

Estimación de la distribución espacial de tormentas intensas, mediante isoyetas elípticas, en zonas de limitada disponibilidad de datos.

Jorge Fabián Bonilla

Instituto Nacional del Agua, Centro Regional Andino, Belgrano Oeste 210, Capital, Mendoza

E-mail: jbonilla@ina.gob.ar – jbonilla@live.com.ar

RESUMEN: En el proceso de generación de las tormentas de diseño, se necesita establecer en primer lugar la relación entre la intensidad esperada de las mismas para una determinada duración y recurrencia. Este procedimiento arroja como resultado una serie de curvas conocidas como I-D-F y debe ser acompañado por la distribución espacial y temporal esperada.

Cuando los datos pluviométricos disponibles son limitados, se producen inconvenientes al momento de la determinación de los parámetros correspondientes a las tormentas de diseño. En particular cuando el número de estaciones que registraron un evento en forma simultánea es menor que 5, la construcción de isoyetas no es factible realizarla con una adecuada aproximación.

El objetivo del trabajo es presentar un nuevo método para la obtención de la distribución espacial y la curva de decaimiento, para tormentas intensas mediante el uso del modelo de isoyetas elípticas.

Mediante la combinación de un complejo proceso matemático, el criterio para la determinación de ciertas hipótesis y un proceso iterativo realizado mediante un software creado específicamente, se logra determinar cuál es la forma más adecuada del decaimiento espacial en las cercanías del núcleo de la tormenta.

El decaimiento espacial permite generalizarlo a distintas áreas mediante la creación de una curva decaimiento en función del área y generar un modelo de isoyetas elípticas que puede ser aplicado a una cuenca, para estudiar los efectos hidrológicos esperados como respuesta a una precipitación intensa.

El modelo fue aplicado a las tormentas históricas registradas en el piedemonte de la Ciudad de Mendoza, seleccionando en forma aleatoria 3 o 4 pluviómetros, dentro de los disponibles, dando excelentes resultados respecto a la distribución espacial de las mismas, en comparación con las curvas obtenidas mediante estudios de mayor profundidad.

OBJETIVO

El objetivo del trabajo es presentar un nuevo método para la obtención de la distribución espacial y la curva de decaimiento, para tormentas intensas mediante el uso del modelo de isoyetas elípticas.

INTRODUCCIÓN

El Arroyo El Tigre es un curso de agua afluente al Río Diamante ubicado a pocos kilómetros de la Ciudad de San Rafael en Mendoza y del Embalse los Reyunos. San Rafael se encuentra dentro de la zona templada argentina, la temperatura media anual oscila entre los 8 y 23 grados.

El régimen de lluvia es estival, siendo su período más intenso entre los meses de setiembre y febrero, con una precipitación media cercana a los 350 mm anuales. Las tormentas tienen una duración en algunos casos de varias horas y con núcleos de gran área, presentando un escaso decaimiento espacial.

Para caracterizar las tormentas de diseño, se necesita establecer en primer lugar la relación entre la intensidad esperada de las mismas para una determinada duración y recurrencia. Este procedimiento da como resultado las curvas I-D-F y debe ser acompañado por la distribución espacial y temporal esperada.

Cuando los datos pluviométricos disponibles son limitados, se producen inconvenientes al momento de la determinación de los parámetros de distribución espacial, correspondientes a las tormentas de diseño. En particular cuando el número de estaciones que registraron un evento en forma simultánea es menor que 5, la construcción de isoyetas no es factible realizarla con una adecuada aproximación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Información disponible en la Zona de Estudio

En el INA Centro Regional Andino se desarrolló un estudio hidrológico en el Departamento de San Rafael, Provincia de Mendoza. La zona de trabajo es sobre el Arroyo El Tigre, afluente al Río Diamante.

Por su cercanía geográfica, se podría pensar en una primera instancia que es posible utilizar las curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia (I-D-F) que el Centro Regional Andino ha desarrollado para el piedemonte de la Ciudad de Mendoza, que además contienen información del decaimiento espacial y la distribución temporal de las tormentas de proyecto. Esta hipótesis queda rápidamente descartada porque la zona de San Rafael posee un clima y una vegetación diferente a la ciudad de Mendoza, lo que lleva a pensar que las precipitaciones son diferentes.

Las tormentas de verano en el área del piedemonte de Mendoza se caracterizan por tener núcleos pequeños, presentar alta intensidad y escasa duración, dentro de períodos aproximados de 1 hora. En el caso de San Rafael, de los valores de precipitación registrados, se deduce que los núcleos son de mayores áreas las duraciones superiores a 3 horas en muchos casos y las intensidades algo menores a la ciudad de Mendoza.

Este análisis desecha la posibilidad de utilizar las curvas I-D-F mencionadas, debiendo encontrarse nuevas relaciones compatibles con las características de la zona de estudio. Se debe determinar la relación de Intensidad de Precipitación respecto a la Duración para varios Tiempos de Recurrencia (TR). Además, se debe encontrar la curva de decaimiento espacial y la distribución temporal de la tormenta de proyecto.

Determinación de la relación I-D-F

El estudio estadístico de los datos disponibles, junto con la aplicación de técnicas de escalamiento, permitieron encontrar las relaciones I-D-F buscadas (Maza, López, Burgos, Bonilla, & Salcedo, 2016). Este punto no es objeto de este informe, por lo que se presenta solamente los resultados obtenidos para una tormenta de duración de 6 hs (**Tabla 1**). Tampoco se analiza aquí la determinación del hietograma de diseño.

Tabla 1.- Precipitación (mm) en el núcleo de la tormenta de proyecto para diferentes TR (años)

TR ₂	TR ₅	TR ₁₀	TR ₂₅	TR ₅₀	TR ₁₀₀	TR ₂₀₀
48.6	74.4	91.2	113.4	129	145.2	161.4

Modelo de distribución espacial (puntual) de precipitación

La disponibilidad de datos de precipitación en el área de influencia del proyecto es el mejor de los casos de 3 a 4 estaciones de precipitación que registran los eventos en forma simultánea, lo que no permite realizar el trazado de isoyetas de tormentas históricas, por lo que se utilizó un patrón de isoyetas elípticas. El modelo de decaimiento de lluvia puntual, sobre el eje menor de la elipse se muestra en la **Ecuación 1** y la **Figura 1**:

$$P = P_{nucleo} \cdot e^{-k \cdot d^2} \quad (1)$$

Donde:

- P_{nucleo}*: Precipitación en el núcleo del patrón de isoyetas elípticas
- d*: Distancia desde el núcleo de la precipitación al punto considerado
- P*: Precipitación en un punto situado a una distancia '*d*'
- k*: Coeficiente de decaimiento espacial

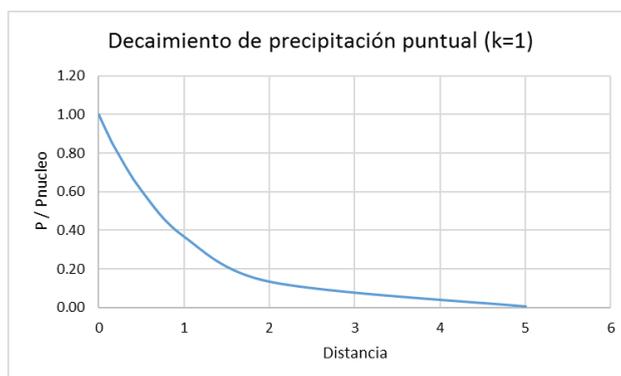


Figura 1.- Forma del decaimiento puntual para el modelo utilizado

Para el caso del proyecto desarrollado se determinó 'k' a partir de los datos de precipitación existentes en las estaciones de San Rafael, Los Reyunos y La Ollada, donde se presentaban casos de tormentas simultáneas.

El modelo de isoyetas elípticas obtenido (**Figura 2**) es muy sensible a este parámetro *k*, por lo que, en caso de obtener mayor cantidad de datos de precipitación, provenientes de fuentes confiables, deja abierta la posibilidad de mejorar su determinación.

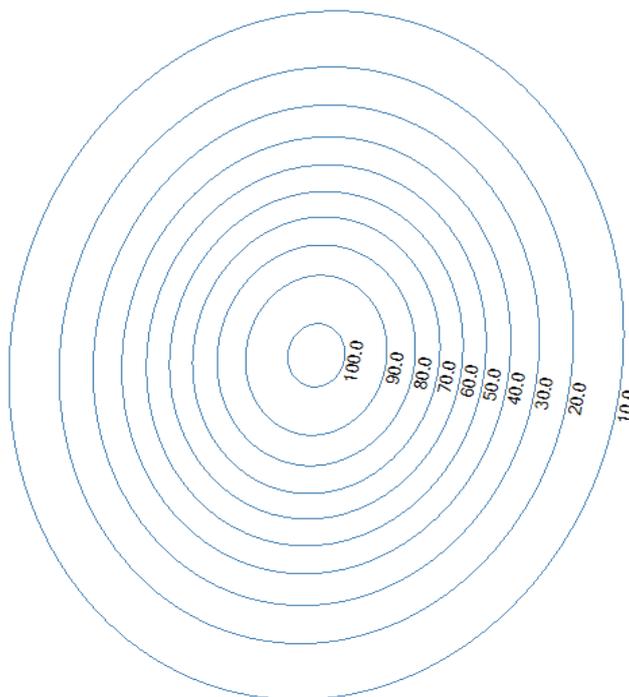


Figura 2.- Distribución espacial de la tormenta de proyecto en porcentaje del núcleo

Estimación de la curva de decaimiento espacial (areal)

El modelo de decaimiento espacial (puntual) es válido solamente para la dirección correspondiente al eje menor de las elipses. Se debe determinar la curva de decaimiento espacial en función del área considerada.

Por un tema de extensión del trabajo y pretendiendo exponerlo de manera simple, se ha obviado los desarrollos matemáticos que permite arribar a las Ecuaciones 3 y 5.

Se define el parámetro 'c' como la relación entre los diámetros principales de las elipses (**Ecuación 2**):

$$c = \frac{a}{b} \quad (2)$$

Donde:

a: Radio mayor de la elipse

b: Radio mayor de la elipse

Se relaciona con el coeficiente de decaimiento espacial ' k ' a través de la **Ecuación 3**:

$$k = w \cdot c \quad (3)$$

Donde:

- k : Es el coeficiente de decaimiento espacial
- w : Es el coeficiente de decaimiento regional
- c : Es la relación entre los radios de las elipses

La diferencia entre k y w , es que el primero representa la forma en que disminuye la precipitación a lo largo del eje menor de las elipses y el segundo se demuestra que es un valor único para la región. Adaptando la nomenclatura para el caso del modelo de isoyetas elípticas, se determina el valor de la precipitación en una elipse genérica con la **Ecuación 4**:

$$P = P_c \cdot e^{-k \cdot b^2} \quad (4)$$

Donde:

- P_c : Precipitación máxima (en el centro de las elipses)
- b : Radio menor de la elipse considerada

El coeficiente w es un valor único regional, vinculado directamente con el decaimiento espacial típico de las precipitaciones como muestra la **Ecuación 5**:

$$\%P = \frac{P_m}{P_c} = \frac{\pi}{w \cdot A} \cdot \left(1 - e^{-\frac{w \cdot A}{\pi}}\right) \quad (5)$$

Siendo además de los términos descriptos:

- P_m : Precipitación media en un área dada
- P_c : Precipitación puntual en el centro de las elipses
- A : Área de la elipse considerada
- w : Coeficiente de decaimiento regional
- $\%P$: Porcentaje de precipitación para el área dada

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Cálculo del coeficiente 'w'

La calibración del modelo pasa por la determinación del coeficiente regional 'w', para lo cual en principio se puede hacer a partir de la curva de decaimiento espacial de la zona.

Debido a que el modelo es nuevo y fue desarrollado para este estudio, se lo valida aplicándolo a la zona del piedemonte de la Ciudad de Mendoza, donde el INA-CRA tiene registros de precipitación de más de 30 años y los mismos han sido estudiados por diferentes investigadores, logrando disponer de isoyetas de tormentas históricas (Fernandez, Fornero, & Rodriguez, 1999) y curvas IDF, complementadas por el hietograma patrón y la curva de decaimiento espacial (INA Centro Regional Andino, 2008).

Utilizando la condición de mínimos cuadrados se calcula el valor de 'w' para que se produzca el mejor ajuste con la curva de decaimiento espacial del INA-CRA (**Figura 3** y **Figura 4**):

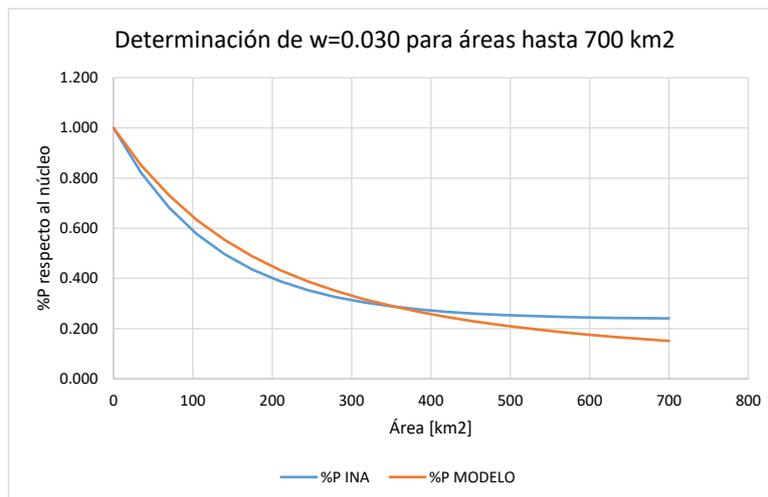


Figura 3.- Ajuste del valor 'w' para la curva de decaimiento espacial del INA-CRA (hasta 700 km^2)



Figura 4.- Ajuste del valor 'w' para la curva de decaimiento espacial del INA-CRA (hasta 300 km^2)

Obteniendo:

$$w = 0.030 \text{ para cuencas de hasta } 700 \text{ km}^2$$

$$w = 0.035 \text{ para cuencas de hasta } 300 \text{ km}^2$$

Validación del modelo

Se toman distintas tormentas históricas de Mendoza, donde las isoyetas existentes han sido obtenidas a través del procesamiento de los valores obtenidos de los pluviómetros de la red.

Para apreciar la bondad del modelo, se tomaron únicamente tres datos de precipitación, en la zona cercana al núcleo y se modeló las correspondientes isoyetas elípticas. Se puede apreciar en las **Figura 5**, **Figura 6** y **Figura 7**, que el ajuste es limitado respecto a la ubicación del núcleo, pero bueno respecto a la distribución espacial.

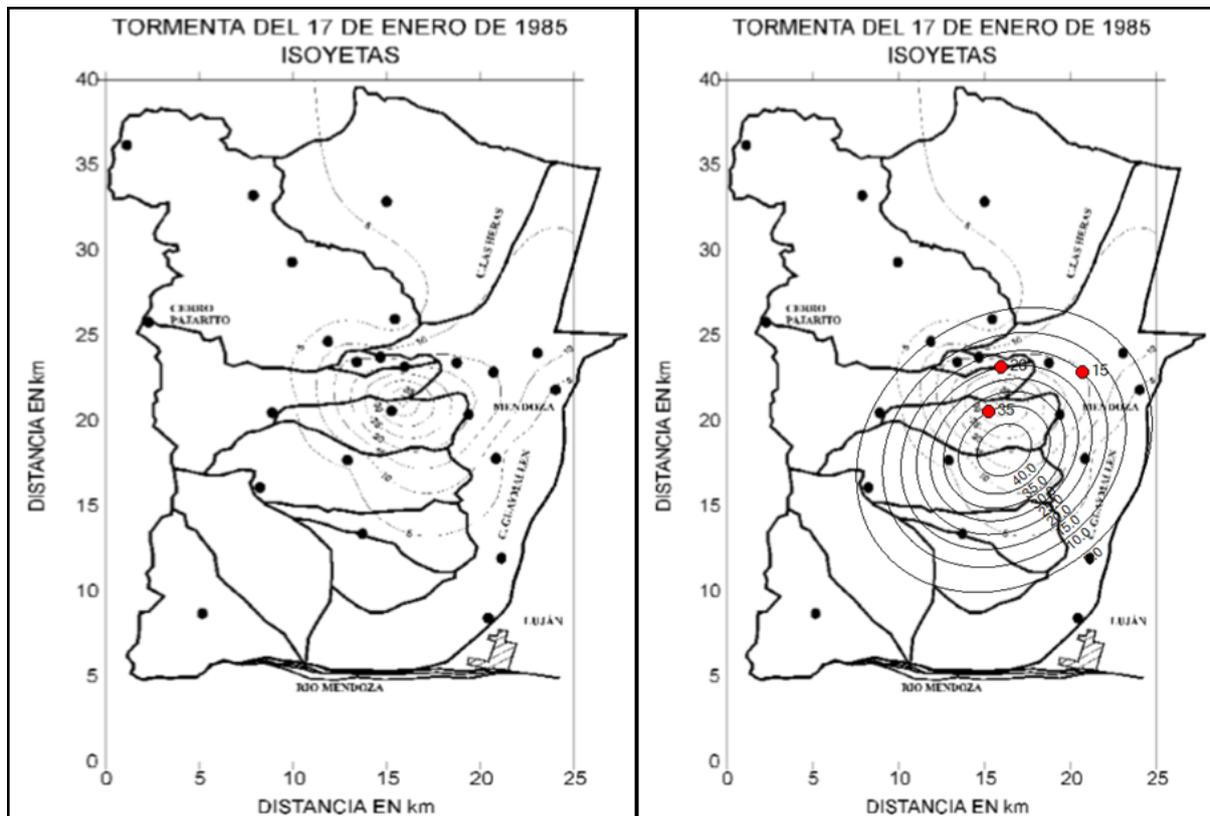


Figura 5.- Tormenta del 17 de enero de 1985

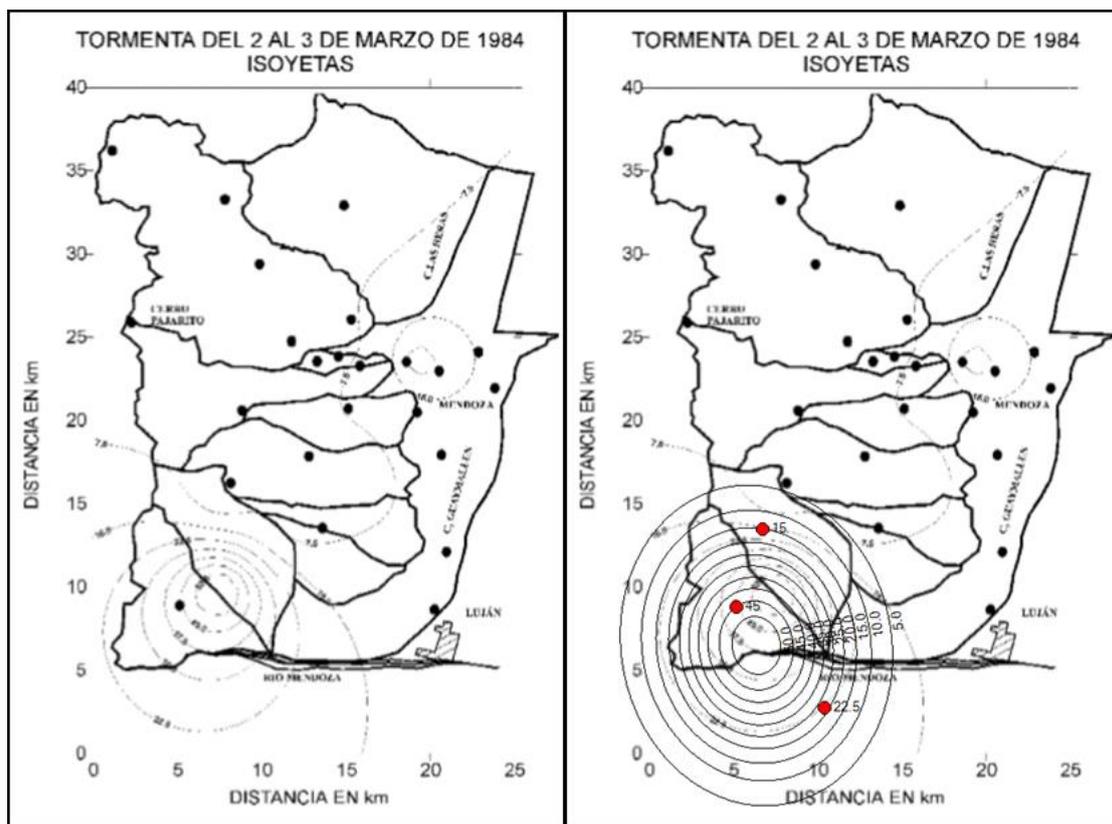


Figura 6.- Tormenta del 2 al 3 de marzo de 1984

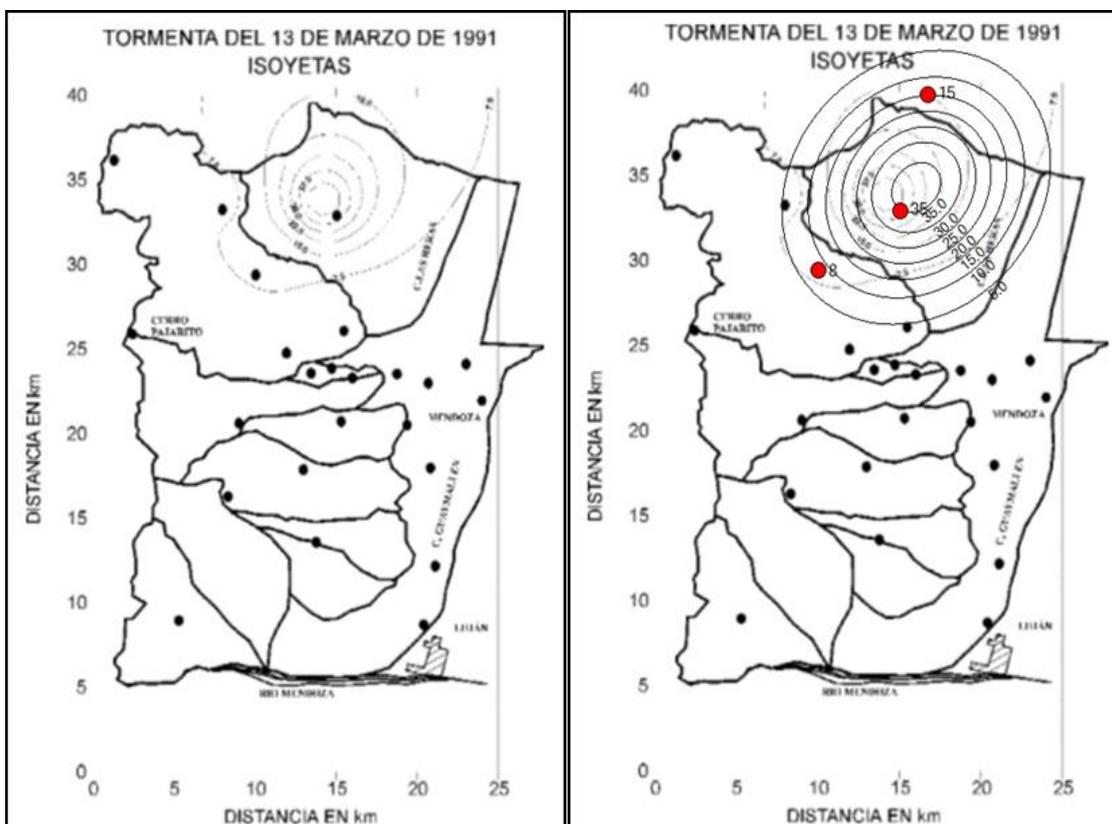


Figura 7.- Tormenta del 13 de marzo de 1991

CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA LA ZONA DE TRABAJO

El problema en la zona de San Rafael donde se encuentra la zona de estudio, es que no se disponen de curvas de decaimiento espacial para poder realizar la calibración mediante el método descripto.

Datos disponibles

Un resumen de los resultados del estudio de eventos simultáneos en la zona, incluyendo lluvias mayores a la media de los máximos anuales al menos en una estación, se presenta en la **Tabla 2** y sirven como datos de partida para la calibración del modelo.

Tabla 2.- Eventos de precipitación diarios y simultáneos expresados en mm

	San Rafael	Los Reyunos	La Ollada
28/11/1989	4.0	0.0	72.0
29/11/1989	16.0	0.0	16.0
30/11/1989	0.0	13.0	SD
01/12/1989	0.0	0.0	0.6
Total evento	20.0	13.0	88.6
04/01/1991	78.0	25.0	25.4
27/03/1993	0.0	12.0	20.0
28/03/1993	68.0	0.0	SD
Total evento	68.0	12.0	20.0
09/10/1994	0.0	33.5	153.4
10/10/1994	141.0	129.5	12.5
11/10/1994	4.0	20.4	SD
Total evento	145.0	183.4	165.9
11/12/1997	0.0	15.0	SD
12/12/1997	80.0	80.0	88.2
13/12/1997	22.0	0.0	40.2
Total evento	102.0	95.0	128.4

Método para la estimación del coeficiente regional 'w'

Si se tiene en cuenta que el coeficiente 'w' es único para la región y que no depende de la relación de diámetro de las elipses 'c', tomando ésta como 1 se tiene la **Ecuación 6**:

$$w = k \quad (6)$$

Esto significa que en el caso de considerar el caso extremo que las elipses sean círculos, se puede calcular un valor de 'k', que coincide numéricamente con 'w'.

Dado tres puntos de precipitación y un valor de 'k' se puede determinar el punto central y el valor de una serie de círculos, representativos de isoyetas, que cumplan con la **Ecuación 7**:

$$P = P_c \cdot e^{-k \cdot r^2} \quad (7)$$

Tomando un juego de valores de precipitación ubicados en las coordenadas de las estaciones de medición se puede apreciar en la **Figura 8** las estaciones en celeste y en naranja los puntos centrales para un intervalo de 'k' de [0.0008, 0.008].

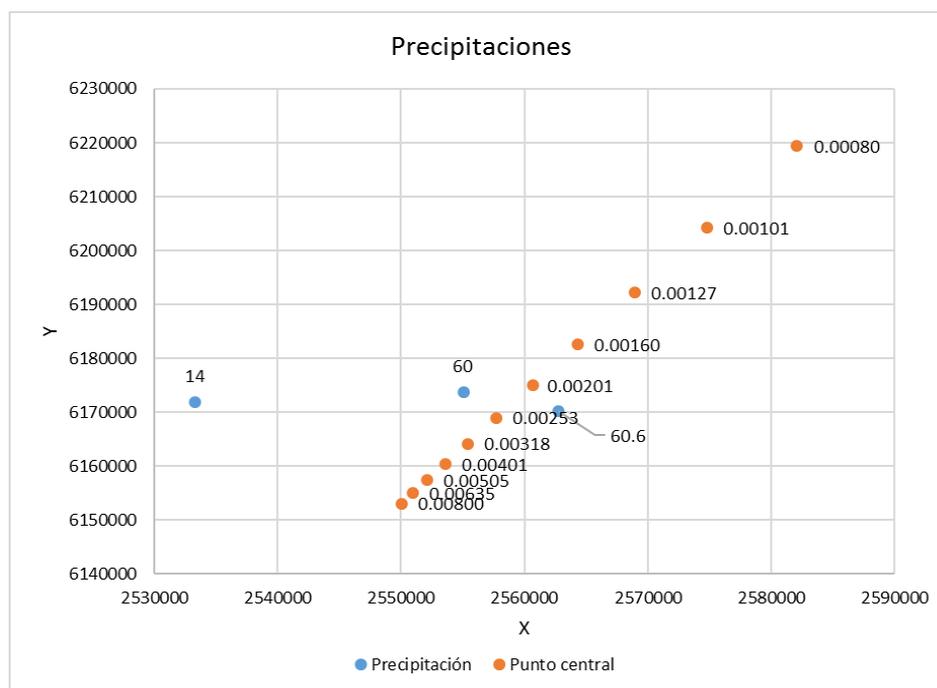


Figura 8.- Variación del punto central de las isoyetas en función de los valores de k

A los efectos de facilitar el cálculo se ordenaron las precipitaciones de mayor a menor. Los resultados obtenidos se resumen en la **Tabla 3**, donde además se muestra el valor del valor central ' P_c ' y la distancia entre la posición del valor más alto de lluvia y el centro calculado.

Tabla 3.- Cálculo de los parámetros de las isoyetas circulares en función de k

k	Xc	Yc	Pc	Dist [km]
0.00080	2582072.4	6219361.7	566.18	52.9
0.00101	2574751.0	6204213.2	225.10	36.1
0.00127	2568935.4	6192180.3	117.56	22.9
0.00160	2564315.9	6182622.2	77.90	12.5
0.00201	2560646.5	6175029.9	64.09	5.3
0.00253	2557731.7	6168999.2	64.77	5.1
0.00318	2555416.5	6164208.8	80.47	9.4
0.00401	2553577.4	6160403.6	124.33	13.4
0.00505	2552116.6	6157381.1	244.47	16.6
0.00635	2550956.2	6154980.2	634.21	19.2
0.00800	2550034.5	6153073.1	2283.74	21.3

Se puede apreciar que para valores de ‘ k ’ chicos la distancia al centro de la precipitación aumenta considerablemente, atentando contra una de las hipótesis del modelo que es tener mediciones cercanas al núcleo de la precipitación.

Para el caso de valores altos de ‘ k ’, las distancias crecen, pero en menor medida, aunque el valor de la precipitación en el núcleo se dispara a valores poco probables. Este comportamiento se puede apreciar en la

Figura 9:

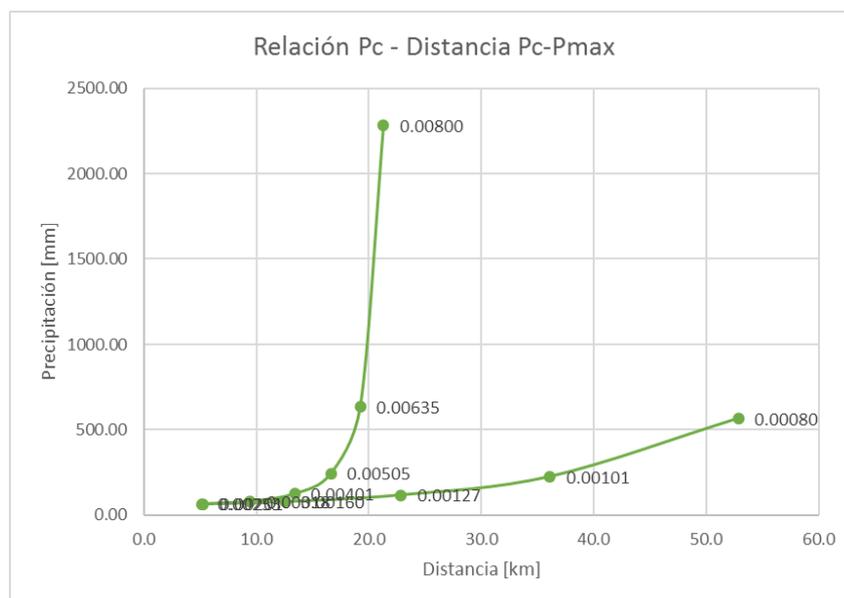


Figura 9.- Relación entre P_c y distancia al punto central de la estación con mayor valor registrado para distintos ‘ k ’

El análisis de este gráfico permite deducir que ‘ k ’ no puede tomar cualquier valor, para mantener los límites razonables de trabajo, por el contrario, se reduce a un pequeño intervalo en el cual los parámetros no se disparan a valores poco útiles.

También se puede comprobar que el valor obtenido para la zona del piedemonte de Mendoza es imposible de aplicar en este caso, debido a que su valor 0.030 – 0.035, está evidentemente muy lejos de los límites aquí expuestos. Eso se explica considerando que la distribución espacial de las tormentas de Mendoza es mucho más localizada que las producidas en la zona de San Rafael, por lo que su valor de ‘ k ’ y por lo tanto de ‘ w ’ son notablemente superiores.

Analizando con más detalle la zona de convergencia de las curvas mostradas, se tiene que ambas empalman con una suave curva que se ve en la **Figura 10:**

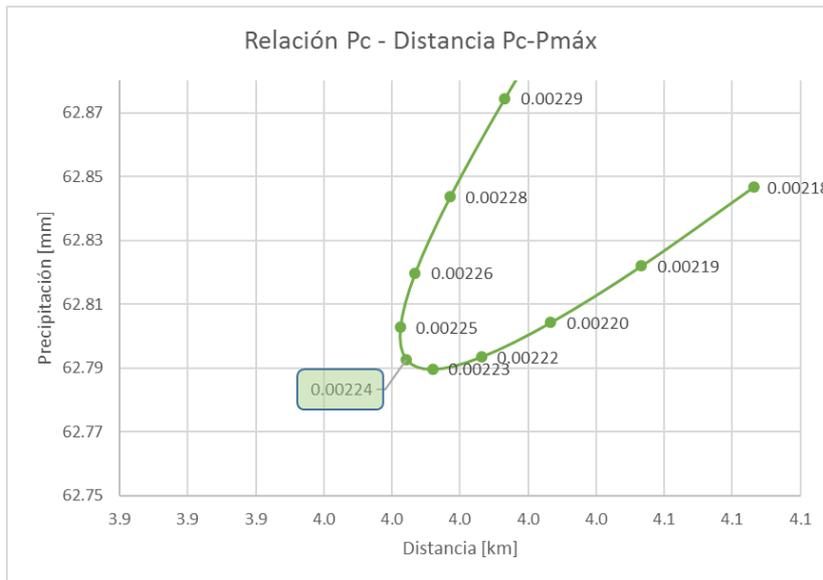


Figura 10.- Zona de empalme de curvas para variaciones de k pequeñas

No hay una razón técnica (al menos obtenida hasta el momento de esta investigación inicial), que permita decir que el valor adecuado de ' k ', y por lo tanto de ' w ' es el resultado, aunque con cierto fundamento se puede decir que debe estar en el entorno de este valor.

Cálculo del coeficiente regional 'w'

Se analizan los datos disponibles mediante la técnica descrita y se traza un círculo tangente a la zona de empalme. El promedio de los valores de contacto se toma como ' k ', como muestra la **Figura 11**.

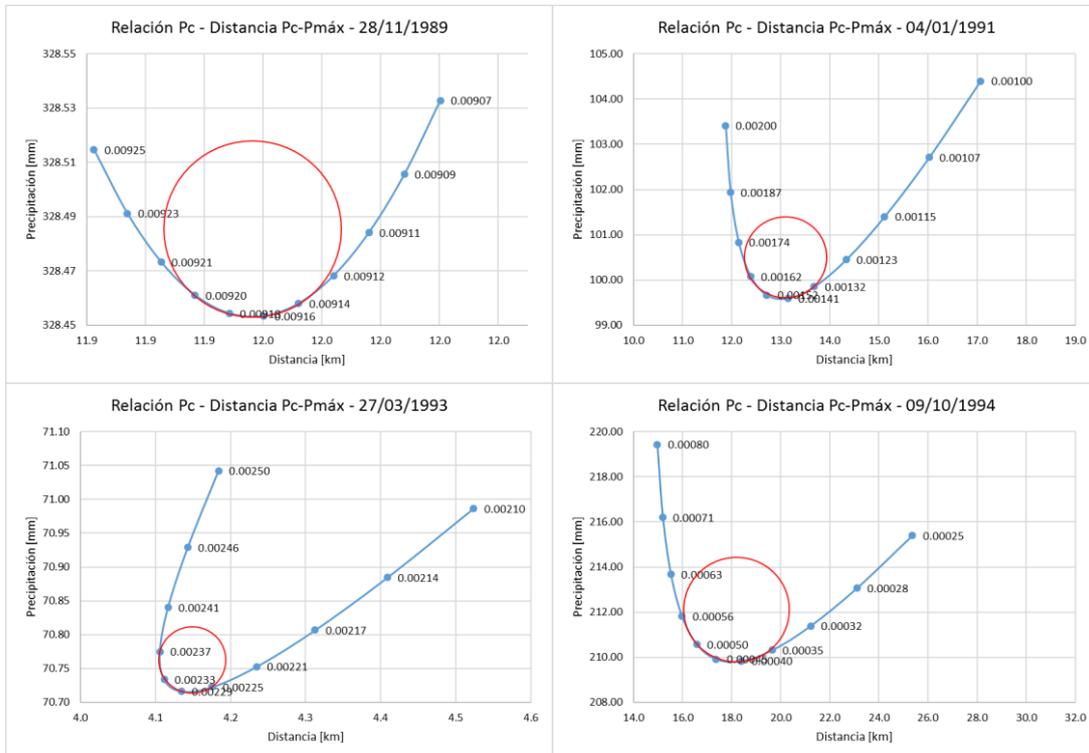


Figura 11.- Estimación del coeficiente ' k ' en función de los datos disponibles

La **Tabla 4** resume los valores obtenidos para cada registro. Los resultados se grafican juntos para poder analizarlos, como se ve en la **Figura 12**. El primer valor está evidentemente fuera de rango, por lo que luego de descartarlo queda finalmente lo indicado en la **Figura 13**.

Tabla 4.- Resultados del cálculo de k para los datos de partida

Registro	Fecha	k			P _{máx} [mm]	P _{media} [mm]	P _{mín} [mm]
		Desde	Hasta	Medio			
1	28/11/1989	0.00914	0.0092	0.00917	88.6	20	13
2	4/1/1991	0.00132	0.00162	0.00147	78	25.4	25
3	27/3/1993	0.00225	0.00237	0.00231	68	20	12
4	9/10/1994	0.00035	0.00056	0.000455	183.4	165.9	145
5	11/12/1997	0.00137	0.00153	0.00145	128.4	102	95
6	30/10/1999	0.00058	0.00076	0.00067	77	75.7	66
7	25/2/2001	0.00197	0.00206	0.002015	180	35.6	30.5
8	20/3/2001	0.00195	0.00205	0.002	107.6	81	70.5
9	27/3/2007	0.00192	0.00198	0.00195	191.7	121.2	75.6
10	25/12/2007	0.00262	0.00271	0.002665	78	42.2	40.9
11	6/2/2008	0.00062	0.0007	0.00066	87.1	73	63
12	7/12/2009	0.00222	0.00225	0.002235	60.6	60	14

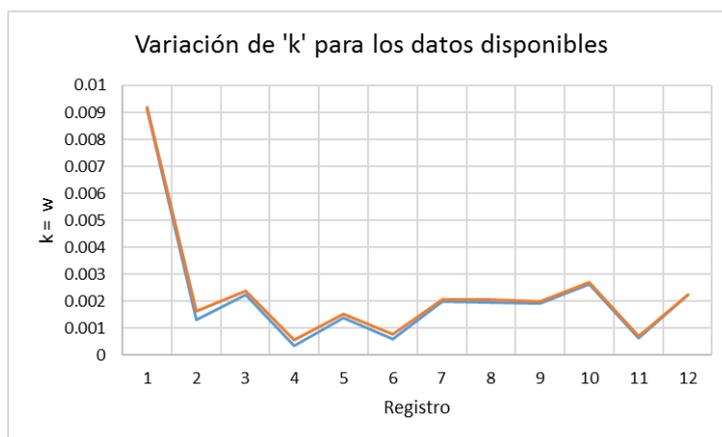


Figura 12.- Variación de k para los datos de partida



Figura 13.- Variación de k para los valores de partida excluyendo los fuera de rango

Los valores oscilan entre 0.0005 y 0.0025, resultando adecuado un análisis de sensibilidad para determinar cuál es la menor variación que se puede considerar significativa.

Recordando que el valor obtenido de 'k' es numéricamente equivalente a 'w', se construyen las curvas de decaimiento espacial para distintos valores de 'w', obteniendo las **Figura 14** y **Figura 15**, para intervalos de 0.0005 y 0.001. Además, para referencia se grafica la curva de decaimiento para $w = 0.030$ (zona del piedemonte de Mendoza) y las propuestas por el INA-CRA.

Se aprecia en la **Figura 14** que tomar un intervalo de 0.0005, produce un cambio entre curvas inferior a la diferencia entre el ajuste de $w = 0.030$ y las del INA-CRA. Hay que tener en cuenta que este último caso, el ajuste es muy fiable por disponer de curvas de decaimiento espacial de mucha calidad.

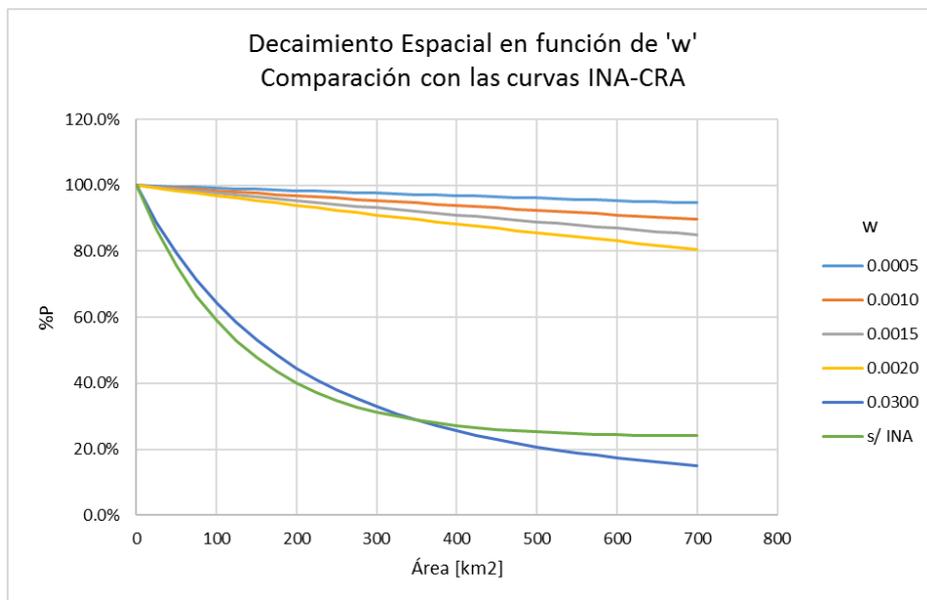


Figura 14.- Curvas de decaimiento espacial para distintos valores de 'w' con intervalo de 0.0005

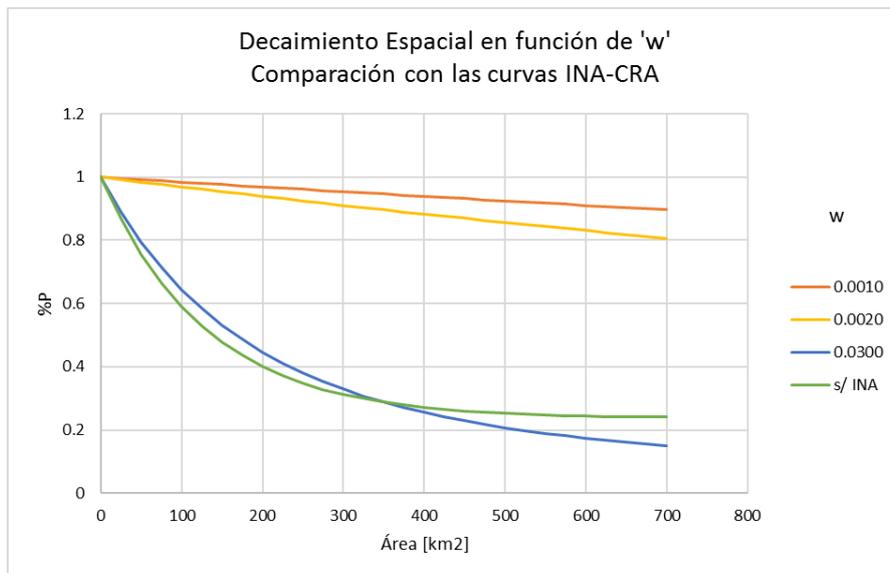


Figura 15.- Curvas de decaimiento espacial para distintos valores de 'w' con intervalo de 0.0005

En San Rafael el ajuste al que se puede aspirar es menor por el tipo de datos de partida (no se disponen de curvas de decaimiento), por lo que se concluye que el intervalo a adoptar no puede ser menor a 0.001, que produce una variación similar a la máxima esperable, como muestra la **Figura 15**.

Dentro del rango de valores que se encuentra 'k' y teniendo en cuenta que el análisis presenta una serie de incertidumbres insalvables, se decide adoptar el valor de 0.001, que implica adoptar por consiguiente un decaimiento inferior, y por lo tanto maximizando los parámetros hidrológicos obtenidos, como la precipitación media, para estar siempre del lado de la seguridad.

Finalmente se tiene:

$$w = 0.001$$

CONCLUSIONES

El trabajo permite estimar la forma de la curva de decaimiento espacial en zonas con pocos datos de precipitación disponible. Además, define, analiza y verifica un nuevo coeficiente 'w' denominado coeficiente de decaimiento regional, que resulta único para la zona, determinando que para el piedemonte de Mendoza su valor es de 0.030, mientras que para la zona de San Rafael está en el orden de 0.001, mostrando la gran diferencia de comportamiento en la distribución de las precipitaciones intensas.

REFERENCIAS

- Fernandez, P. C., Fornero, L. A., & Rodriguez, S. (1999). *Sistemas hidrometeorológicos en tiempo real*. Buenos Aires: Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria.
- INA Centro Regional Andino. (Marzo de 2008). *Relaciones Intensidad Duración Frecuencia (IDF) para el pedemonte del Gran Mendoza*. Obtenido de http://www.ina.gov.ar/pdf/CRA-IDF%20Mendoza%20INA_2008.pdf
- Maza, J. A., López, P. M., Burgos, V. H., Bonilla, J. F., & Salcedo, A. P. (2016). *Estudio Aluvional Integral de las cuencas que inciden sobre el Complejo Minero Fabril San Rafael*. Mendoza: INA Centro Regional Andino.