruta Provincia 70 (RP70), además del evento que produjo el caudal máximo del año hidrológico 2001-2002. Para tal fin, se contó con información pluviométrica diaria de distintas estaciones de la cuenca.

Un total de 20 de ellas fueron seleccionadas para llevar a cabo el análisis. En la Tabla IV. 1 se presenta un resumen de las estaciones consideradas con sus respectivas coordenadas, la lámina precipitada en cada una de ellas (correspondiente a los siete días previos a la ocurrencia del pico) y la cantidad de días que se consideró como lluviosos. En la **Figura IV.2**, se presenta la ubicación relativa de las distintas estaciones.

Del análisis de la distribución espacial de las estaciones consideradas se desprende que, en términos generales, las mismas cubren gran parte de la cuenca inferior del río Salado en territorio santafesino, aunque cierta falencia de información se verifica en la región noroeste de los Bajos Submeridionales. Pese a esta debilidad del análisis el mismo fue considerado compatible a los fines comparativos perseguidos.

2.6 Patrones de Isohietas

En las **Figura IV.3** a **Figura IV.9** se presentan las distribuciones espaciales de los 7 eventos analizados. Los mapas preparados cubren el sector donde fue posible realizar interpolaciones entre los puestos disponibles.

Mediante los mapas de isohietas es posible apreciar con facilidad las distintas posiciones de los máximos precipitados y la distribución espacial de los eventos sobre la cuenca en estudio. Cabe destacar que cada mapa corresponde a la duración total del evento, razón por la cual corresponden a intervalos de tiempo (expresados en días) diferentes.

Tabla IV. 1. Resumen de las estaciones y eventos analizados

Eventos Analizados			jun-73	Mar-77	abr-81	feb-98	abr-03	abr-02	mar-05
Caudal RP70 [m³/s]			2429.0	1782.0	1420.0	2672.0	3980.0	688.0	1050.0
Duración del evento [días]			2.0	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0
Estación	X	Y	jun-73	mar-77	abr-81	feb-98	abr-03	abr-02	mar-05
Angélica	5352908	6509058	73.0	50.5	94.0	4.0	72.0	42.0	170.0
Pilar	5381064	6520397	0.0	S/D	195.0	15.0	90.0	70.0	185.0
Rafaela FC	5357884	6541718	117.0	223.0	37.0	20.0	110.0	45.0	230.0
Grutly	5397534	6540962	95.0	83.0	207.0	17.0	95.0	59.0	184.0
Eusebia	5322608	6575411	125.0	122.0	270.0	21.0	75.0	44.0	219.0
Moisés Ville	5358907	6602062	136.0	53.0	232.0	25.0	220.0	105.0	220.0
San Cristóbal	5380389	6647476	S/D	23.0	11.0	43.0	141.0	72.0	205.0
Ñanducita	5390818	6641083	S/D	32.0	79.0	28.0	308.0	85.0	140.0
La Cabral	5386525	6671347	144.0	0.0	20.0	120.0	35.0	155.0	121.0
Huanqueros	5382224	6679951	40.0	0.0	0.0	120.0	32.0	63.0	115.0
Sauce Viejo	5420397	6484831	90.3	55.6	55.9	0.0	128.0	85.0	143.0
Santa Fe	5433036	6500069	S/D	91.0	11.0	0.0	90.0	59.0	143.0
Laguna Paiva	5438016	6537224	179.0	189.0	287.0	0.0	223.0	110.0	205.0
Franck	5397534	6540962	81.0	80.8	S/D	17.0	138.0	63.0	239.0
Marcelino Escalada	5454549	6618233	147.0	104.0	65.0	30.0	295.0	153.0	217.0
Logroño	5336282	6735065	S/D	25.0	15.0	78.0	123.0	119.0	66.0
Calchaquí	5471952	6694272	S/D	0.0	3.0	75.0	156.0	100.0	75.0
Vera	5479708	6742236	172.0	4.0	10.0	45.0	244.0	140.0	74.0
Garabato	5486347	6798621	132.0	0.0	0.0	40.0	0.0	203.0	65.0
Gobernador Crespo	5460834	6641901	181.0	51.0	35.0	83.0	294.0	162.0	95.0

El análisis del mapa de isohietas correspondiente al evento de junio de 1973 permite observar la concentración de la precipitación sobre el sector este de la cuenca, con un importante gradiente hacia el sector oeste de la misma. Se observa la ocurrencia generalizada de láminas iguales o superiores a 70 mm en la mayoría de la cuenca en los 2 días en que duró el fenómeno.

La tormenta de marzo de 1977 muestra dos núcleos concentrados en Laguna Paiva y Rafaela, a partir de los cuales se produjo un importante gradiente de la precipitación. El evento, que duró 4 días, presentó precipitaciones superiores a 40 mm en la mayoría de las estaciones de la cuenca. Típicamente corresponde a una tormenta con dos núcleos y con un fuerte decrecimiento espacial.

La tormenta de abril de 1981 presentó también dos núcleos concentrados en la zona de Laguna Paiva y Moisés Ville, resultando en una precipitación de características generales similar a la anterior. Cabe señalar que este evento caracteriza adecuadamente a una tormenta concentrada sobre la cuenca del A° Cululú de 3 días de duración. Dicho arroyo fue el responsable del 80 % del caudal máximo registrado en la sección RP70 para dicho evento.

El mapa de isohietas del evento de febrero de 1998 caracteriza a una tormenta con fuerte concentración en la zona de los Bajos Submeridionales. El núcleo que presenta en la zona de Huanqueros alcanza a 125 mm en 3 días de duración. En torno a él se observa un fuerte gradiente hacia la zona sur, denotando la concentración sobre el sector norte de la cuenca según ya citado.

El evento de abril de 2002, de 3 días de duración, presentó núcleos en la región centro-este de la cuenca, no representado un tormenta crítica. La inclusión de la misma en el análisis obedeció a la disponibilidad de las informaciones para la realización del análisis.

El evento de abril de 2003, objeto central del análisis, presentó durante los 3 días analizados (del 23/04/05 al 25/04/05) dos núcleos localizados respectivamente sobre las zonas contiguas a Vera y Gobernado Crespo. Se observa la ocurrencia de importantes láminas precipitadas en distintas regiones fuera de los núcleos, como así también la ocurrencia de lluvias del orden de 320 mm en la zona de Gobernador Crespo y Marcelino Escalada. Una descripción más detallada de este evento se presenta en los Anexos VI y VIII.

El evento de marzo de 2003 se caracterizó por presentar una concentración sobre las cuencas del A° Cululú y del A° San Antonio. Durante los 2 días de precipitación considerados diversas estaciones registraron láminas superiores a 150 mm. Un análisis pormenorizado de este evento y de sus consecuencias sobre la cuenca del A° Cululú se presenta en el Anexo VII.

En síntesis, se observa que la distribución espacial de las tormentas severas ocurridas sobre la cuenca inferior del río Salado no sigue un patrón definido, existiendo tanto casos de concentración en la zona norte, centro como sur de la misma. Del mismo modo, se observa que se han presentado precipitaciones distribuidas sobre uno o dos núcleos.

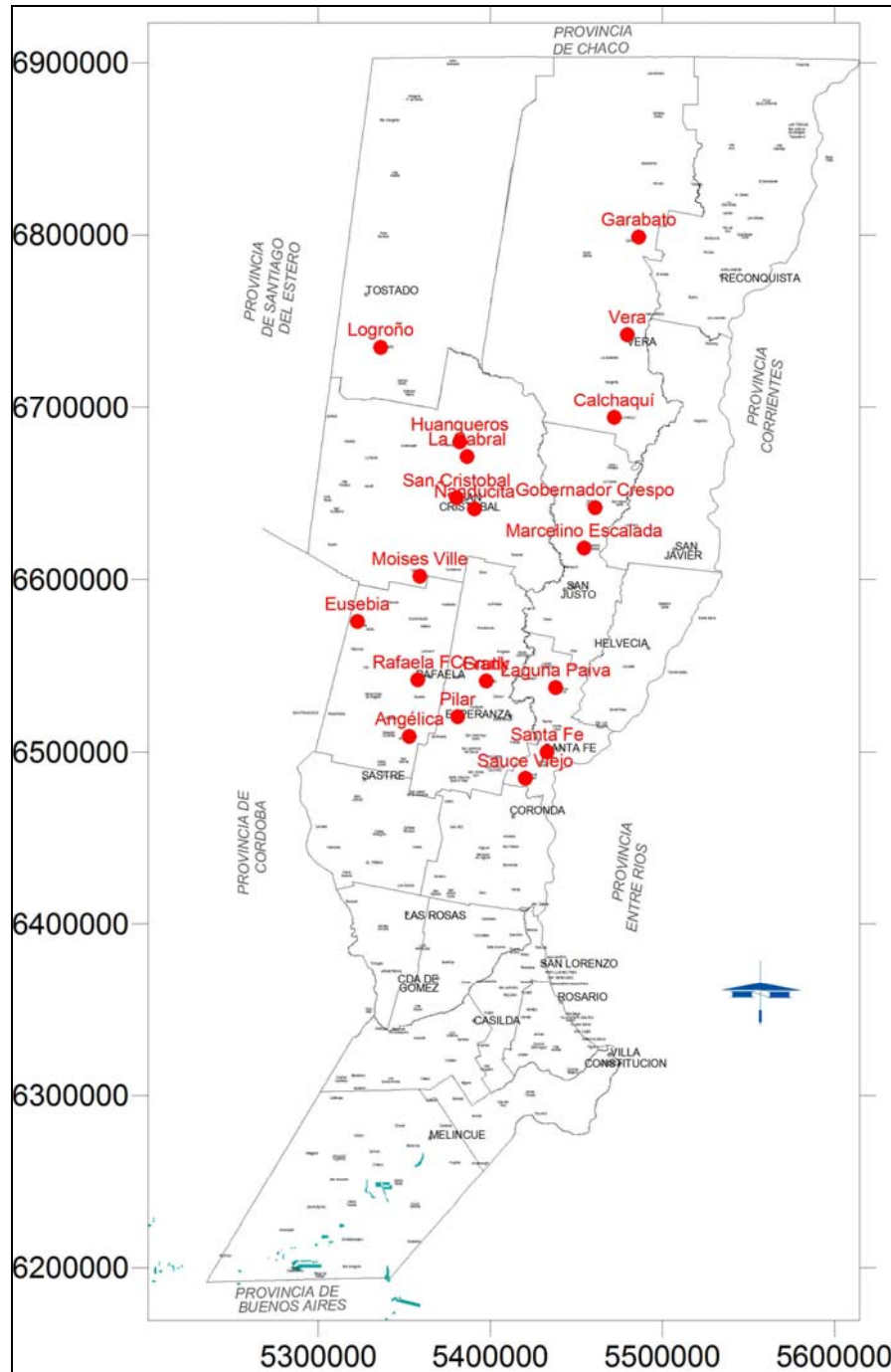


Figura IV.2. Ubicación de las estaciones pluviométricas empleadas en el análisis de dist. espacial

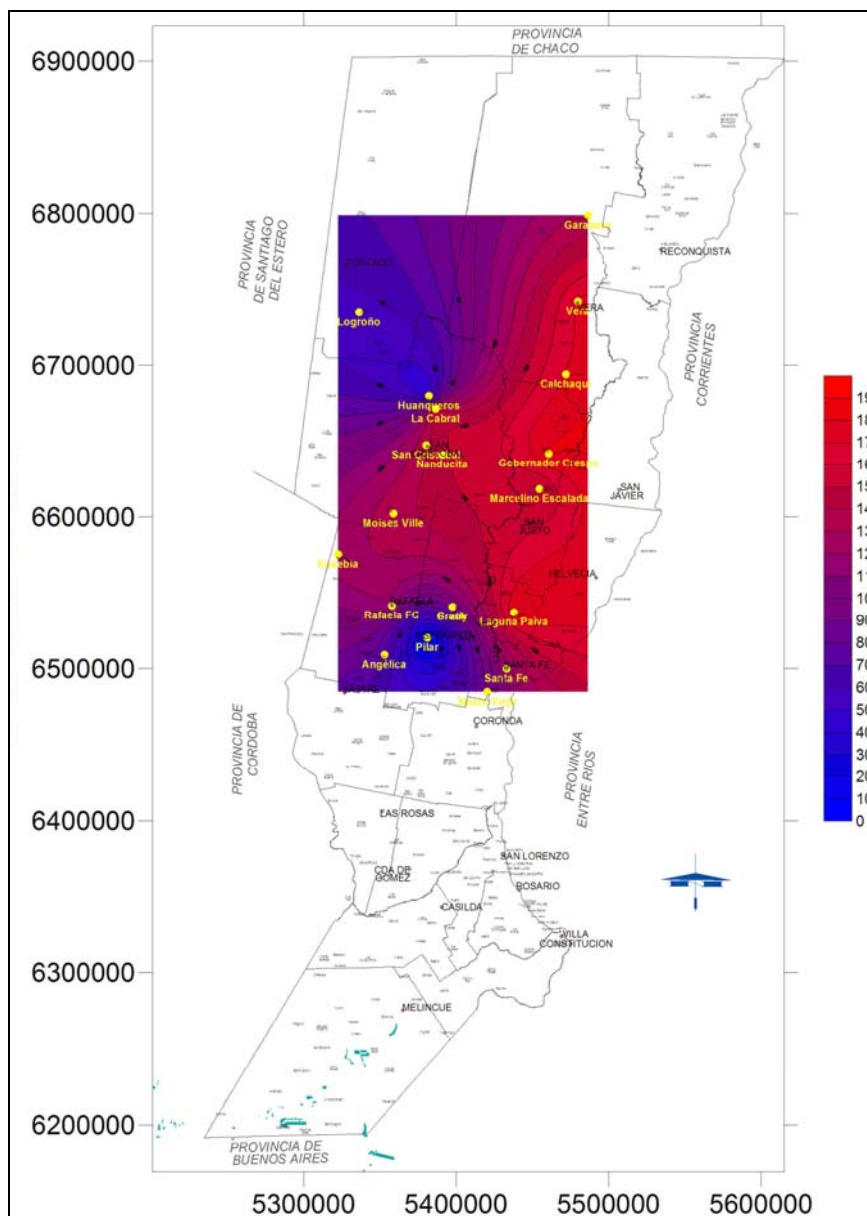


Figura IV.3. Mapa de Isohietas evento ocurrido en Junio 1973.

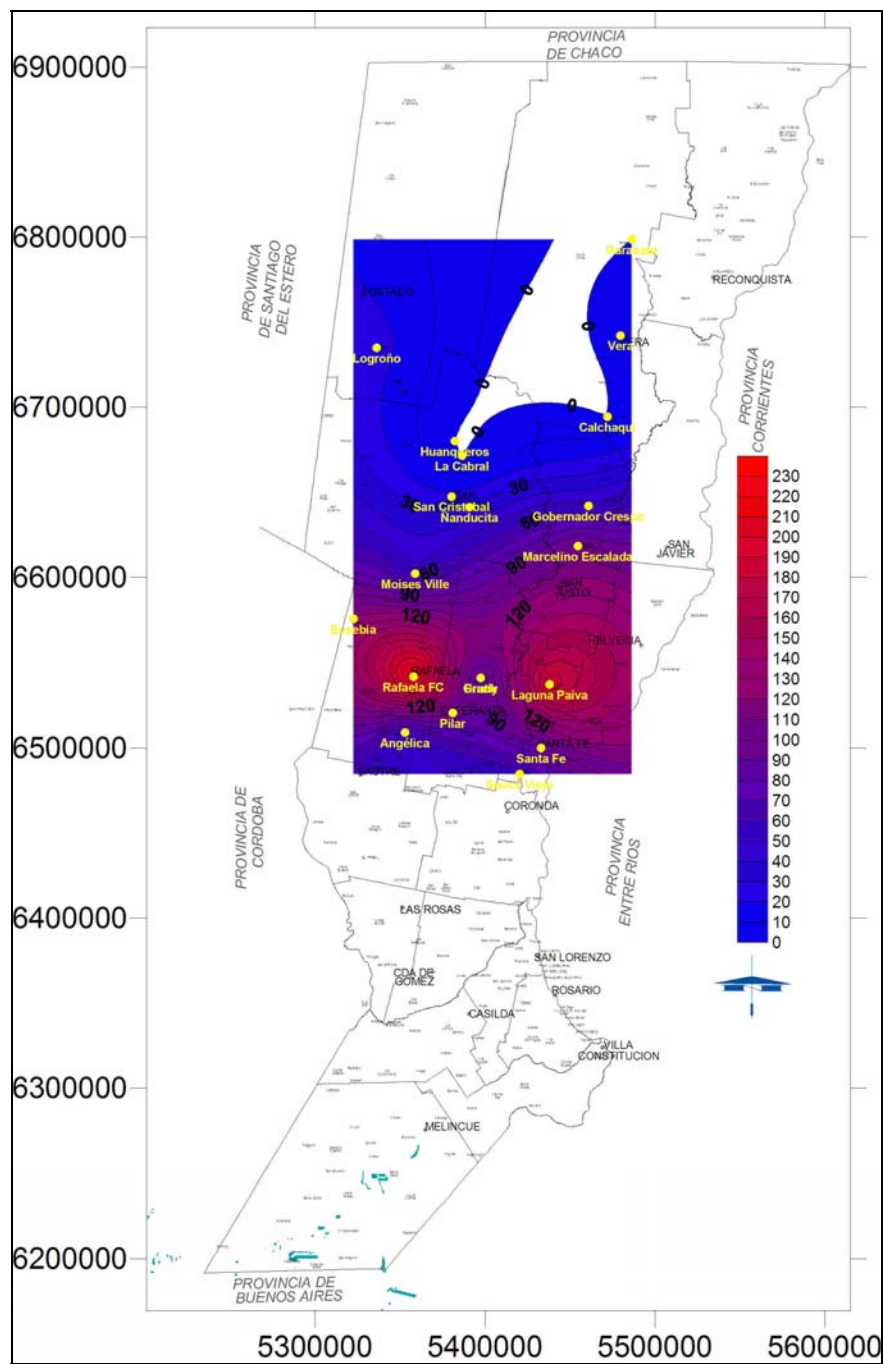


Figura IV.4. Mapa de Isohietas evento de Marzo de 1977.

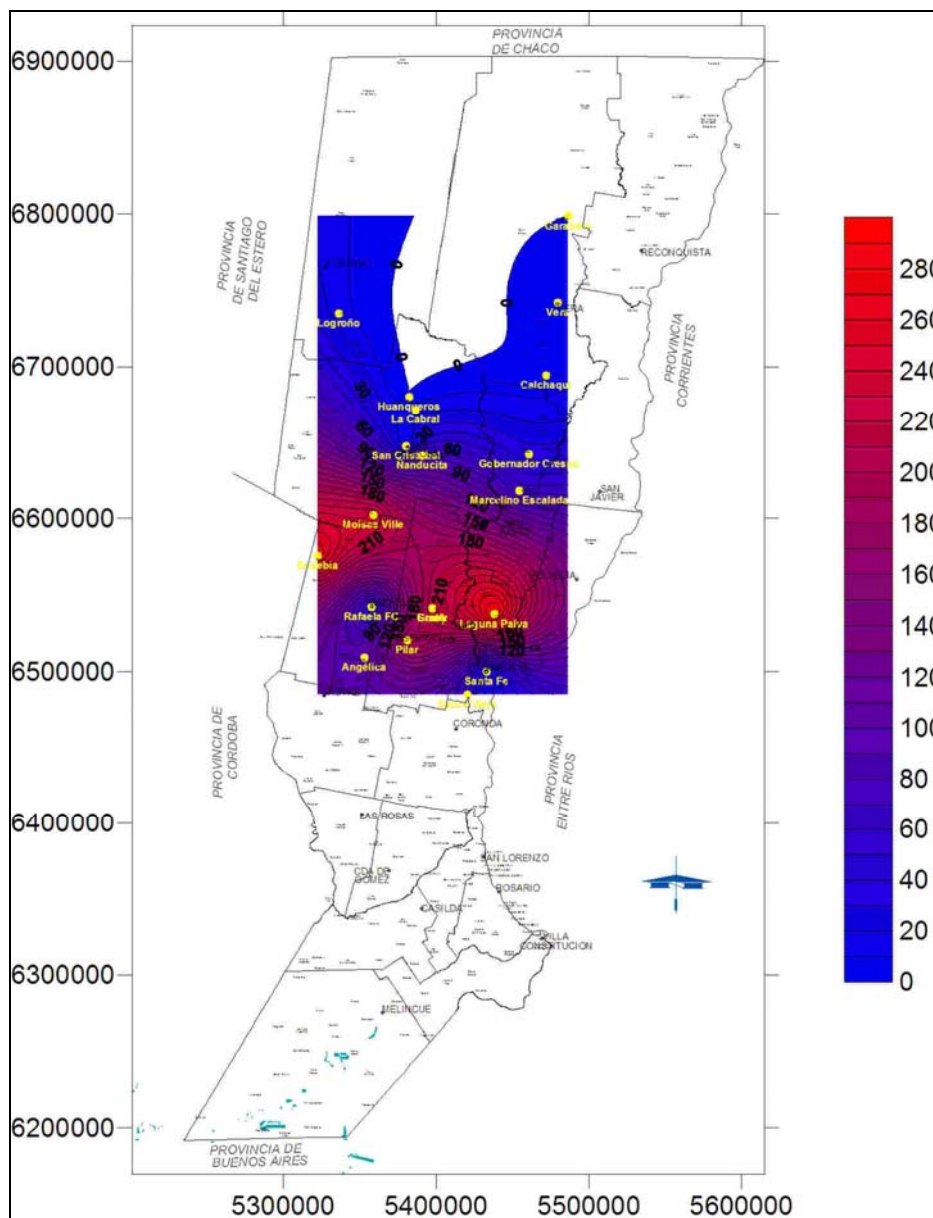


Figura IV.5. Mapa de Isohietas evento registrado en Abril de 1981.

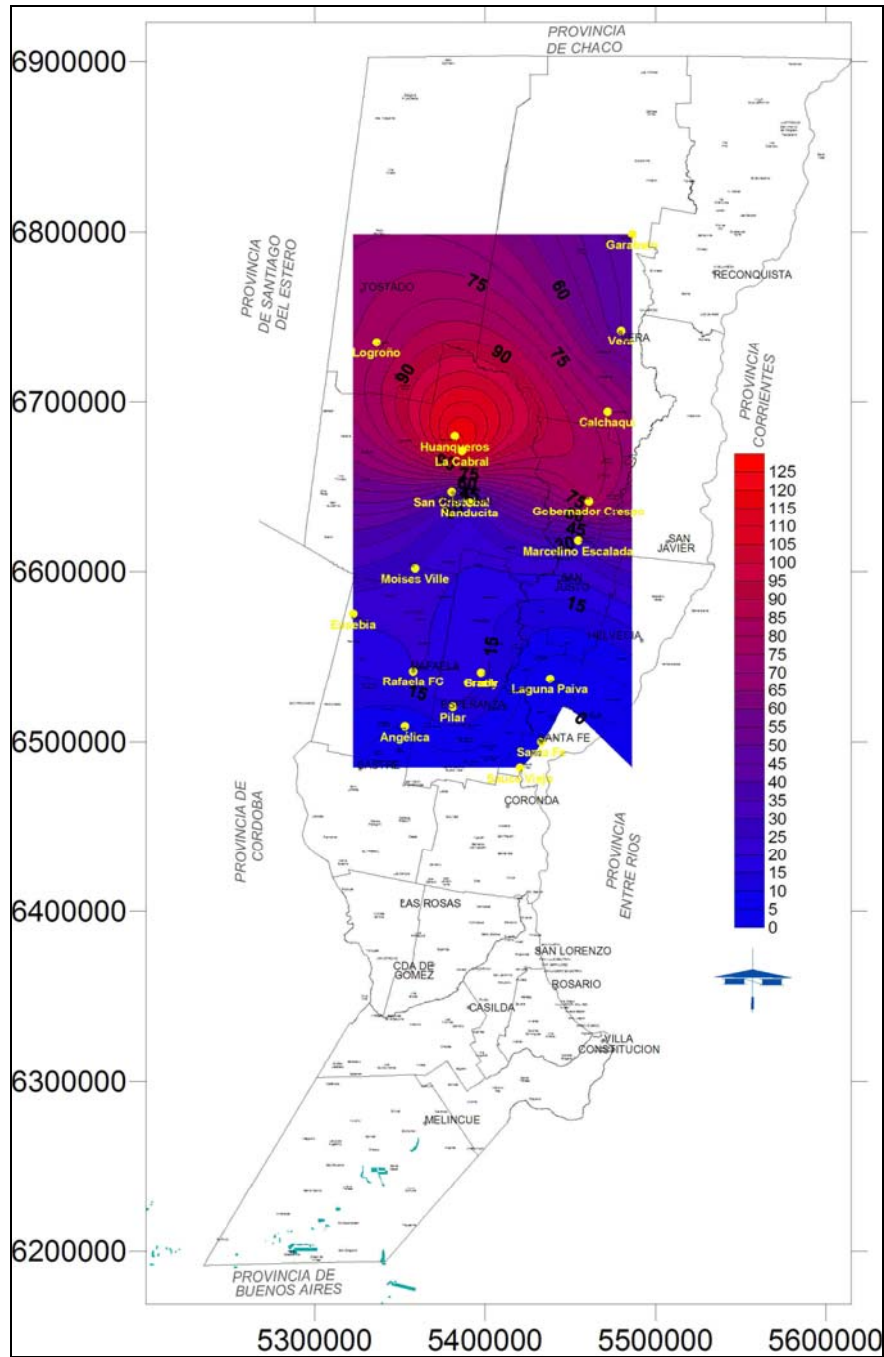


Figura IV.6. Mapa de Isohietas evento registrado en Febrero de 1998.

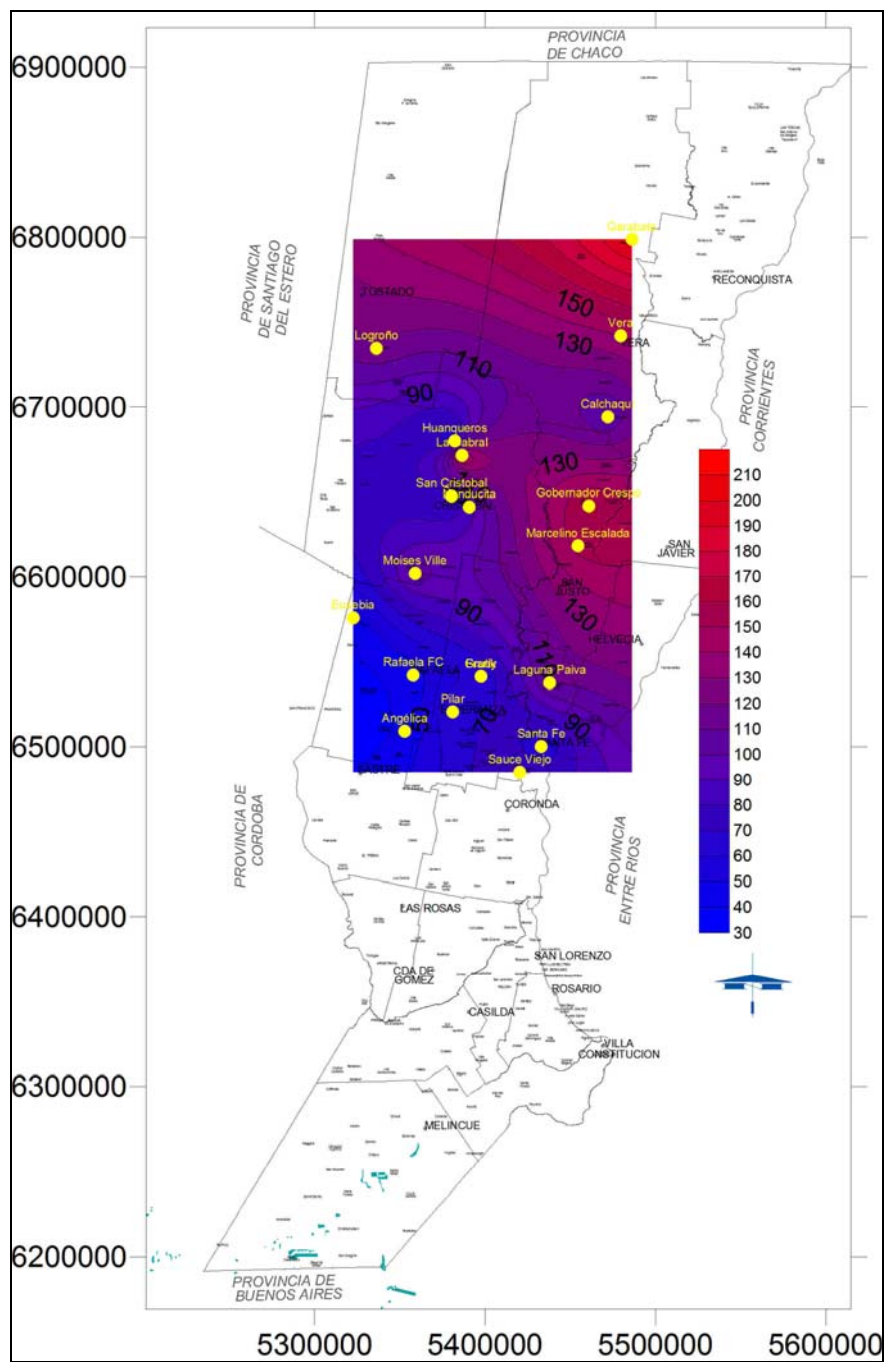


Figura IV.7. Mapa de Isohietas evento registrado en Abril de 2002.

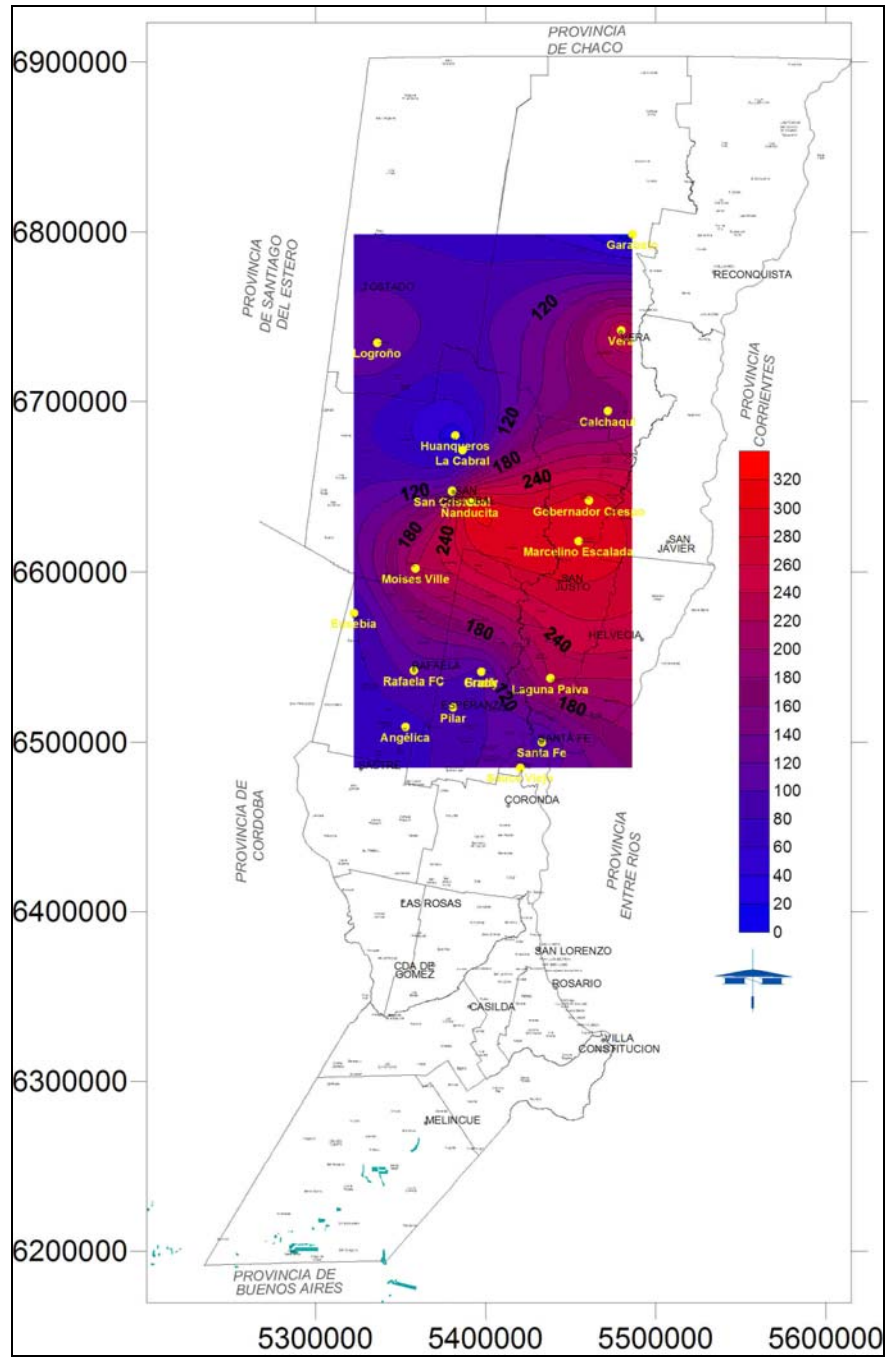


Figura IV.8. Mapa de Isohietas del evento Abr/May 2003.

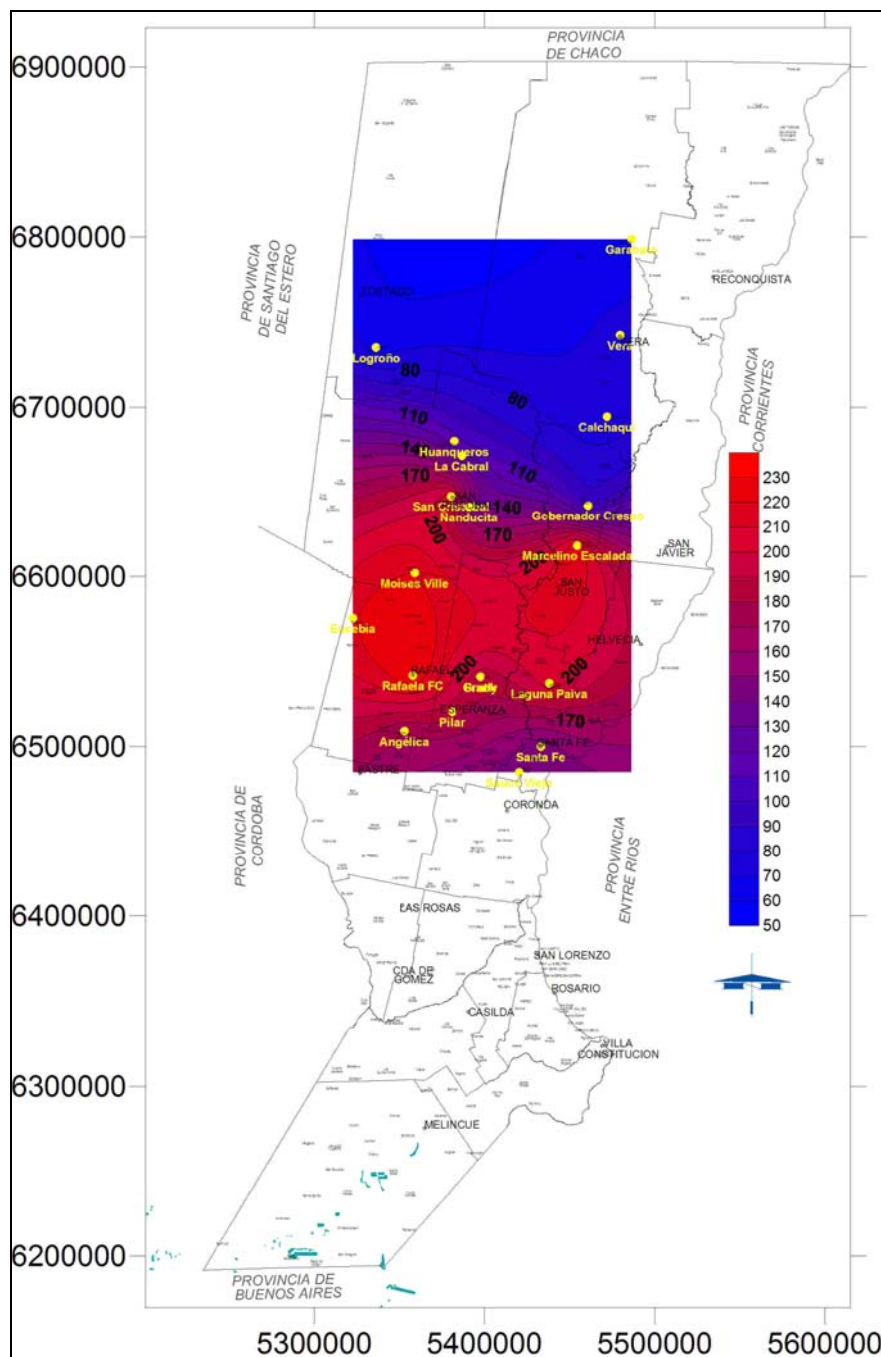


Figura IV.9. Mapa de Isohietas del evento ocurrido en Marzo de 2005.

2.7 Determinación de los coeficientes de decaimiento areal por eventos

En la **Figura IV.10**, se presentan los distintos valores del coeficiente de decaimiento areal, CDA, obtenidos en base a los mapas de isohietas de los 7 eventos críticos previamente analizados.

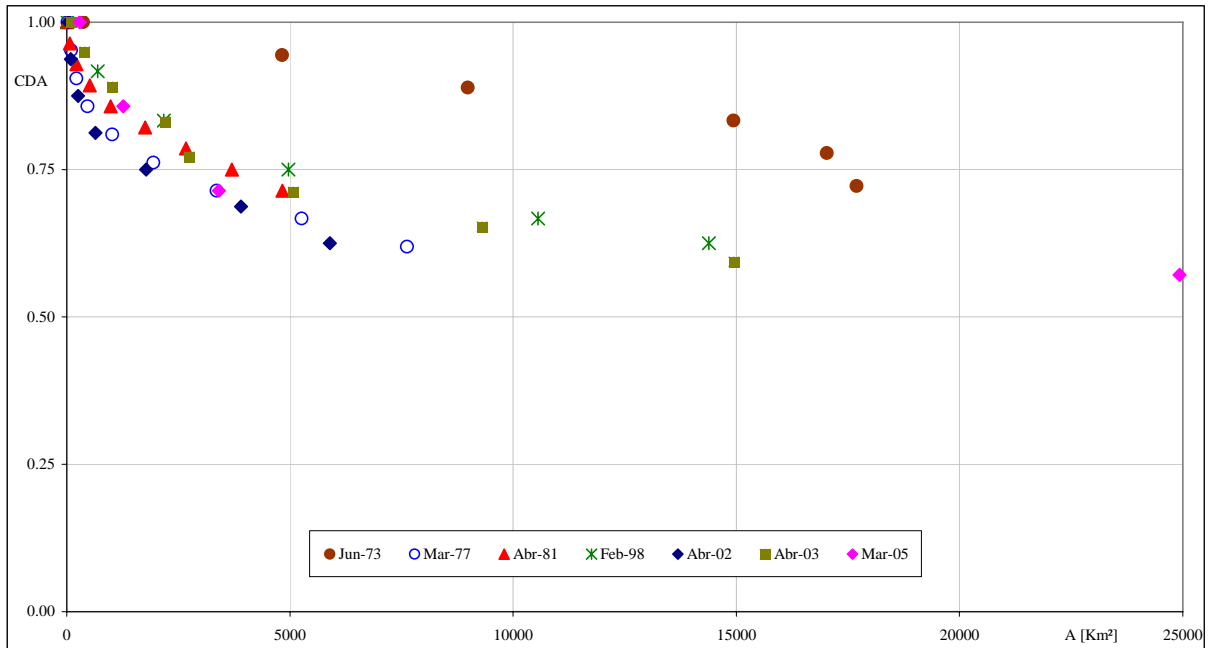


Figura IV.10. Coeficientes de decaimiento areal (CDA) de los eventos analizados

El gráfico permite deducir un comportamiento similar de la mayoría de los eventos analizados, a excepción del evento del año 1973, el cual presentó una mayor uniformidad espacial. Se desprende de ello que, en términos generales, 5 de los 6 eventos críticos analizados presentaron gradientes de distribución espacial semejantes en torno a su(s) núcleo(s). Dentro de este grupo se encuentra el evento de abril de 2003, el que desde este punto de vista, no presentó particularidades dignas de destacar.

Con base en los pares de valores CDA-A se procedió al ajuste de una función de tipo potencial (ecuación IV.7) para cada uno de los eventos analizados. Los parámetros de las calibraciones realizadas se presentan en la Tabla IV. 2.

La curva de decaimiento espacial correspondiente al evento del año 2003 resulta:

$$CDA = 1.7279 * A^{-0.104} \tag{IV. 9}$$

donde:

A = área, en km² y

CDA = coeficiente de decaimiento areal.

Tal como se indica en la Tabla IV. 2 el coeficiente de determinación correspondió a $R^2=0.91$.

Por su parte, la **Figura IV.11** ilustra el comportamiento de las funciones ajustadas en comparación con aquel determinado por Catalini *et al.* (2002) para condiciones de diseño hidrológico (o proyecto de obras) para una cuenca de la región próxima a la ciudad de Rosario. Este último análisis fue realizado con base en datos provenientes de 45 estaciones que representaron la precipitación ocurrida en una cuenca de 2.000 km².

Los autores estimaron que el coeficiente de decaimiento espacial CDA, sigue la siguiente ecuación:

$$\hat{CDA} = 1 + k \cdot [\ln(A) - \ln(25)] \quad (IV.10)$$

en donde el coeficiente k es una función de la duración, a saber

$$k = 0.0141 \cdot \ln(d) - 0.1221 \quad (IV.11)$$

Los autores dedujeron esta expresión asumiendo una precipitación homogénea en un área de 25 km² en torno a la estación base. Cabe destacar que tal análisis se realizó considerando los resultados de un análisis estadístico (basado en el estudio de intervalos de máximos anuales, IMA) y no sobre eventos particulares como se realizó en este Anexo.

Del análisis del gráfico se deduce que la totalidad de los eventos analizados sobre la cuenca inferior del río Salado presentaron un abatimiento espacial superior a aquel determinado en forma estadística por Catalini *et al.* (2002) para la región de Rosario. La razón de este comportamiento radica en que: (i) la cuenca analizada por los autores corresponde a un área significativamente inferior a la analizada en este estudio, siendo más probable la ocurrencia de tormentas frontales que abarquen la cuenca con mayor uniformidad de lámina; (ii) el estudio estadístico frecuencial realizado por los autores correspondió a condiciones de proyecto, no necesariamente verificadas en los eventos individuales analizados aquí.

En síntesis, de las comparaciones efectuadas se desprende que:

- a) el evento de abril de 2003 (analizado con 3 días de duración) no presenta características espaciales singularmente diferente de aquellos observados previamente durante la ocurrencia de tormentas severas que originaron situaciones críticas en la cuenca inferior del río Salado (en particular en lo referente a su coeficiente de decaimiento areal);
- b) como resultado de la mayor superficie abarcada por las tormentas observadas sobre la cuenca inferior del río Salado, todas presentan un abatimiento espacial superior a aquel deducido en la literatura para la región sur de la provincia de Santa Fe para condiciones de proyecto (lluvias de diseño de obras hidráulicas).

Tabla IV. 2. Parámetros de los ajustes realizados

Evento	Parámetros		R ²
	a	b	
Jun-73	1.422	-0.055	0.759
Mar-77	1.374	-0.082	0.943
Abr-81	1.124	-0.045	0.819
Feb-98	1.270	-0.065	0.820
Abr-02	1.386	-0.086	0.972
Abr/May-03	1.728	-0.104	0.914
Mar-05	2.082	-0.128	0.991

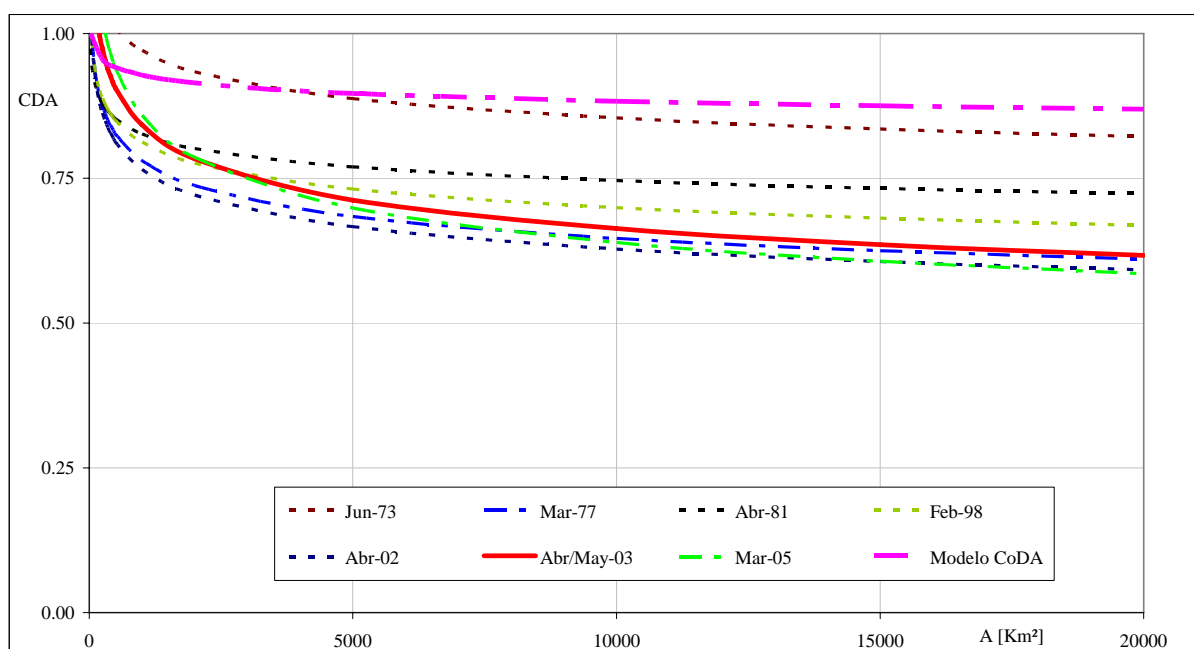


Figura IV.11. Comparación de los ajustes realizados con el Modelo CoDA.

3 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE PRECIPITACIONES

3.1 Introducción

A los fines de caracterizar el comportamiento de las precipitaciones ocurridas durante el evento de abril/mayo de 2003 se realizó el análisis estadístico de precipitaciones diarias con duraciones de 1, 2 y 3 días.

Los estudios se basaron en datos de 6 estaciones del SMN, los cuales fueron provistos oportunamente por la UNL-FICH. La selección de estas estaciones obedeció a los siguientes criterios:

- estaciones ubicadas en distintas latitudes de la cuenca del Río Salado (se aprecian en la Figura IV.12);
- estaciones que poseían un récord de 25 o más años;
- estaciones cuyos datos faltantes eran menos del 15%.

En el caso del análisis de precipitación máxima anual de 1 día de duración se agregó, además, la estación propia de la UNL-FICH ubicada en el paraje El Pozo de la ciudad de Santa Fe.

Para estos análisis fue empleado el paquete estadístico HYFRAN[®], desarrollado por la Cátedra de Hidrología Estadística CRNSG-INRS-Eau/Hydro-Québec (Département d'Hydrologie)/Alcan. De acuerdo a lo detallado en el Anexo X, este paquete estadístico permitió:

- Realizar pruebas de independencia (Wald-Wolfowitz)
- Realizar pruebas de estacionaridad (Kendall)
- Realizar pruebas de homogeneidad a escala anual (Wilcoxon).

Todas las pruebas realizadas dieron resultados positivos, aceptándose las hipótesis de independencia, estacionalidad y homogeneidad a escala anual. En función de ello se ajustaron las muestras mediante las siguientes distribuciones (GEV, Gumbel, LogNormal y LogPearsonIII), empleándose el criterio de Akaike para la selección de aquella que produjo el mejor ajuste.

En todos los casos fue seleccionada la distribución Gumbel, a excepción del caso de la estación Rafaela Met con duración 3 días, para la cual presentó mejor desempeño la distribución LogNormal. Los resultados se presentan en la Figura IV.13 a Figura IV.15 y en la Tabla IV. 3.

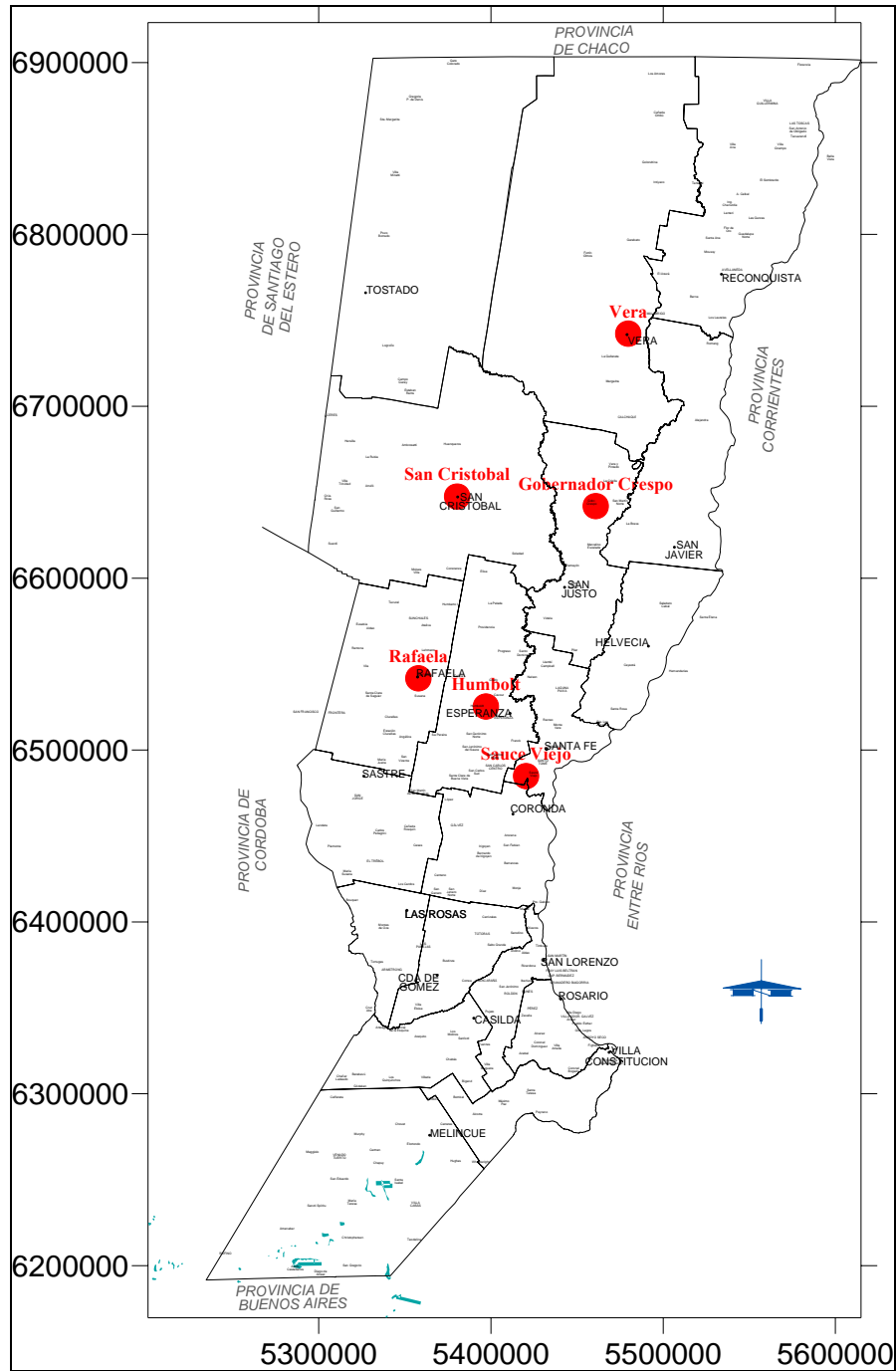


Figura IV.12. Mapa de ubicación de estaciones pluviométricas.

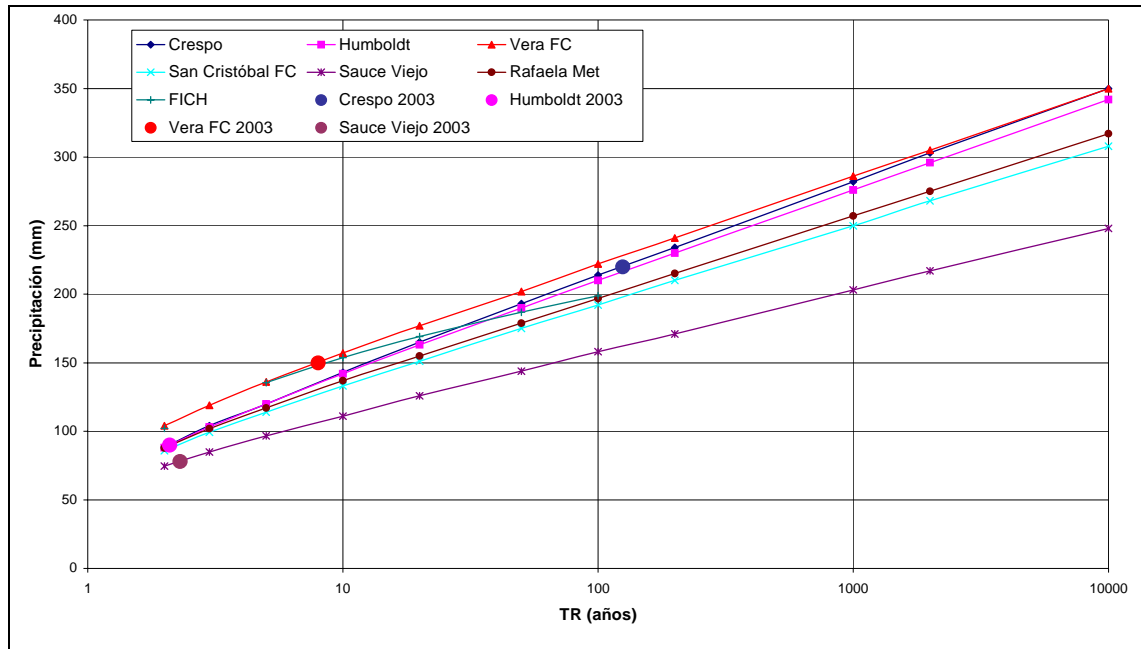


Figura IV.13. Recurrencia de láminas precipitada con duración 1 día.

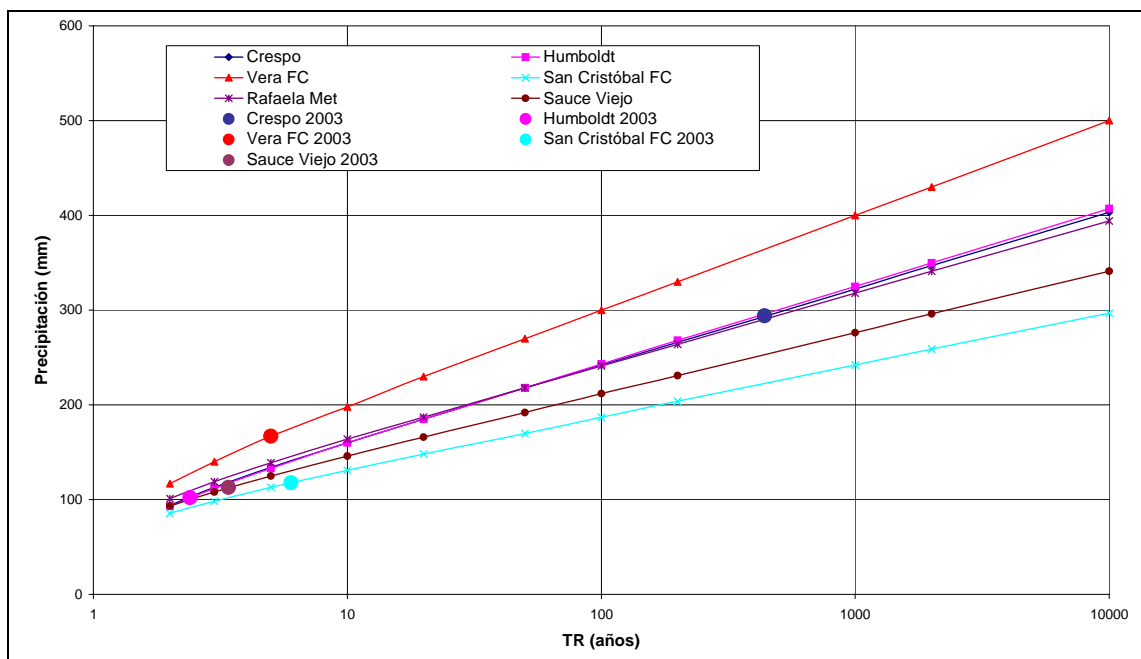


Figura IV.14. Recurrencia de láminas precipitada con duración 2 días.

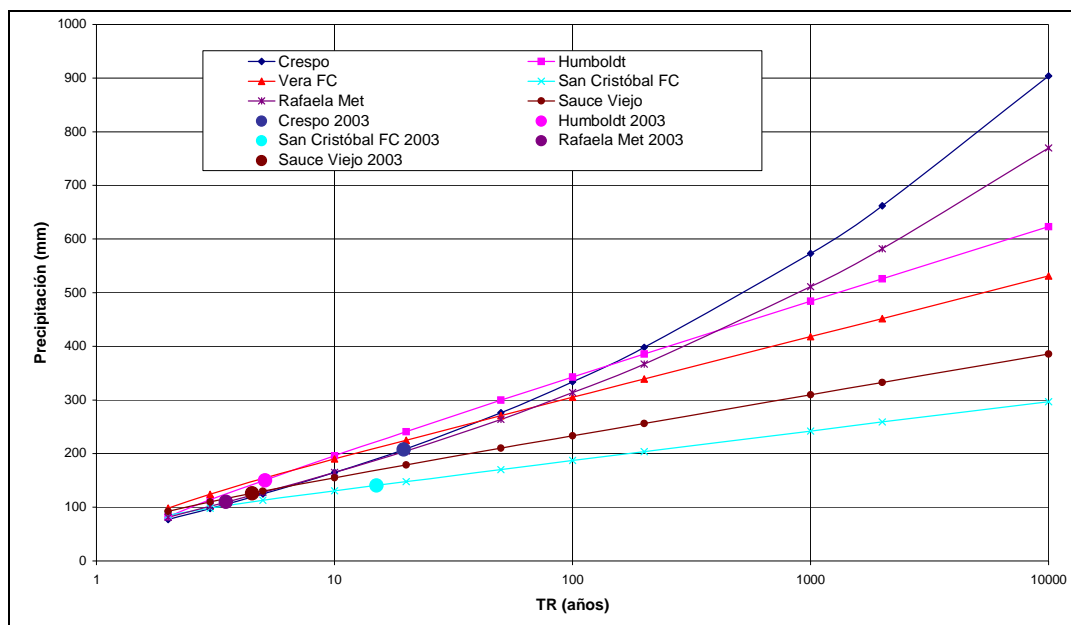


Figura IV.15. Recurrencia de láminas precipitada con duración 3 días.

Tabla IV. 3. Precipitaciones diarias máximas anuales consideradas en el análisis.

Estadística de base	Gov. Crespo 1933-2003			Humboldt 1947-2003			Rafaela Met 1959-1991			San Cristóbal FC 1964-1988			Vera FC 1956-1990		
	Duración			Duración			Duración			Duración			Duración		
	1 día	2 días	3 días	1 día	2 días	3 días	1 día	2 días	3 días	1 día	2 días	3 días	1 día	2 días	3 días
Número de observaciones	63	64	56	52	51	41	31	31	31	35	35	35	34	34	33
Mínimo	57.0	17.0	34.0	38.0	24.0	12.0	49.4	50.7	32.9	45.0	48.0	48.0	61.0	47.0	12.0
Máximo	220.0	294.0	260.0	225.0	245.0	286.0	170.0	224.0	242.0	164.0	207.0	207.0	200.0	253.0	288.0
Promedio	99.4	104.0	93.4	94.7	101.0	100.0	93.7	109.0	96.2	90.9	90.9	90.9	111.0	126.0	110.0
Desviación estándar	34.2	47.4	51.1	39.9	45.2	68.3	32.8	41.6	52.3	29.6	32.4	32.4	35.9	53.9	66.7
Mediana	93.0	93.5	80.0	90.0	90.0	78.0	83.8	110.0	76.7	90.0	88.0	88.0	105.0	120.0	79.0
Coefficiente de variación (Cv)	0.344	0.457	0.548	0.421	0.450	0.681	0.350	0.383	0.544	0.326	0.356	0.356	0.324	0.428	0.606
Coefficiente de asimetría (Cs)	1.43	1.31	1.25	1.36	1.12	1.04	0.65	0.77	1.20	0.43	1.44	1.44	0.74	0.69	1.05
Coefficiente de curtosis (Ck)	5.09	5.65	3.93	4.70	4.31	3.26	2.26	2.93	3.26	2.28	5.59	5.59	2.45	2.56	3.17

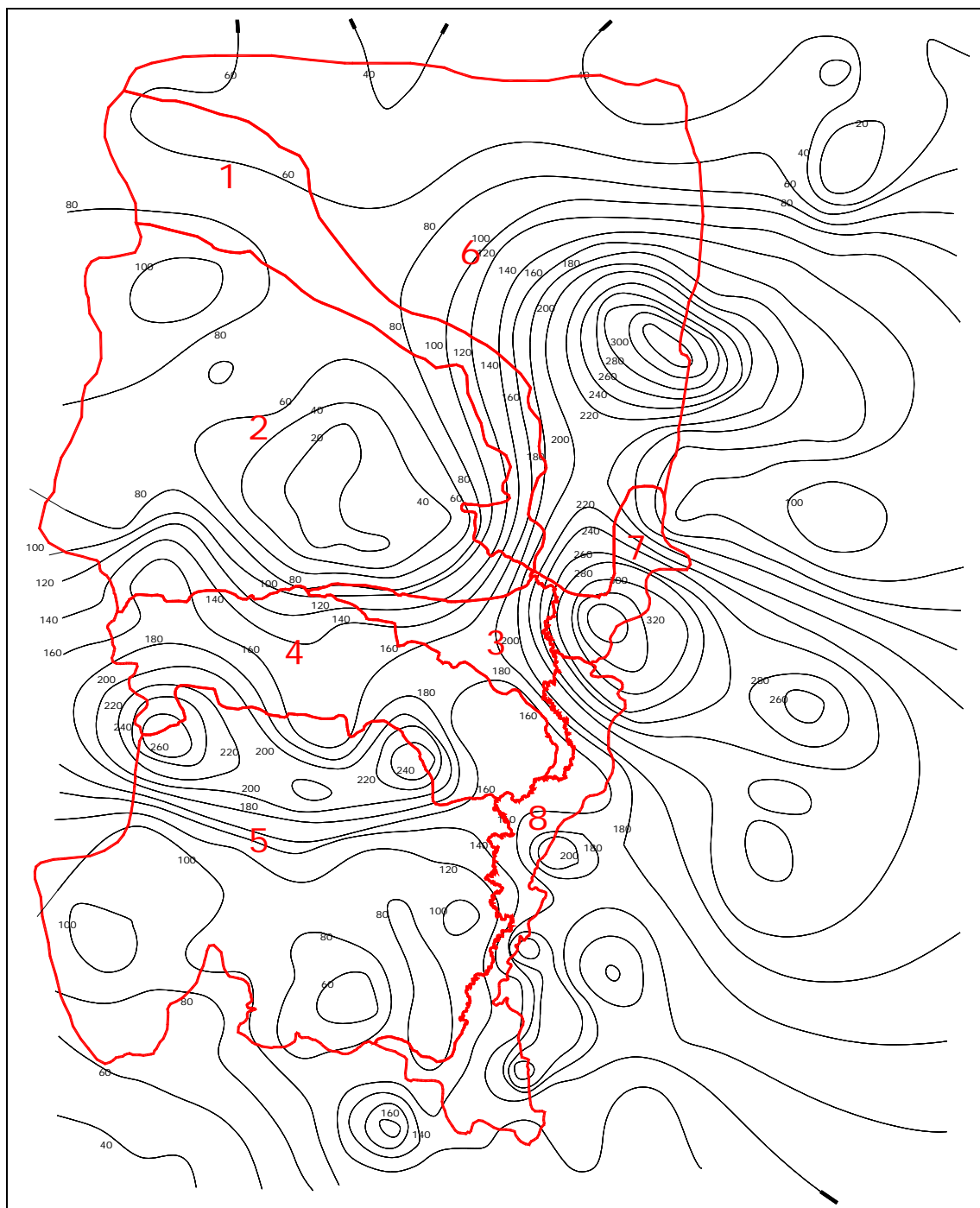


Figura IV.16. Distribución espacial de la tormenta de abril de 2003.

Los mismos permiten concluir que:

- La precipitación del evento del 2003 en la localidad de Gdor. Crespo tuvo carácter de excepcional, ya que sus tiempos de recurrencia fueron de 125 años para duración 1 día y 440 años para 2 días de duración.
- En el resto de las estaciones analizadas las precipitaciones correspondientes al evento del 2003 tuvieron recurrencias que no sobrepasaron los 20 años.
- Si se adoptara una tormenta de proyecto con un único núcleo que generara igual precipitación media (118,3 mm) en toda la cuenca que en el evento de abril de 2003, ésta tendría un valor en ese único núcleo de 207 mm con 3 días de duración. Tal valor surge de considerar la curva de decaimiento espacial originada en el mencionado evento con dos núcleos principales, ubicados en los Bajos Submeridionales y en la cuenca media (ecuación IV.7; para $A= 41.528 \text{ km}^2$ resulta $CDA = 0.572$ y precipitación en el núcleo = precipitación media areal/CDA).
- Considerando los registros de cada una de las estaciones seleccionadas, el valor de 207 mm posee los tiempos de retorno indicados en la Tabla IV. 4. Se puede inferir que el evento de precipitación en abril de 2003 posee un tiempo de retorno (o recurrencia) relativamente bajo. Sin embargo, el evento hidrológico asociado, que comprende las características de la tormenta (duración, distribución temporal, distribución espacial, intensidad) y las condiciones de humedad antecedente del suelo, corresponde a una baja probabilidad de ocurrencia (ver Anexo X).

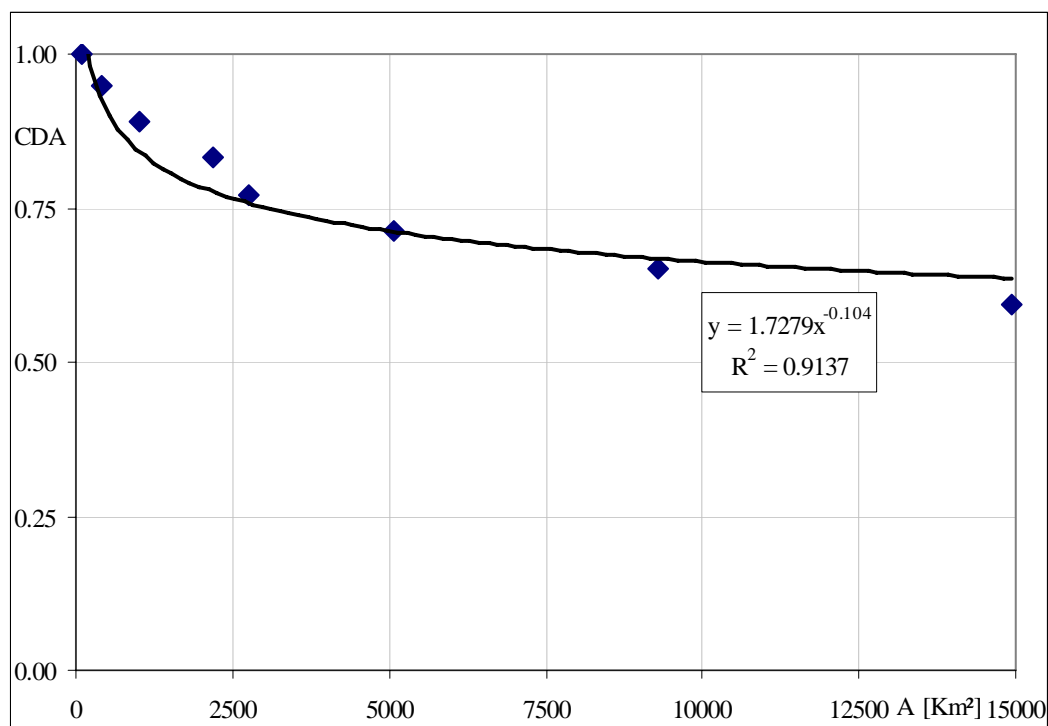


Figura IV.17. Curva de decaimiento espacial de la tormenta de abril de 2003, con indicación de los puntos deducidos del mapa de isohietas y el ajuste de la función potencial.

Tabla IV. 4. Tiempos de retorno de una lámina 207 mm en distintas estaciones de la cuenca inferior del río Salado.

Estación	TR (años)
Crespo	45.0
Humboldt	16.0
Rafaela	20.0
San Cristóbal	100.0
Sauce Viejo	46.0
Vera	14.0
Promedio	40.0

- Si se adoptara una tormenta de proyecto con un dos núcleos que generaran igual precipitación media en toda la cuenca (118,3 mm) que en el evento de abril de 2003, estos núcleos tendrían un valor de 195 mm (cuencas del Calchaquí y Las Conchas; CDA=0,605) y 189 mm (resto de la cuenca media y baja; CDA=0,625) con 3 días de duración.

- En el primer caso (195 mm), considerando a las estaciones Vera, San Cristóbal y Crespo sus tiempos de retorno serían de 10, 150 y 30 años respectivamente. En el segundo caso (189 mm) considerando a las estaciones Rafaela, Humboldt y Sauce Viejo los tiempos de retorno serían de 15, 11 y 25 años respectivamente.
- Al igual que en la consideración para la tormenta de proyecto con un único núcleo, se puede inferir que el evento de precipitación en abril de 2003 posee un tiempo de retorno (o recurrencia) relativamente bajo. Sin embargo, el evento hidrológico asociado, que comprende las características de la tormenta (duración, distribución temporal, distribución espacial, intensidad) y las condiciones de humedad antecedente del suelo, corresponde a una baja probabilidad de ocurrencia (ver Anexo X).

Tabla IV. 5. Precipitaciones Máximas Anuales en mm (duración 1 día)

TR (años)	Crespo	Humboldt	Vera FC	San Cistóbal FC	Sauce Viejo	Rafaela Met	FICH
10000.0	350	342	350	308	248	317	S/D
2000.0	303	296	305	268	217	275	S/D
1000.0	282	276	286	250	203	257	S/D
200.0	234	230	241	210	171	215	S/D
*125.0	*220	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
100.0	214	210	222	192	158	197	198.9
50.0	193	190	202	175	144	179	186.8
20.0	165	163	177	151	126	155	169.1
10.0	143	142	157	133	111	137	153.7
*8.0	S/D	S/D	*150	S/D	S/D	S/D	S/D
5.0	120	120	136	114	96.7	117	135.6
3.0	104	103	119	99.4	85	102	S/D
*2.3	S/D	S/D	S/D	S/D	*78	S/D	S/D
*2.1	S/D	*90	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
2.0	88.6	87.9	104	85.9	74.5	87.8	102.2

*Los valores corresponden al evento de abril de 2003

Nota: En algunas estaciones no aparecen valores vinculados al evento de abril de 2003 debido a que son menores a TR= 2 años o no tuvieron precipitación. Ambas situaciones se sintetizan mediante la indicación S/D.

Tabla IV. 6. Precipitaciones Máximas Anuales en mm (duración 2 días)

TR [años]	Crespo	Humboldt	Vera FC	San Cristóbal FC	Rafaela Met	Sauce Viejo
10000.0	403	407	500	297	394	341
2000.0	347	350	430	259	341	296
1000.0	322	325	400	242	318	276
*440.0	*294	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
200.0	266	268	330	204	264	231
100.0	242	243	300	187	241	212
50.0	218	218	270	170	218	192
20.0	185	185	230	148	187	166
10.0	160	160	198	131	164	146
*6.0	S/D	S/D	S/D	*118	S/D	S/D
5.0	134	133	*167	113	139	125
*3.4	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	*113
3.0	113	112	140	98.3	119	108
*2.4	S/D	*102	S/D	S/D	S/D	S/D
2.0	94.1	93.1	117	85.5	101	93.5

*Los valores corresponden al evento de abril de 2003
 Nota: En algunas estaciones no aparecen valores vinculados al evento de abril de 2003 debido a que son menores a TR= 2 años o no tuvieron precipitación. Ambas situaciones se sintetizan mediante la indicación S/D.

Tabla IV. 7. Precipitaciones Máximas Anuales en mm (duración 3 días)

TR (años)	Crespo	Humboldt	Vera FC	San Cristóbal FC	Rafaela Met	Sauce Viejo
10000.0	904	623	531	297	770	386
2000.0	662	526	452	259	582	333
1000.0	573	484	418	242	511	310
200.0	398	386	339	204	367	256
100.0	334	343	305	187	314	233
50.0	276	300	271	170	264	210
20.0	209	241	225	148	205	179
*19.5	*208	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
*15.0	S/D	S/D	S/D	*141	S/D	S/D
10.0	165	196	190	131	165	155
*5.1	S/D	*150	S/D		S/D	S/D
5.0	125	149	154	113	128	130
*4.5	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	*126
*3.5	S/D	S/D	S/D	S/D	*110	S/D
3.0	97.9	114	124	98.3	102	110
2.0	77.2	82.2	98.1	85.5	81.2	92.3

*Los valores corresponden al evento de abril de 2003
 Nota: En algunas estaciones no aparecen valores vinculados al evento de abril de 2003 debido a que son menores a TR= 2 años o no tuvieron precipitación. Ambas situaciones se sintetizan mediante la indicación S/D.

3.2 Análisis de tendencias observadas en las series

A partir del empleo del software HYFRAN[®] se pudo analizar la posible existencia de tendencias tanto en las series de precipitaciones anuales como en las de precipitación diaria máxima anual. Para ello fue aplicado el Test de Kendall, descrito en el Anexo X. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla IV. 8.

Cómo se puede apreciar, para las estaciones consideradas, las cuales se distribuyen a lo largo de la cuenca inferior del río Salado en territorio santafesino, no se puede afirmar que existe una tendencia de cambio en las precipitaciones tanto anuales como las referidas a las diarias máximas. Estas últimas son las que originan primordialmente las crecidas.

Tabla IV. 8. Resultados del test de Kendall sobre series de precipitaciones de la cuenca inferior del río Salado.

Estación (período)	Precipitación diaria máxima anual		Precipitación anual	
	Tendencia	Nivel de significancia (α %)	Tendencia	Nivel de significancia (α %)
Vera (1956-1990)	no	5	no	5
Humboldt (1947-2003)	si	5	si	5
	no	1	no	1
Crespo (1933-2003)	si	1	no	5
San Cristóbal (1964-1988)	no	5	no	5
Sauce Viejo	no	5	no	5

4 ANALISIS REGIONAL DE LAS PRECIPITACIONES

A los efectos de realizar un análisis regional de las precipitaciones en la cuenca del Río Salado santafesino se siguió la metodología correspondiente al método del Índice de Crecientes (WMO,1989) utilizando información de las precipitaciones diarias máximas anuales de las estaciones: Crespo (63 años), Humboldt (52 años), Rafaela Met. (31 años), San Cristóbal (35 años), Vera (34 años) y Sauce Viejo (36 años).

El método asume homogeneidad regional considerando que la variable:

$$X = \frac{P}{\bar{P}} \quad (\text{IV.12})$$

tiene la misma distribución en todas las estaciones de la región, donde P es la precipitación diaria máxima anual y \bar{P} es la media de la serie de valores máximos anuales.

Como se puede observar en la Tabla IV. 9, las características estadísticas de las estaciones analizadas permiten asumir la condición de homogeneidad regional, en particular si se consideran los valores de los coeficientes de variación (C_v). A pesar de que los valores de coeficientes de asimetría (C_s) para las estaciones Crespo y Humboldt se apartan del resto, estos registros fueron incluidos en el estudio considerando que resultaba más conveniente relajar la hipótesis de homogeneidad a efectos de ampliar el conjunto de información analizada.

Tabla IV. 9. Características estadísticas de las series

	Estaciones Pluviométricas					
	Crespo	Humboldt	Rafaela Met	San Cristóbal	Sauce Viejo	Vera
N° datos	63	52	31	35	36	34
\bar{P}	99.40	94.71	93.69	90.94	78.29	110.73
C_v	0.344	0.421	0.350	0.326	0.304	0.324
C_s	1.431	1.364	0.643	0.426	0.862	0.740

\bar{P} : media de la serie de valores máximos anuales

C_v : coeficiente de variación

C_s : coeficiente de asimetría

Los parámetros de la distribución de X se obtienen a partir de las series regionales, mediante alguna de las metodologías de estimación propuestas en la bibliografía especializada. En este trabajo se utilizó el promedio regional de momentos de probabilidad ponderada adimensionales. Básicamente, este método consiste en calcular para cada registro los momentos de probabilidad ponderada M_{10k} , $k = 0, 1, 2, \dots, v$ donde:

$$M_{ijk} = E \left[x^i F^j (1 - F)^k \right] \quad (\text{IV.13})$$

i, j, k : N° reales

F : probabilidad acumulada

E : operador esperanza

Estos valores se estandarizan dividiéndolos por M_{100} , media de la serie, y para cada k se calculan los promedios regionales como:

$$m_k = \sum_{j=1}^M \left[\frac{M_{10k}}{M_{100}} \right] \frac{N_j}{L} \quad (\text{IV.14})$$

siendo:

M : número de series utilizadas en el estudio

$$L = \sum_{j=1}^M N_j \quad (\text{IV.15})$$

N_j : longitud de la serie correspondiente a la estación j .

Se seleccionó una distribución Gumbel para la variable X , en concordancia con los ajustes de las estaciones individuales, se estimaron sus parámetros y se calcularon los valores X_T , variable asociada al tiempo de retorno, aplicables a cualquier estación en la región.

Si la mediana de las \bar{P} es 94,2 mm entonces se puede obtener la siguiente Tabla IV. 10

Tabla IV. 10. Recurrencias en las precipitaciones

Tr[años]	X_T	P [mm]
2	0.940	88.6
5	1.258	118.6
10	1.469	138.4
15	1.588	149.6
20	1.671	157.5
50	1.932	182.1
100	2.128	200.5
500	2.581	243.2
1000	2.776	261.5

Análisis de los resultados

Las precipitaciones asociadas a los tiempos de retorno (Tabla IV. 10) representan a las precipitaciones de las estaciones utilizadas desde un punto de vista regional.

Así por ejemplo la precipitación de 220 mm en 1 día registrada en Crespo en el evento de abril de 2003, que en la serie de tal estación tiene un TR= 125 años, en este análisis regional su TR es de 208 años; igualmente los 150 mm precipitados en 1 día en Vera tienen un TR= 8 años en la serie de su estación y TR= 15 años en el análisis regional. También, considerando la validez regional expresada con anterioridad, se podría decir que la precipitación de 205 mm el 28/04/03 en la localidad de Candiotti tuvo un TR= 118 años, a pesar de que Candiotti no fue una de las estaciones utilizadas para la regionalización.

5 CONCLUSIONES

Fueron analizadas las distribuciones espaciales de 7 tormentas ocurridas sobre a cuenca inferior del río Salado en territorio santafesino. Las mismas surgieron al considerar las 6 tormentas que produjeron los mayores picos de caudal en la sección hidrométrica de la Ruta Provincia 70 (RP70), además del evento que produjo el caudal máximo del año hidrológico 2001-2002. Los análisis fueron realizados sobre la base de la información pluviométrica diaria de 20 estaciones de la cuenca.

Se observó que la distribución espacial de las tormentas severas ocurridas sobre la cuenca inferior del río Salado no sigue un patrón definido, existiendo tanto casos de concentración en la zona norte, centro, como sur de la misma. Del mismo modo, se observó que se han presentado precipitaciones distribuidas sobre uno o dos núcleos.

El análisis del coeficiente de decaimiento areal de las precipitaciones permitió deducir que:

- el evento de abril de 2003 (analizado con 3 días de duración) no presentó características espaciales singularmente diferente de aquellos observados previamente durante la ocurrencia de tormentas severas que originaron situaciones críticas en la cuenca inferior del río Salado (en particular en lo referente a su coeficiente de decaimiento areal);
- como resultado de la mayor superficie abarcada por las tormentas críticas observadas en la cuenca inferior del río Salado en territorio santafesino, las mismas presentaron un abatimiento espacial superior a aquel citado en la literatura para la región sur de la provincia de Santa Fe para condiciones de proyecto (lluvias de diseño de obras hidráulicas).

A los fines de caracterizar el comportamiento de las precipitaciones ocurridas durante el evento de abril/mayo de 2003 se realizó el análisis estadístico de precipitaciones diarias con duraciones de 1, 2 y 3 días. Los mismos permitieron concluir que el evento de precipitación en abril de 2003 posee un tiempo de retorno (o recurrencia) relativamente bajo. Sin embargo, el evento hidrológico asociado, que comprende las características de la tormenta (duración, distribución temporal, distribución espacial, intensidad) y las condiciones de humedad antecedente del suelo, corresponde a una menor probabilidad de ocurrencia.

Con base en los resultados del test estadístico de Kendall, aplicado para analizar la estacionaridad de 6 series de precipitaciones de la cuenca santafesina del río Salado, no se pudo afirmar que existe una tendencia de cambio en las precipitaciones tanto anuales como las referidas a las diarias máximas. La importancia de este hecho radica, fundamentalmente, en estas últimas, ya que las mismas son las que originan primordialmente las crecidas.

Se puede concluir que el método de regionalización utilizado supone que las series anuales máximas de varios lugares en una región son similares con respecto a las características estadísticas. Esta suposición de homogeneidad es una simplificación grosera, pero es muy

conveniente y efectiva ya que, como se lo ha empleado en este caso, ha permitido considerar que los valores de precipitación acontecidos en los núcleos se pueden asignar a cualquier lugar geográfico del ámbito regional representado por los registros tomados como base.