

# Utilización de kriging para la elaboración de curvas isohietas de precipitación mensual en la Provincia de Santa Fe, Argentina.

*Agostina Zucarelli<sup>1</sup>, Marta Paris<sup>1</sup> y José Macor<sup>1</sup>.*

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería en Ciencias Hídricas (FICH) – Universidad Nacional del Litoral (UNL).

E-mail: la\_agos\_03@hotmail.com

**RESUMEN:** La escasez de información pluviométrica, la dificultad en su obtención, la ausencia de registros continuos de longitud considerable, y, principalmente, la variación temporal y espacial de las precipitaciones, implican que los estudios hidrológicos y especialmente la aplicación de metodologías de interpolación consideren estas limitantes. Las isohietas son isolíneas que unen puntos de igual precipitación en la unidad de tiempo considerada. El método usual para determinarlas es por interpolación lineal. Sin embargo las características de la distribución espacial de la precipitación, pueden contener tendencias que no ajusten a un modelo lineal. En el presente trabajo se analiza la estructura de variación espacial de las precipitaciones mensuales de la Provincia de Santa Fe para el año 2006 a partir de su consideración como variable regionalizada. Se utiliza el método geoestadístico de kriging para la elaboración de curvas isohietas. En primer lugar se efectúa un análisis estadístico de la serie de datos en cuanto a consistencia, homogeneidad y rellenamiento y luego, se calculan los variogramas experimentales y se modelan las funciones teóricas para cada mes. En todos los casos se seleccionó el mejor ajuste considerando kriging ordinario y universal. Si bien para la interpolación se seleccionó la alternativa omnidireccional, se evaluó su representatividad según cuatro cuadrantes de búsqueda. Los mapas elaborados muestran un trazado de las isohietas basado en el análisis de la correlación espacial de la variable considerada dentro del convexo o dominio que definen los puntos de muestro, con un estimador no sesgado y lineal.

## INTRODUCCIÓN

La escasez de información pluviométrica, la dificultad en su obtención, la ausencia de registros continuos de longitud considerable, y, principalmente, la variación temporal y espacial de las precipitaciones, implican que los estudios hidrológicos y especialmente la aplicación de metodologías de interpolación consideren estas limitantes.

Las incertidumbres asociadas a la variación espacial de la precipitación, constituyen unas de las principales fuentes de error en los análisis. Para obtener la distribución espacial de la precipitación se acostumbra a interpolar valores medidos en las estaciones situadas dentro o en las cercanías de la cuenca con los procedimientos comúnmente usados como Thiessen o Isohietas que son métodos determinísticos (Ferreira et al., 2013).

Las isohietas son isolíneas que unen puntos de igual precipitación en la unidad de tiempo considerada. El método usual para determinarlas es por interpolación lineal. Sin embargo las características de la distribución espacial de la precipitación, pueden contener tendencias que no se ajusten a un modelo de lineal. Las ventajas de utilizar el método de curvas isohietas es que permite estimar la variación paulatina de la

precipitación en el espacio, aun en zonas montañosas, facilita el trazado del mapa de evapotranspiración real apoyándose en el mapa de isotermas y permite evaluar la precipitación caída en una cuenca y compararla con la esorrentía registrada.

El kriging es una técnica de interpolación que se basa en el análisis de la estructura geoestadística de variación de la variable. Es decir se apoya en el conocimiento del comportamiento de la variable en el espacio. Así, la forma del semivariograma obtenido, indica la capacidad de predicción que tiene cada punto en función de la distancia que lo separa con otro punto. Los datos más allá del alcance, es decir cuando el semivariograma se vuelve plano, tienen la mínima capacidad predictora y por ende no intervienen en la interpolación. Para la aplicación del kriging se debe suministrar los parámetros del semivariograma, el tipo de interpolación deseada (puntual o por bloques) y la estrategia adecuada para la selección de puntos para la interpolación. Si el número de valores en el espacio es suficiente, la mejor estrategia para evitar problemas de estacionariedad puede ser disminuir el radio de búsqueda, Mientras que la interpolación puntual estima el valor de la variable en un punto del espacio, en la interpolación por bloques se estima el valor de variable con la media de un área predeterminada que rodea a ese punto. El resultado final del kriging es un mapa con los valores interpolados de la variable. Sin embargo, a diferencia de otras técnicas, la geoestadística permite representar en el espacio (en forma de varianza o desviación estándar) el grado de incertidumbre o error de cada interpolación. Por tanto a cada punto del espacio interpolado se le puede asociar una distribución teórica, lo que además permite la posibilidad de realizar simulaciones probabilísticas, representando el resultado del kriging como la probabilidad de que la variable alcance un determinado valor (Fabián et al., 2013).

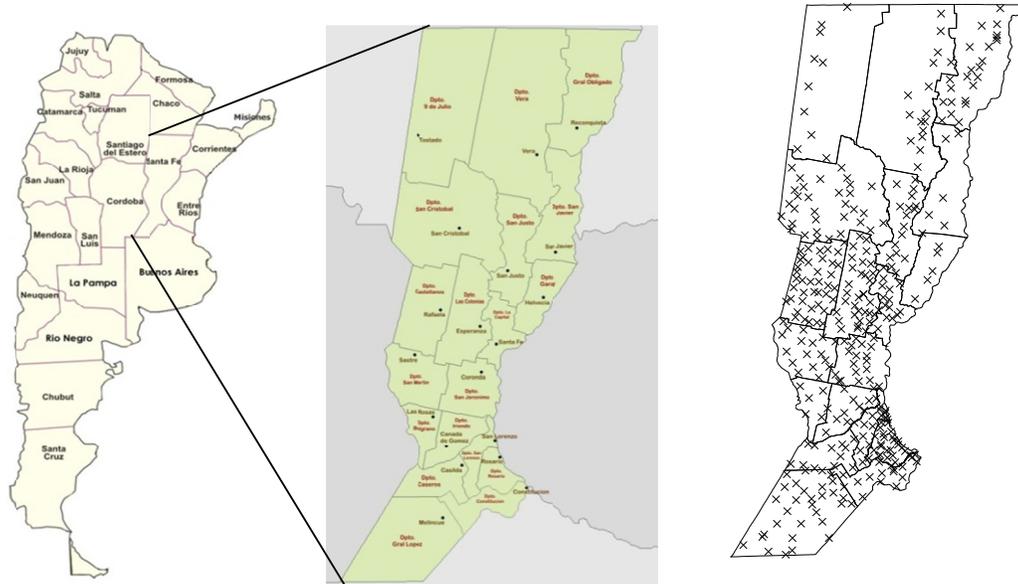
Son numerosos los ejemplos de aplicación de kriging para la obtención de curvas de isovalor: Cortéz et al. (2005), Demey et al. (1996), Íñiguez et al. (2011), Izquierdo et al (2006), Mejía et al. (1999); entre otros. En el caso particular de las curvas isohietas se pueden mencionar los resultados logrados por Pineda et al (2011) y Guerra et al. (2006) y concretamente en Argentina Mezher et al. (2009) y Hämmerly et al. (2012), entre otros.

Con este marco teórico, la hipótesis que se plantea para la investigación es que la estructura de variación espacial de la precipitación mensual en la Provincia de Santa Fe no es necesariamente lineal y debe ser definida como función de interpolación de los datos que permita el trazado de las curvas isohietas, cálculo de promedios regionales, etc. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es utilizar kriging como metodología de interpolación a partir de la consideración de la precipitación como variable aleatoria regionalizada.

## CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Provincia de Santa Fe se ubica en la región Centro-Este de la República Argentina. Limita al Este con las provincias de Entre Ríos y Corrientes, al Norte con Chaco, al Oeste con Santiago del Estero y Córdoba y al

Sur con Buenos Aires (Figura 1). De acuerdo a las estadísticas agroclimáticas de la República Argentina del periodo 1960-2011 elaborada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), se observa que la Provincia de Santa Fe presenta valores de precipitaciones superiores a los 2 mm e inferiores a los 150 mm. A partir del mes de abril se presenta una disminución de los valores que se extiende hasta el mes de septiembre. Los meses con mayores precipitaciones son enero con máximas de 125 mm, febrero con un rango de variación entre 75 a 150 mm y diciembre con valores superiores a 100 mm. Se observa que existe una tendencia de precipitaciones que divide la Provincia en tres regiones: la primera, ubicada al Noreste; la segunda en la zona Litoral de la Provincia y la tercera región, al Sur Este de la misma.



**Figura 1.**–Área de estudio: provincia de Santa Fe y ubicación de las estaciones de registro

## METODOLOGIA

Los datos de precipitación que se emplearon en esta investigación son los publicados por la Dirección General de Comunicaciones de la Provincia de Santa Fe. Se trata de registros diarios que se encuentran disponibles en el portal oficial de la Dirección General de Comunicaciones de la Provincia (<http://www.santa-fe.gov.ar/gbrn/regpluv/index.htm>). La serie considerada abarca el periodo desde 1987 a 2012 en 426 estaciones distribuidas en departamento de la provincia. Estos datos básicos fueron sistematizados en una plantilla de Excel © para generar tablas con precipitaciones mensuales. Las precipitaciones anuales fueron calculadas para el año calendario. Las estaciones pluviométricas se referenciaron espacialmente con el sistema Gauss-Krüger.

En este trabajo se muestra la aplicación de las metodologías geoestadísticas para los datos de precipitación mensual correspondientes al año 2006. En este año 2006 se cuenta con una buena cantidad de estaciones (395) con registros completos en los 12 meses.

A efectos de contar con una caracterización de la serie, se calcularon los estadísticos, se evaluó su ajuste a la ley normal, se graficaron histogramas de frecuencias y box-plot.

Los datos faltantes (mayo 2006 en todas las estaciones del departamento San Martín) fueron rellenados con los valores de precipitaciones correspondientes a estaciones de las localidades más próximas de los departamentos provinciales vecinos.

Para modelar las funciones teóricas que permitan obtener por interpolación las curvas isohietas de las precipitaciones mensuales, se realizó el análisis de la estructura de variación espacial de cada una de las series calculando el variograma experimental. Se evaluó la existencia de anisotropías, se seleccionaron tipo y partes de cada variograma ajustado (meseta, alcance y efecto pepita) considerando la ausencia o presencia de tendencias regionales. La interpolación se realizó por kriging adoptando como radio de búsqueda 2/3 del alcance de cada modelo. Para este análisis se utilizó el programa Surfer versión 8.05 (Golden Software, Inc).

## RESULTADOS

La Tabla 1 presenta los estadísticos de las precipitaciones mensuales. Los valores máximos se encuentran en diciembre y enero. Las precipitaciones mínimas se registran en los meses de abril y mayo. La mayoría de las series presentan un cierto grado de asimetría, en mayor medida hacia la derecha.

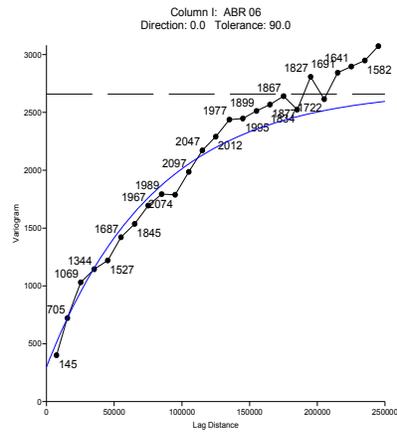
**Tabla 1:** Estadísticos de la precipitación mensual [mm] para la serie de datos del año 2006

	<b>enero</b>	<b>febrero</b>	<b>marzo</b>	<b>abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>junio</b>
<b>Mínimo</b>	0	0	5	0	0	0
<b>Máximo</b>	286	224	353	277	77	275
<b>Media</b>	83.28	87.27	149.51	108.30	2.90	72.86
<b>Varianza</b>	1978.15	1923.66	4526.38	2682.41	68.87	2224.87
<b>Desvío estándar</b>	44.48	43.86	67.28	51.79	8.30	47.17
<b>Mediana</b>	78.00	84.00	137.00	103.00	0.00	66.00
	<b>julio</b>	<b>agosto</b>	<b>septiembre</b>	<b>octubre</b>	<b>Noviembre</b>	<b>diciembre</b>
<b>Mínimo</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Máximo</b>	40	30	79	277	284	563
<b>Media</b>	4.69	4.32	6.65	109.17	116.19	223.91
<b>Varianza</b>	51.00	34.90	86.29	2804.13	2085.05	12999.86
<b>Desvío estándar</b>	7.14	5.91	9.29	52.95	45.66	114.02
<b>Mediana</b>	1.00	2.00	4.00	111.00	114.00	188.00

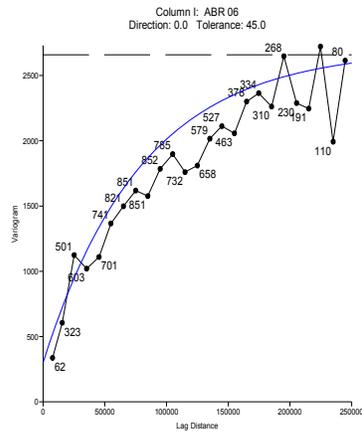
La Figura 3 presenta a modo de ejemplo, el variograma omnidireccional logrado para el mes de abril y, la Figura 4 los variogramas direccionales para las cuatro direcciones preferenciales consideradas (E-O; N-S; NE-SE; NO-SE) que permiten analizar la presencia de anisotropías, en el mismo mes. Se destaca que en meses del año considerado la cantidad de pares de puntos con los cuales se realiza el cálculo del variograma experimental indica una buena estimación de esta función estadística.

De manera similar, la Figura 5 muestra el variograma omnidireccional por kriging universal para el mes de abril y la Figuras 6, el análisis en las distintas direcciones.

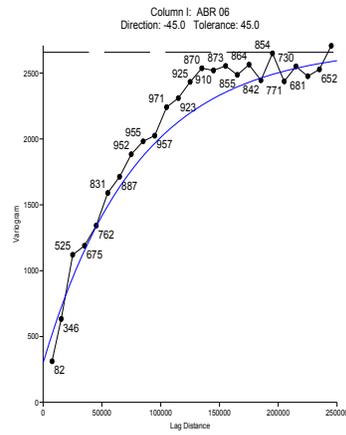
En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para el resto de los meses. El mejor ajuste se logró con un variograma de tipo exponencial (en todos los meses), corroborada por validación cruzada.



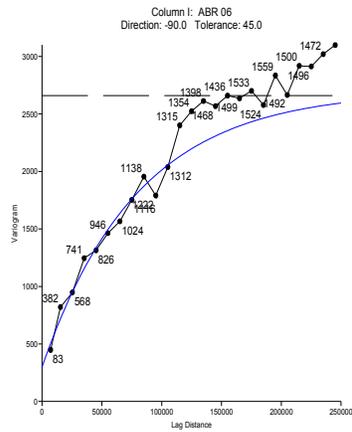
**Figura 3.-**Variograma omnidireccional para el mes de abril de 2006



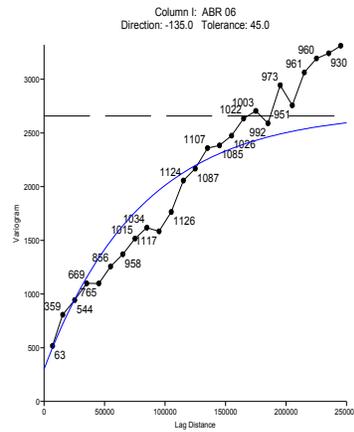
**Figura 4-A.-** Dirección O-E



**Figura 4-B.-** Dirección NO-SE



**Figura 4-C.-** Dirección N-S



**Figura 4-D.-** Dirección SO-NE

**Figura 4.-** Variogramas direccionales para el mes de abril de 2006

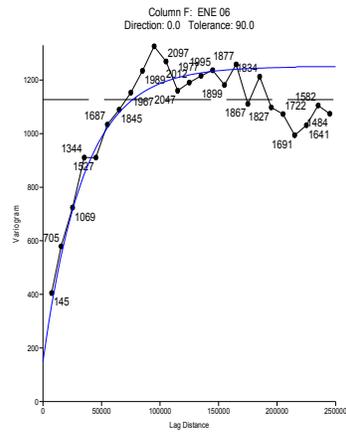


Figura 5.-Variograma omnidireccional con filtrado de tendencia para el mes de abril de 2006

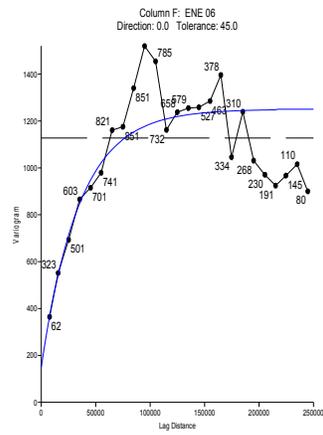


Figura 6-A.-Dirección O-E

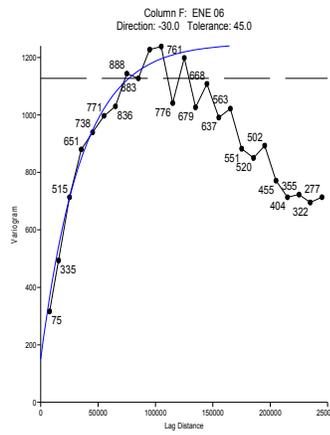


Figura 6-B.-Dirección NO-SE

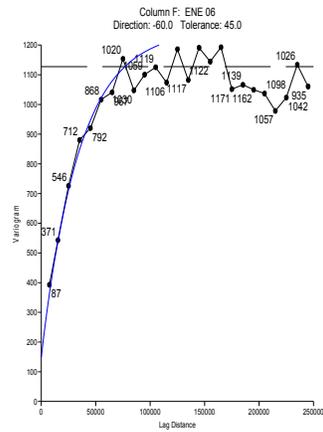


Figura 6- C.-Dirección N-S

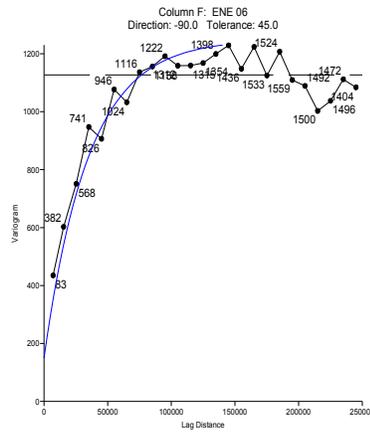


Figura 6-D.-Dirección SO-NE

Figura 6.- Variogramas direccionales con filtrado de tendencia para el mes de abril de 2006

**Tabla 2:** Resultados obtenidos de los variogramas por kriging ordinario y universal

Variogramas - kriging ordinario												
Datos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Efecto pepita	150	500	800	300	10	600	7	5	15	200	450	1700
Meseta	1650	1250	3700	2400	55	1600	40	28	53	2600	1450	10000
Alcance	65000	40000	65000	80000	30000	80000	30000	50000	70000	90000	50000	85000
Variogramas - kriging universal												
Datos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Efecto pepita	150	500	1100	200	10	600	5	5	20	200	300	2000
Meseta	1100	1400	3900	2450	75	1350	37	35	35	1900	1700	20000
Alcance	35000	45000	90000	65000	45000	95000	2000	85000	50000	90000	50000	160000

Teniendo en cuenta la densidad de información disponible y a los fines de contar con una cantidad adecuada de observaciones para la interpolación, el kriging se realizó con los variogramas omnidireccionales y sin filtrar la tendencia, ajustando en este caso el valor del radio de búsqueda a 2/3 del alcance del modelo, tal como se indicó anteriormente. No obstante el análisis de las tendencias regionales ha permitido detectar que las mayores variaciones de los registros de lluvia se producen en las direcciones SO-NE y N-S, siendo incluso más notoria en los meses de noviembre y diciembre.

Dada la extensión de este artículo se presentan solamente y a modo de ejemplo, el mapa de curvas isohietas correspondiente a los meses de mes de abril, junio, octubre y diciembre del año 2006 (Figura 7). Para cada mapa de isohietas se ha graficado un mapa de varianza del error de estimación, que muestra las áreas donde la interpolación realizada presenta mayores incertidumbres (Figura 8).

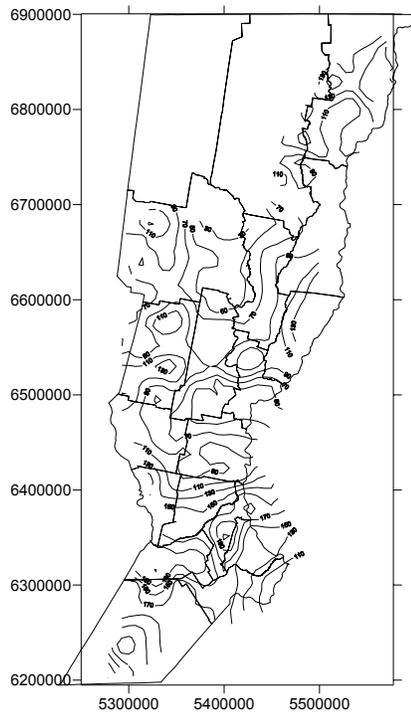
Se ha logrado así un trazado de las isohietas basado en el análisis de la correlación espacial de la variable – explicada funcionalmente por el variograma- considerada dentro del convexo que definen los puntos de muestreo (es decir, sin extrapolación a lugares donde no se cuenta con información), utilizando un estimador lineal no sesgado (kriging).

## CONCLUSIONES

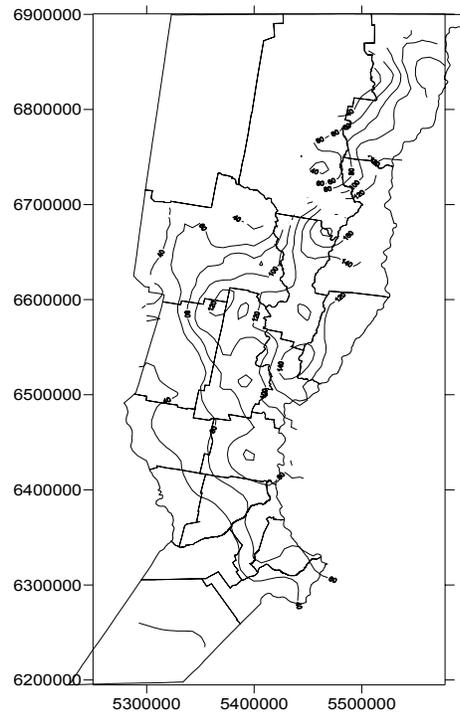
El análisis realizado ha permitido poner en evidencia que la estructura de variación espacial de la precipitación mensual en la Provincia de Santa Fe no es lineal. En todos los meses se han ajustado variogramas cuyos modelos son de tipo exponenciales.

Por otra parte, kriging ha resultado entonces una buena metodología de interpolación para el trazado de las curvas isohietas, pues considera esta función estadística de variación de la variable precipitación que la simple interpolación lineal.

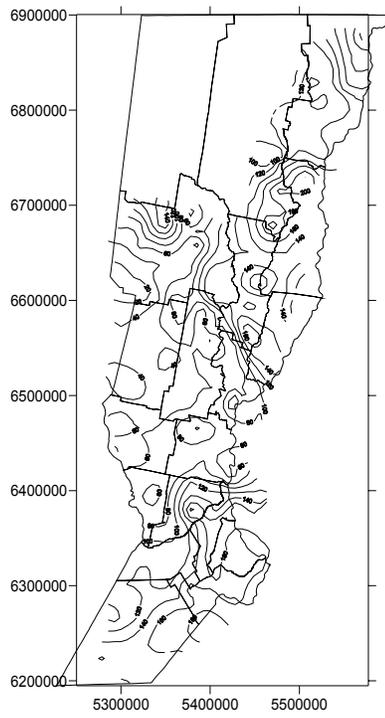
Con ello se ha verificado la hipótesis planteada y se ha cumplido con el objetivo perseguido.



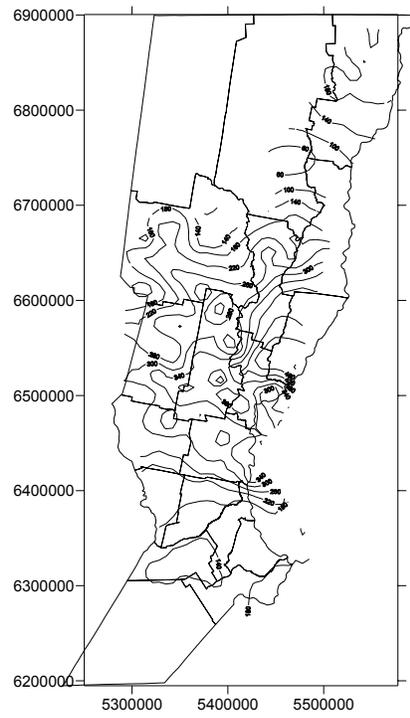
**Figura 7-A.- Mes de abril**



**Figura 7-B.- Mes de junio**

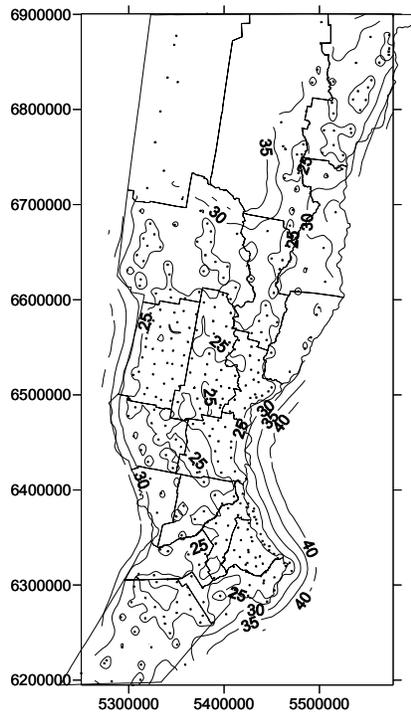


**Figura 7-C.- Mes de octubre**

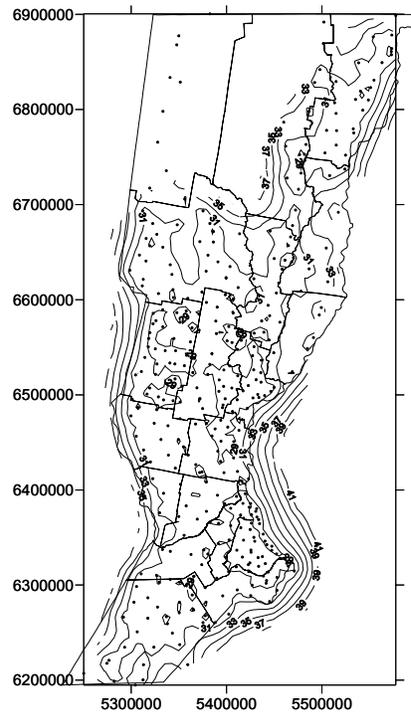


**Figura 7-D.- Mes de diciembre**

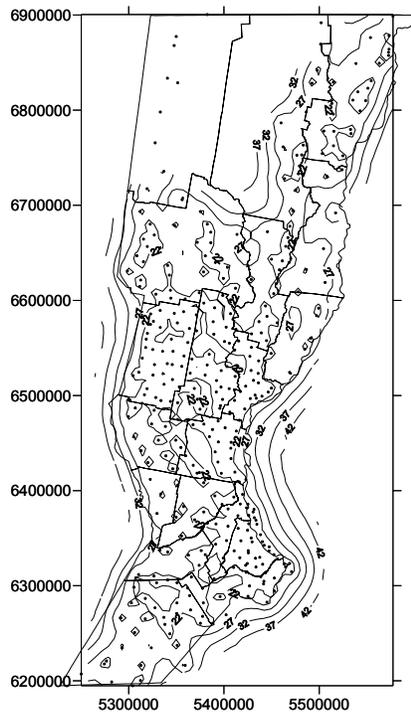
**Figura 7.-Mapas de curvas isohietas**



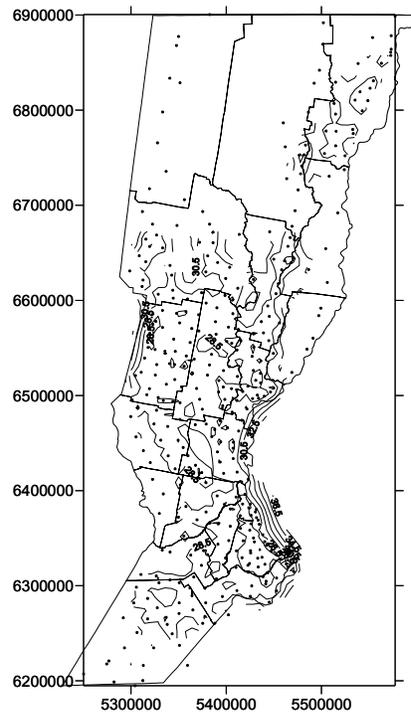
**Figura 8-A.-** Mes de abril



**Figura 8-B.-** Mes de junio



**Figura 8-C.-** Mes de octubre



**Figura 8-D.-** Mes de diciembre

**Figura 8.-** Mapas de la varianza del error de estimación por kriging

Se espera poder completar esta investigación a partir de los resultados logrados, pues los mapas del varianza del error de estimación por kriging permiten identificar las zonas donde debería densificarse la red de medición. Deberá considerarse para ello la instalación de nuevas estaciones de la misma red o la incorporación de registros de otras redes de medición, tal el caso de estaciones en provincias vecinas, para disminuir el error en los bordes del área de estudio.

Además, la caracterización que ofrecen las curvas isohietas contribuirá al análisis de la definición de regiones pluviométricas homogéneas que se está realizando en la provincia de Santa Fe. Se espera así mismo hacer una identificación de las estaciones de registro más confiables que cumplan con los estándares de la Organización Meteorológica Mundial. Todo este conocimiento permitirá argumentar el diseño de una red de mediciones pluviométricas que optimice recursos manteniendo el relevamiento de la variación espacio-temporal de la lluvia en la Provincia de Santa Fe.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cortéz, A., Ovalles, F. A., Rodríguez, M. F., Rey, J. C., & Núñez, M. C. (2005). Análisis geoestadístico de la variabilidad temporal, a una escala anual y mensual, de parámetros climáticos en un campo experimental, estado Aragua, Venezuela. *Agronomía Trop*, 55(3), 327-342.
- Demey, R. J., & Pradere, R. (1996). Generación de isolíneas de precipitación al sur del Estado de Aragua-Venezuela usando Kriging con tendencia externa. *Agronomía Tropical*, 46(3), 313-333.
- Fabián, A; Gonzales, P; Alirio, M; Luna, G & Ospinal, D (2013). Proyecto de grado para obtener el título de Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones. Director: Martínez, D. Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingenierías.
- Ferrerira G; Morresi M; Dileo A & Marcus, R. (2013). Caracterización espacial de la precipitación en una red densa de corta longitud de registro. Santa Fe, Argentina. XXIV° Congreso Nacional del Agua 2013. San Juan, Argentina.
- Guerra, F., Gómez, H., González, J., & Zambrano, Z. (2006). Uso actual de métodos y técnicas para el estudio de la precipitación incluyendo plataformas SIG. *Geoenseñanza*, 11(1), 97-106.
- Hämmerly R., M. Paris & C. Paoli (2012). Análisis de la estructura espacial de una tormenta con métodos geoestadísticos. En: Memorias XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José, Costa Rica. Setiembre de 2012.
- Íñiguez Covarrubias, M., Ojeda Bustamante, W., Díaz Delgado, C., Mamadou Bâ, K., & Mercado Escalante, R. (2011). Análisis metodológico de la distribución espacial de la precipitación y la estimación media diaria. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(1), 57-69.
- Izquierdo, T., & Márquez, A. (2006). Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias). *Geogaceta*, (40), 307-310.
- Mejía, J. F., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J. I., Hoyos, C. D., Mantilla, R., & Botero, B. (1999). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *DYNA Revista de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*, (127), 7-24.
- Mezher, R. N., & Mercuri, P. A. (2009). Análisis geoestadístico de la distribución de eventos de granizo en Argentina. Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. 24. Taller de Trabajo de Estaciones Continuas GNSS de América y del Caribe. 1. 2009 04 14-17, 14 al 17 de abril de 2009. Mendoza. AR.
- Pineda Contreras, N., Arellano Godoy, R., Becerra Sánchez, L., Aular Villegas, M. E., Azuaje Valera, M., Pimentel Mendoza, J., & Jaimes Cárdenas, E. (2011). Caracterización climática de la microcuenca del Río Monaquito, subcuenca del Río Motatán-Carache. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(5), 765-771.