

DISTRIBUCION ESPACIAL 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 Consejo de Investigaciones UNR.
Riobamba 245 bis (2000) Rosario. Santa Fe. Argentina, e-mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta un modelo estadístico de distribución espacial de tormentas basado en el uso de semivariogramas (SV) típicos del área de estudio, los cuales se utilizan en la metodología de interpolación espacial de kriging.

Para la determinación de los mismos se tomó una muestra representativa conformada por 11 tormentas registradas en 30 localidades, todas ubicadas en la cuenca del Arroyo Saladillo (Santa Fe, Argentina), en un área de influencia aproximada de 3000 km². Las tormentas, seleccionadas en el período 2002-2007, fueron de cinco días de duración con una media areal ponderada superior a los 75 mm.

Se observó un patrón lineal de los SV para las tormentas medias diarias mayores a 35 mm y un patrón exponencial para las tormentas menores. Los parámetros que definen los SV se relacionaron con la precipitación máxima del evento obteniéndose una buena correlación. Esto permite pronosticar un comportamiento espacial para la tormenta de diseño, asignando un patrón lineal para el SV, cuya pendiente y ordenada al origen se obtienen a partir de la lámina de lluvia propuesta.

La confección del patrón espacial de la tormenta se basó, entonces, en la metodología de interpolación de kriging considerando un decaimiento conforme al SV caracterizado por la lámina del foco de la tormenta, la cual es estimada previamente.

PALABRAS CLAVE: distribución espacial, tormenta de diseño, kriging

INTRODUCCIÓN

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, (Riccardi, *et al.* 2008), 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.

Una vez definidas la precipitación de diseño, su distribución temporal y la humedad antecedente asociada probabilísticamente a la tormenta de diseño, en este trabajo se persigue el objetivo de proponer un criterio de distribución espacial para la misma en las cuencas analizadas.

El estudio realizado 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

El problema bajo estudio es la transformación de lluvia puntual a lluvia areal. Existen procedimientos de diversos orígenes, pero se pueden agrupar en forma general en dos grandes metodologías: (a) esquemas determinísticos y (b) esquemas estadísticos ó estocásticos.

Los primeros emplean funciones matemáticas de varios tipos y grados de complejidad para ajustar superficies $z(x)$ a través de los puntos, donde x representa a las coordenadas espaciales. Una vez que esto se hace puede determinarse el valor del estimador $z'(x)$ de la superficie $z(x)$ para cualquier posición. Los métodos estadísticos parten de la base que los datos espaciales proceden de una realización de procesos aleatorios. Consecuentemente, la estimación de $z(x)$ puede hacerse en términos de probabilidad. Las funciones empleadas para la modelación están basadas en expresiones de probabilidad simples en el dominio espacial.

La selección del método de la interpolación depende principalmente de la naturaleza de la variable y su variación espacial asociada; aunque hay otras influencias. En cuanto al campo de las precipitaciones, las lluvias convectivas, por ejemplo, pueden presentar patrones erráticos de manera tal que ninguna metodología de interpolación resulta útil, dado que la densidad instrumental no es suficiente. Además del errático comportamiento de la lluvia, existen problemas de discontinuidades espaciales, con lugares de lluvia nula entre contornos lluviosos.

Aquí se debe hacer la siguiente salvedad: se pretende respetar la estructura espacial de la lluvia *en un sentido estadístico*, considerando patrones generales observados para el campo, sin pretensiones de reproducir, por ejemplo, celdas convectivas tal como físicamente se producen. El objetivo de proponer una distribución espacial para la tormenta de diseño, parte de la premisa que es una precipitación sintética y la misma no hace referencia a una tormenta histórica ocurrida.

Esquemas de interpolación estadística

El principio básico de interpolación establece la suposición que en distancias cortas es probable que los valores de una variable sean más similares que a distancias más grandes. Para examinar si esto es verdad y analizar cómo cambia la "similaridad" con la distancia se debe realizar una exploración de los datos espaciales.

Pueden compararse los valores de $z(x)$ de a pares y expresarse tales comparaciones en función de varianzas o covarianzas. La estructura de la correlación espacial puede examinarse de varias maneras, pero normalmente es analizada por el método llamado *semi-varianza*. La semi-varianza es una medida del grado de dependencia espacial y se define como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

donde n es el número de pares de puntos con distancia de h , $z(x_i)$ es el valor de la variable a la posición x_i y $z(x_i+h)$ es el valor a una distancia h de x_i . Las distancias h entre los pares de puntos de la observación se llaman retraso ó lag.

La gráfica de la semi-varianza contra distancia h se denomina *semi-variograma*. En este tratamiento se asume que la variación es independiente de lugar y dirección (propiedad de isotropía). El semi-variograma es una herramienta básica para examinar la estructura de correlación espacial.

El denominado *umbral* del semivariograma es un valor meseta que alcanza a una distancia (o retraso) referida como *rango*. El umbral es a menudo igual a la varianza estadística de la serie de datos. El rango es la distancia a la que el umbral se alcanza, indicando que los valores de la variable no están más correlacionados a distancias mayores que el rango.

Se considera que la presencia de una parte horizontal de la curva en el semi-variograma experimental es un caso ideal. En ciertos casos, el variograma experimental no exhibe un umbral y esto se da en algunos casos donde cabe esperar que el patrón espacial no es estacionario. En otros casos, suele ocurrir que para $h = 0$, la varianza no se anula, dando lugar a un efecto denominado "pepita" o "nugget" y el mismo puede asociarse a errores de medición.

Método de kriging.

El objetivo del método de krigeado es obtener una estimación de una variable $z(x)$, en determinada región como una combinación lineal de valores medidos en puntos de observación y además conocer la varianza del error de estimación. Por ser lineal el estimador se puede expresar de la siguiente forma:

$$z'(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

donde n es el número de puntos de observación, $z'(x)$ es el estimador de la variable en la posición x y los parámetros λ_i se denominan coeficientes de ponderación o coeficientes de krigeado.

El error de estimación es la diferencia entre el valor estimado y el verdadero (desconocido) $z'(x)-z(x)$, el cual debe ser minimizado. Así, el error de estimación debe tener el error medio cuadrático más pequeño, que constituye la condición de mínima varianza. La varianza del error se minimiza usando la teoría de funciones aleatorias y aplicando mínimos cuadrados resultando un sistemas de ecuaciones lineales. Los pesos óptimos son determinados resolviendo:

$$\Gamma(x_i, x_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \gamma(x_i, x_j) + v \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (4)$$

donde el sistema de ecuaciones (3) se extiende con $i=1, \dots, n$, $\gamma(x_i, x_j)$ es la semi-varianza de los estimados $z'(x_i)$ y $z'(x_j)$, x_i, x_j es la distancia entre los puntos muestrados, $\Gamma(x_i, x_0)$ es la semi-varianza del valor estimado $z'(x_i)$ y de la variable aleatoria z' en el punto de interpolación x_0 , v es un parámetro conocido como parámetro de Lagrange.

Para las semi-varianzas $\gamma(x_i, x_j)$ se adoptan modelos teóricos de semi-variogramas con abatimientos lineales, exponenciales o gaussianos en función del retraso h .

Otra interpretación para el semivariograma

En la expresión que representa el semivariograma (ec.1), $z(x_i)$ y $z(x_i+h)$ simbolizan valores de la variable z en dos puntos separados por una distancia h . Reagrupando los términos de la expresión se tiene que:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

La sumatoria de diferencias $[z(x_i) - z(x_i+h)]^2$ puede interpretarse como suma de variaciones Δ_i (cuadráticas) del campo paramétrico a una distancia fija en h . Al dividirse por el número n de puntos, se establece una variación cuadrática media del campo, $\epsilon(h)$, para el lag h :

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2(h) = \epsilon(h) \quad (6)$$

Puede pensarse dicha variación como estacionaria en el dominio de la variable z , e incluso, considerar que $z(x_i)$ sea el foco de una tormenta, $P(0)$, y $z(x_i+h)$ el valor de precipitación $P(h)$, a una distancia h del foco. A partir de esta concepción, se puede estimar $P(h)$ a partir del valor focal de la siguiente manera:

$$2\gamma(h) = \epsilon(h) = [P(0) - P(h)]^2 \quad (7)$$

Siendo $P(h)$ entonces estimado como :

$$P(h) = P(0) - \sqrt{2\gamma(h)} \quad (8)$$

APLICACIÓN A DATOS PLUVIOMETRICOS DE LA REGION

Información de partida

Se seleccionaron tormentas de gran magnitud ocurridas en el área de estudio (cuenca del arroyo Saladillo- Figura 1), contando para ello con información pluviométrica publicada por la Dirección General de Comunicaciones de la provincia de Santa Fe (<http://www.santa-fe.gov.ar/gbrm/regpluv>) en los departamentos de Gral. López, Rosario, San Lorenzo, Villa Constitución y Caseros.

Los registros pluviométricos abarcan el período de 2002 a la actualidad. Las estaciones consideradas para el estudio fueron 30: Murphy, Godeken, Chovet, Quirquinchos, Cañada del Ucle, M.Torres, Firmat, Bombal, Villada, Alcorta, Arequito, Chabas, Bigand, Los Molinos, Sanford, Villa Mugueta, Maizales, Casilda, Fuentes, Arminda, Pujato, Cnel Arnold, Acebal, Alvarez, Zavalla, Cnel. Dominguez, Soldini, Alvear, V.G.Galvez y V. Diego.

Procesamiento de los datos pluviométricos

Para cada estación se trazaron los polígonos de Thiessen a los fines de estimar la precipitación media en la cuenca del A° Saladillo (Figura 2). Se estimaron las lluvias medias para el período 2002-2007, extractando solamente aquellas tormentas cuyo **valor medio areal superó los 75 mm**.

La Tabla.1 muestra las estaciones consideradas y sus respectivas coordenadas geodésicas y coordenadas planas proyección Gauss-Krüger faja 4-5 campo Inchauspe.

Se seleccionaron 11 tormentas de cinco (5) días de duración que cumplieron con el requisito que su lámina media areal superó los 75 mm, las mismas fueron:

- 1 - 15/03/2002, 16/03/2002, 17/03/2002, 18/03/2002, 19/03/2002,
- 2 - 08/04/2002, 09/04/2002, 10/04/2002, 11/04/2002, 12/04/2002,
- 3 - 12/10/2002, 13/10/2002, 14/10/2002, 15/10/2002, 16/10/2002,
- 4 - 19/12/2002, 20/12/2002, 21/12/2002, 22/12/2002, 23/12/2002,
- 5 - 12/04/2004, 13/04/2004, 14/04/2004, 15/04/2004, 16/04/2004,
- 6 - 16/12/2004, 17/12/2004, 18/12/2004, 19/12/2004, 20/12/2004,
- 7 - 21/10/2005, 22/10/2005, 23/10/2005, 24/10/2005, 25/10/2005,
- 8 - 12/01/2006, 13/01/2006, 14/01/2006, 15/01/2006, 16/01/2006,
- 9 - 16/12/2006, 17/12/2006, 18/12/2006, 19/12/2006, 20/12/2006,
- 10- 26/02/2007, 27/02/2007, 28/02/2007, 01/03/2007, 02/03/2007,
- 11- 27/03/2007, 28/03/2007, 29/03/2007, 30/03/2007, 31/03/2007,

Para cada una de las tormentas se estimó la precipitación media diaria aplicando la metodología de Thiessen, el valor acumulado hasta los 5 días, promedio simple de precipitaciones, desvío estandar y coeficiente de variación, valores extremos de precipitación en el área y rango de

precipitación, es decir, diferencia entre valor máximo y mínimo. Las tormentas diarias que acumularon en valores medios areales menos de 5 mm se eliminaron.

Cálculo de los semivariogramas

Se calcularon los semivariogramas (ec.1) diarios utilizando el modelo lineal y el exponencial, que fueron los de mejor ajuste. Los parámetros se obtuvieron con el programa VarioWin© (Pannatier, 1996). Este software, diseñado únicamente para la exploración y modelado de semivariogramas, permite realizar el análisis estructural de datos espaciales. Es de dominio público y puede descargarse de la dirección:

<http://www-sst.unil.ch/research/variowin/index.html>.

Para cada día de tormenta se aplicaron los modelos exponencial y lineal, seleccionando el modelo de menor error. En las Figuras 3 y 4 se muestran ejemplos de dos casos típicos de semivariogramas exponencial y lineal.

De este estudio se pudo observar que para tormentas con media areal diaria inferior a los aproximadamente 35 mm, la función representativa de la dependencia espacial de los valores observados corresponde a un modelo exponencial y para tormentas con media areal diaria mayor a 40 mm la función de dependencia que mejor ajusta corresponde a un modelo lineal. Por ende para la tormenta de diseño (superior a 100 mm) el semivariograma representativo será el lineal.

Teniendo en cuenta estas observaciones sería posible realizar un pronóstico de distribución espacial en función de la lámina caída en la estación tomada como foco, aplicando la ec. 8 y conociendo la expresión del semivariograma $\gamma(h) = C_0 + m \cdot h$.

Los parámetros C_0 y m que definen los semivariogramas (SV) se relacionaron con las precipitación máxima (foco de tormenta) del evento obteniéndose una muy buena correlación para la pendiente m y baja para el nugget C_0 (Figura 5). Se consideró que la contribución de C_0 para el cálculo del SV no es tan significativa por dos razones: los valores encontrados en los campos de precipitación analizados y por el hecho de estar atenuado por la raíz de la ec. 8.

Conocidos los valores de $P(h)$, con h tomada desde el foco de tormenta, para distintos puntos se puede reconstruir el campo de precipitaciones mediante métodos de interpolación espacial, en particular el método de kriging. Esto permite pronosticar el comportamiento espacial para la tormenta de diseño, utilizando la metodología de interpolación de kriging y un patrón lineal para el SV, cuya pendiente y ordenada al origen se obtienen a partir de la lámina de lluvia propuesta.

Utilizando esta metodología se construyeron las isohietas que muestran las Figuras 6 y 7, para el día de mayor lámina de las tormentas de 5 días, para 10 y 100 años de recurrencia, respectivamente. Para los 4 días restantes se optó por una distribución espacial uniforme dado que las láminas son de monto bajo.

Tabla 1 Estaciones pluviométricas y sus coordenadas geográficas.

| Localidades | Latitud | Longitud | X | Y |
|------------------------|----------------|-----------------|--------------|--------------|
| Murphy | 33°38'35.13"S | 61°51'36.60"O | 4606395.0181 | 6277614.1958 |
| Godeken | 33°24'3.53"S | 61°50'37.79"O | 4607756.8310 | 6304477.1069 |
| Los Quirquinchos | 33°22'38.19"S | 61°42'44.78"O | 4619968.5183 | 6307168.3911 |
| Chovet | 33°35'55.99"S | 61°36'15.63"O | 4630111.3409 | 6282628.0023 |
| Firmat | 33°27'29.12"S | 61°29'16.84"O | 4640873.0143 | 6298275.3477 |
| Villada | 33°20'56.36"S | 61°26'44.11"O | 4644794.4313 | 6310384.0943 |
| Arequito | 33° 8'40.48"S | 61°28'11.04"O | 4642499.0422 | 6333050.7390 |
| Los Molinos | 33° 7'0.96"S | 61°20'0.12"O | 4655219.7314 | 6336135.1045 |
| Stanford | | | 4660220.1196 | 6333231.2680 |
| Chabas | 33°14'45.74"S | 61°21'33.03"O | 4652825.9717 | 6321814.0497 |
| Bombal | 33°27'29.12"S | 61°19'6.66"O | 4656630.5160 | 6298298.5869 |
| Bingand | 33°22'28.85"S | 61°11'5.99"O | 4669049.2680 | 6307549.7966 |
| Fuentes | 33°10'21.60"S | 61° 4'27.52"O | 4679387.0260 | 6329943.2166 |
| Villa Mugueta | 33°18'44.31"S | 61° 3'22.87"O | 4681033.3259 | 6314452.7036 |
| Casilda | 33° 3'1.47"S | 61°10'22.14"O | 4670209.2849 | 6343513.5847 |
| Pujato | 33° 0'59.19"S | 61° 2'35.12"O | 4682333.3253 | 6347264.2956 |
| Acebal | 33°14'27.78"S | 60°50'4.73"O | 4701710.7266 | 6322295.7620 |
| Alvarez | 33° 7'49.93"S | 60°48'22.00"O | 4704422.2571 | 6334541.8565 |
| Zavalla | 33° 1'22.42"S | 60°52'44.49"O | 4697660.3722 | 6346506.5196 |
| Perez | 33° 1'36.50"S | 60°45'18.10"O | 4709243.4391 | 6346025.0384 |
| Villa Diego | 33° 0'50.81"S | 60°36'35.85"O | 4722805.4190 | 6347359.4737 |
| Alvear | 33° 3'33.97"S | 60°37'3.63"O | 4722054.1216 | 6342337.2328 |
| Coronel dominguez | 33°10'58.34"S | 60°43'14.72" O | 4712358.0509 | 6328700.3177 |
| Rosario | 32°55'1.13"S | 60°46'49.33"O | 4706930.1910 | 6358216.1256 |
| Cañada del Ucle | 33°24'29.16"S | 61°36'28.32"O | 4629711.2004 | 6303787.8347 |
| Chañar Ladeado | 33°19'23.28"S | 62° 2'14.12"O | 4589697.0389 | 6312992.1627 |
| Berabevú | 33°20'23.74"S | 61°51'42.18"O | 4606053.1089 | 6311239.0681 |
| La Carolina | 33° 3'59.78"S | 60°41'59.44"O | 4714375.9248 | 6341585.2850 |
| Piñero | 33° 6'34.06"S | 60°47'43.82"O | 4705422.0642 | 6336875.0077 |
| Los Nogales | 33° 8'30.88"S | 61°36'26.83"O | 4629648.6428 | 6333311.1068 |
| San José de la Esquina | 33° 6'53.73"S | 61°42'18.67"O | 4620516.6878 | 6336268.7379 |
| Arminda | 33°15'50.90"S | 60°57'58.39"O | 4689441.3471 | 6319775.9900 |
| Muñoz | 33°10'20.90"S | 60°53'47.46"O | 4695970.2351 | 6329922.8799 |
| Maizales | | | 4687602.4787 | 6313964.7583 |
| Soldini | 33°1'60.00" S | 60°45'0.03"O | 4709708.9449 | 6345298.8429 |
| Alcorta | 33°32'31.64"S | 61°7'19.77"O | 4674873.9881 | 6288972.9238 |

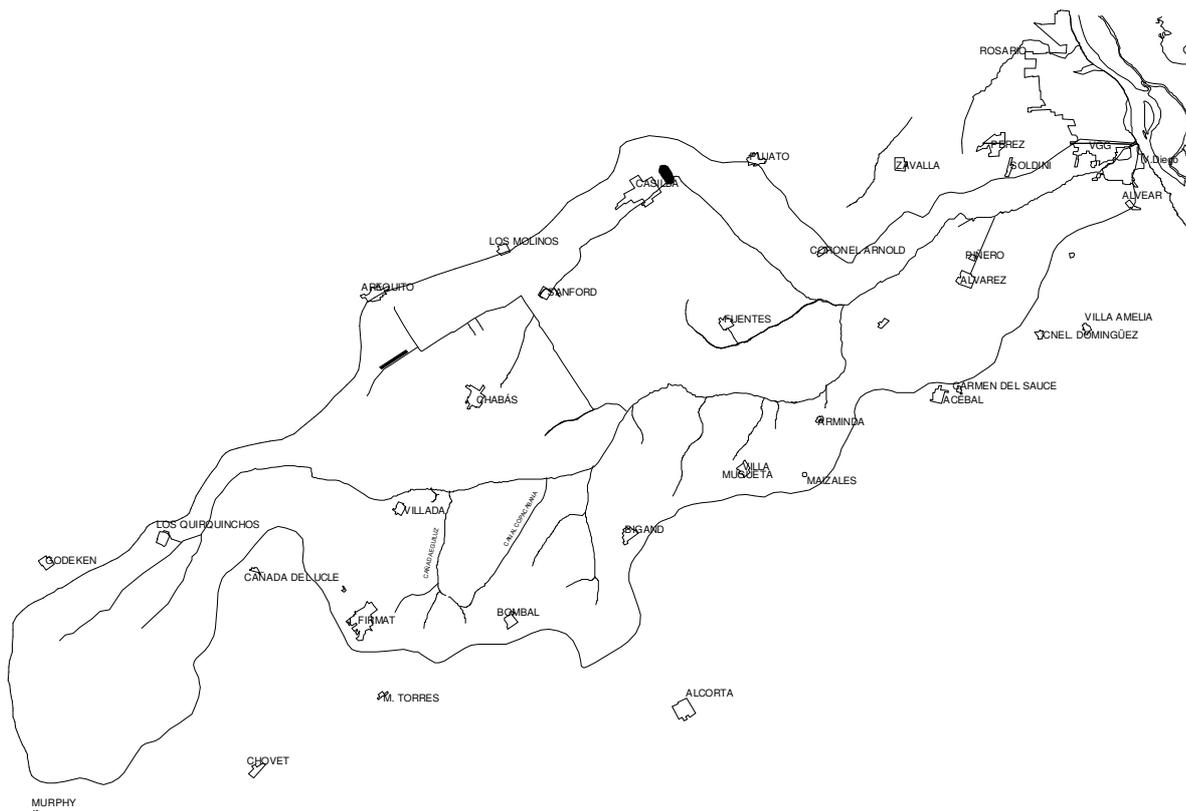


Figura 1. Cuenca del Arroyo Saladillo y estaciones pluviométricas consideradas.

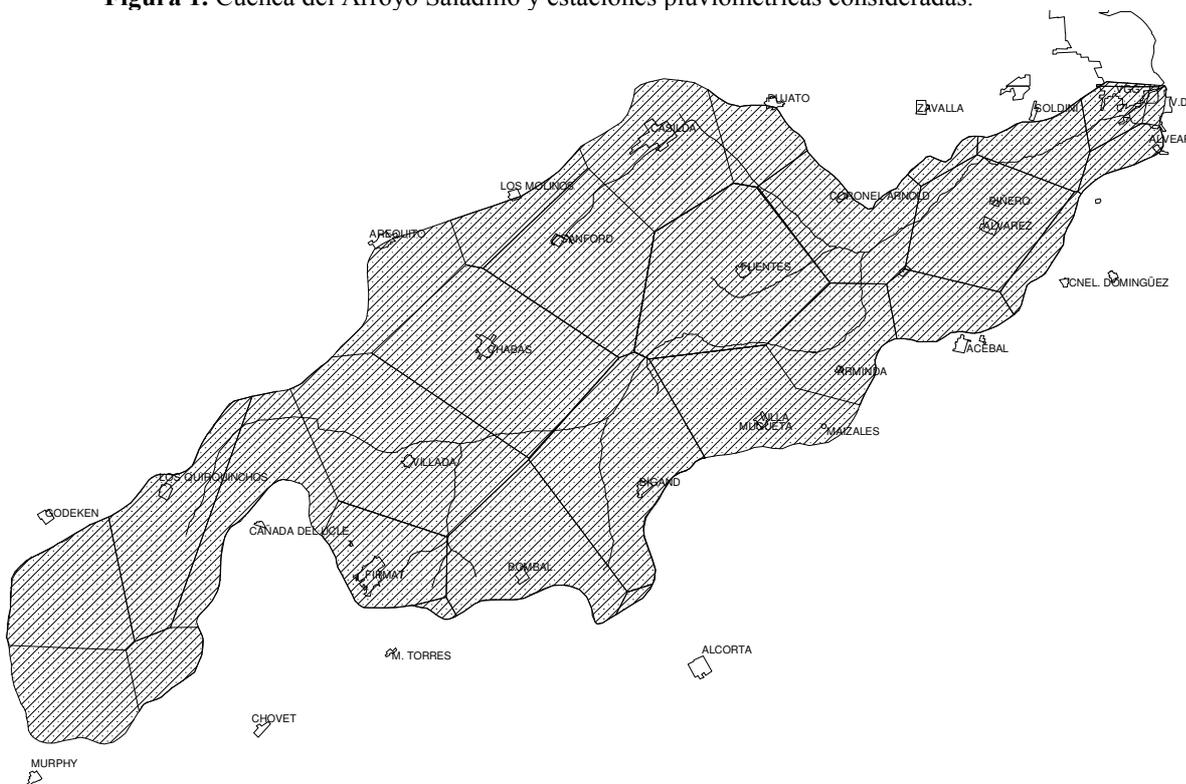


Figura 2. Cuenca del Arroyo Saladillo y polígonos de Thiessen trazados.

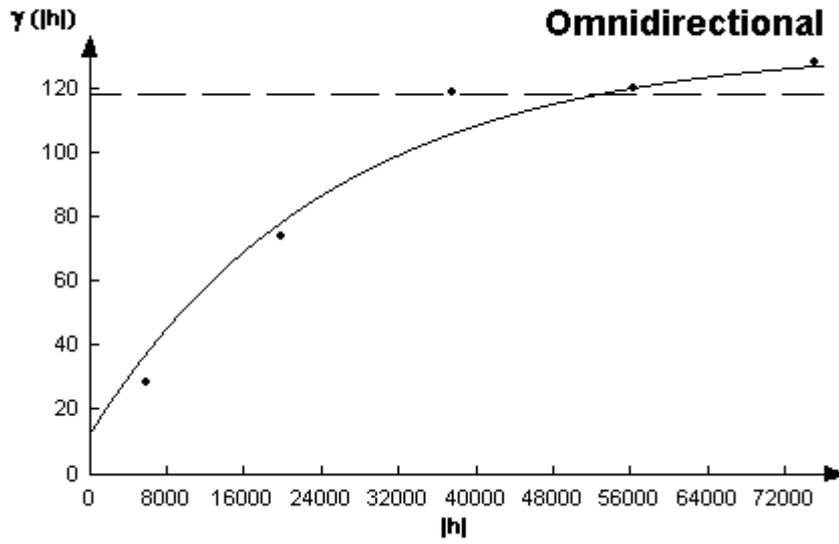


Figura 3. Variograma ajustado para la tormenta 2 (8/04/2002) día 3, Precipitación media areal: 30,2 mm; Modelo exponencial, Rango 75240 m, Umbral 120 mm², C₀= 13.2 mm²

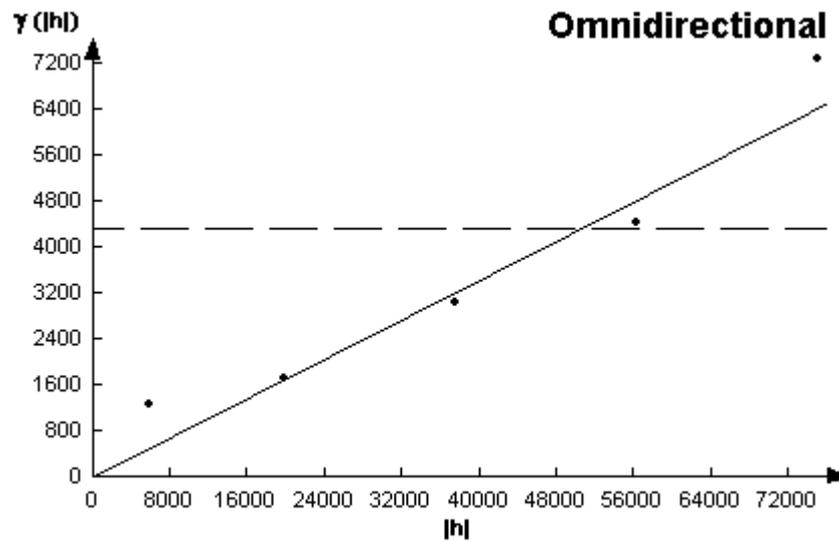


Figura 4. Variograma ajustado para la tormenta 11 (27/03/2007) día 2, Precipitación media areal: 109,5 mm; Modelo lineal, Pendiente = 0.086 mm²/m, C₀= 0 mm²

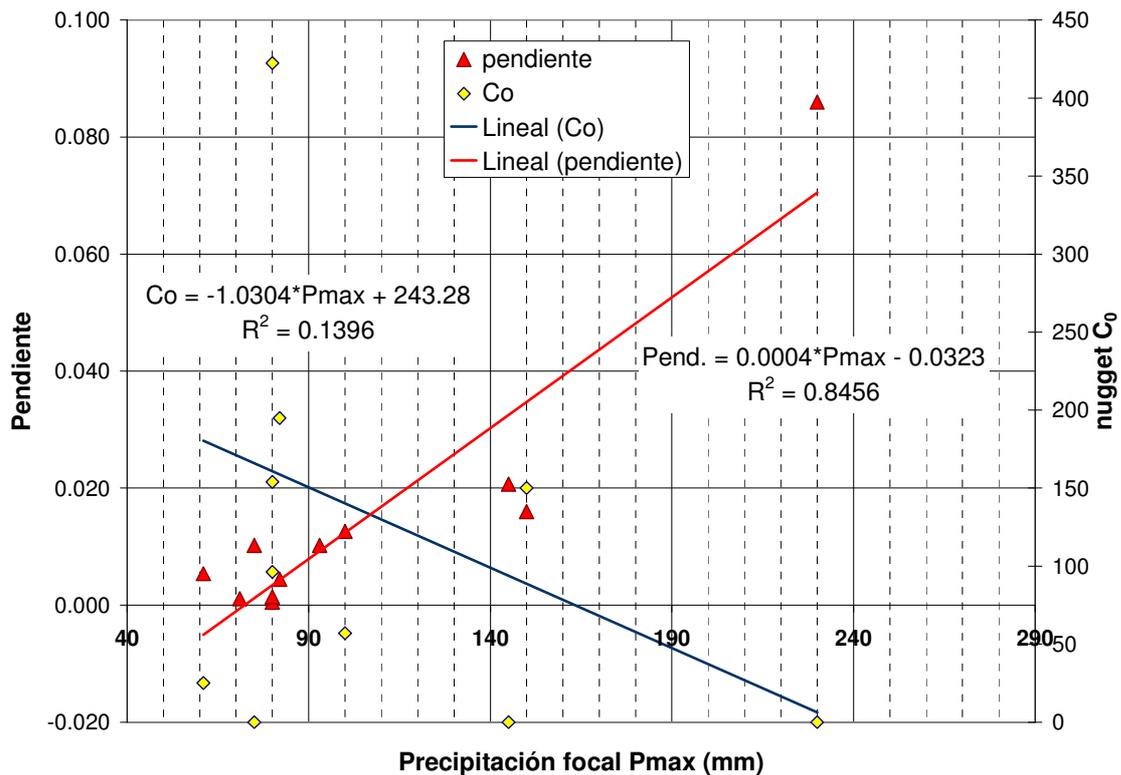


Figura 5. Relaciones entre lámina máxima de diseño y los parámetros del semivariograma lineal representativo.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió la estructura espacial de las tormentas, con el fin de definir un modelo de variación espacial que ajuste al comportamiento estadístico observado en la región.

La metodología empleada consistió en caracterizar el semivariograma típico para las tormentas de mayor monto observadas en la región e interpolar las láminas de precipitación mediante el método de kriging, utilizando el mencionado semivariograma típico. Este último presenta un patrón lineal, cuya pendiente y ordenada al origen se obtienen a partir de la lámina focal de lluvia de diseño.

La presente constituye una metodología que pretende respetar la estructura espacial de la lluvia en un sentido estadístico, considerando patrones generales observados para el campo de lluvia regional.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Pannatier, Y. (1996). *VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer-Verlag. New York.

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).

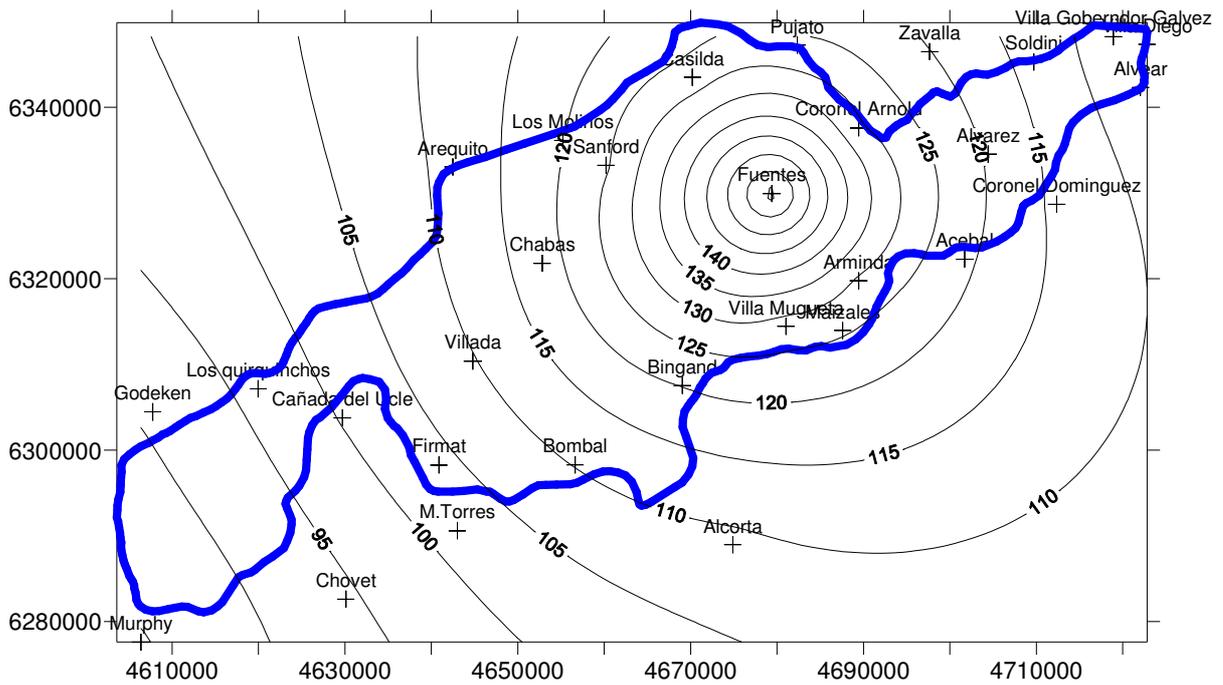


Figura 6. Isohietas trazadas con el método propuesto para el 3er. día de la tormenta de recurrencia 10 años.

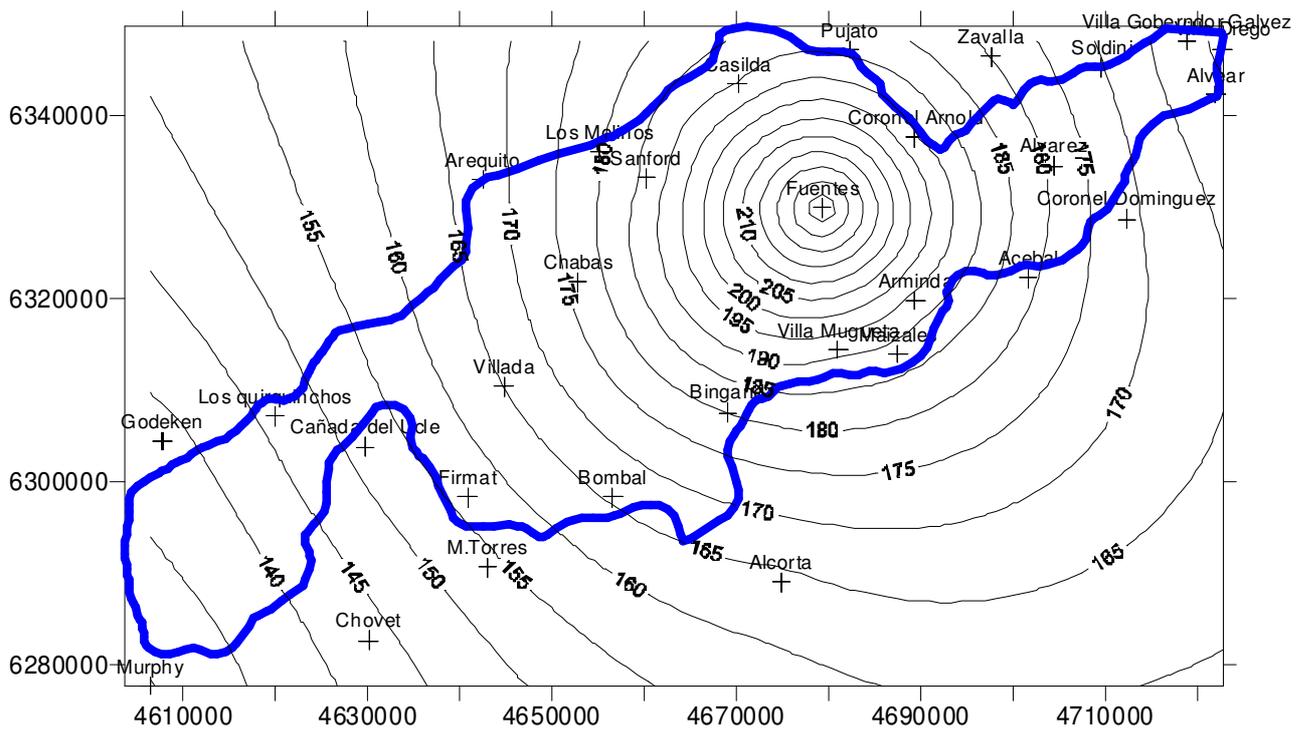


Figura 7. Isohietas trazadas con el método propuesto para el 3er. día de la tormenta de recurrencia 100 años.