

INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN LA ZONA DE BARLOVENTO Y SOTAVENTO DEL GOLFO DE MÉXICO *

SPACE INTERPOLATION OF THE PLUVIAL PRECIPITATION IN THE WINDWARD AREA AND LEEWARD OF THE GULF OF MEXICO

Gabriel Díaz Padilla¹§, Ignacio Sánchez Cohen², Roberto Quiroz³, Jaime Garatuza Payán⁴, Christopher Watts Thorp⁵ e Isidro Roberto Cruz Medina⁶

¹Campo Experimental Teocelo, INIFAP, km 3.5 carretera Xalapa-Veracruz, Colonia Ánimas, 91190, Xalapa, Veracruz, México. ²Centro Nacional de Investigación Disciplinaria-RASPA, INIFAP, Gómez Palacio, Durango. ³Centro Internacional de la Papa, Apartado Postal 1558, Lima, Perú. ⁴Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, Sonora. ⁵Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora. ⁶Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, Sonora. §Autor para correspondencia: diaz.gabriel@inifap.gob.mx

RESUMEN

La presente investigación se realizó en el laboratorio de agromapas digitales de la región Golfo-Centro del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias en 2007. Se utilizó información de la precipitación pluvial histórica del período 1961 a 2003 del mes de septiembre, registrada en 147 estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional ubicadas dentro de una región que comprende parte del barlovento y sotavento de México. El objetivo fue realizar una comparación de cuatro métodos de interpolación: inverso de la distancia, kriging, co-kriging y thin plate smoothing spline, de datos puntuales de precipitación pluvial en la región de sotavento y barlovento de la República Mexicana. La información fue analizada para detectar si existe en esta región una relación de la precipitación pluvial con las variables de elevación, longitud y distancia al océano. Se observó que la superficie generada con el método thin plate smoothing spline fue superior al registrar el menor cuadrado medio del error de predicción, seguido por el método kriging y co-kriging empleando el modelo gaussiano, cabe señalar, que con co-kriging se utilizó la covariable elevación a pesar de que no se detectó una relación significativa entre esta variable y precipitación pluvial. Se identificó como última opción para la interpolación de datos de precipitación el método de inverso de la distancia con valor optimizado.

Palabras clave: geoestadística, interpolación, kriging, lluvia, spline.

ABSTRACT

This study was conducted in the digital agro-maps laboratory of the Central Gulf region of the National Research Institute for Forestry, Agriculture and Livestock in 2007. The objective was to compare four rain interpolation methods using the historic precipitation data of September from the period 1961 to 2003 of 147 climatic stations belonging to the National Weather Service. These stations cover a region of the windward and leeward direction in Mexico. In order to define a suitable method, four interpolation methods were compared: inverse of the distance, kriging, co-kriging and thin plate smoothing spline. Data was analyzed to define if there is relationship of rainfall with altitude, longitude and distance from the ocean. The method of Thin Plate Smoothing Spline was superior since it gave the lowest mean square error followed by the method of kriging and co-kriging using gaussian method. It is important to mention that with the co-kriging method, altitude was used as a covariate despite that there was not a strong correlation of this

* Recibido: Febrero de 2006
Aceptado: Enero de 2008

variable with precipitation. The last option for rainfall data interpolation was the inverse of the distance with optimized values.

Key words: geostatistics, interpolation, kriging, rainfall, spline.

INTRODUCCIÓN

En el contexto de la modelación de procesos hidrológicos, la incertidumbre climática juega un papel preponderante. De aquí que la aproximación estocástica ofrezca su máxima bondad al cuantificar la variabilidad climática e incorporarla a procesos de predicción de eventos. Como mencionan Hartkamp *et al.* (1999) y Hong *et al.* (2005), entender la variación de las condiciones climáticas es fundamental para realizar investigaciones agrícolas y naturales.

Por otro lado los modelos de interacción cultivo-clima tienen un gran potencial para estimar la respuesta de los cultivos a variaciones climáticas, aunque requieren de información detallada del suelo, cultivo y clima (Conde *et al.*, 1999). La interacción entre estos factores ayuda a determinar el potencial productivo de especies vegetales y adaptación de las especies de interés en función de sus requerimientos agroclimáticos. En este contexto, el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrece plena capacidad para esta representación haciendo uso de algoritmos que explotan los atributos y recursos de los sistemas digitales. En la actualidad los SIG cuentan con herramientas que permiten combinar el análisis estadístico e interpolación espacial para crear superficies continuas de variables climáticas. La interpolación de datos climáticos ha sido estudiada ampliamente en el mundo, se han utilizado distintas técnicas para determinar superficies continuas de variables climáticas como temperatura y precipitación (Dressler *et al.*, 2000).

En México, a pesar de la importancia que representa la información para la toma de decisiones, han sido pocos los esfuerzos realizados para la cuantificación de la bondad de los distintos métodos de interpolación de datos climáticos (Díaz *et al.*, 2006). Este proceso es de suma importancia en virtud de que, en un plano, se asigna un valor desconocido a un punto georeferenciado partiendo de valores conocidos cercanos a ese punto en cuestión.

En los estudios de Hartkamp *et al.* (1999), Treviño *et al.* (2002), Tellez *et al.* (2003) y Jiménez *et al.* (2004) aplicaron técnicas

de interpolación para la obtención de superficies continuas de distintos temas climáticos. Por otro lado Descroix *et al.* (1997) realizó un estudio en la cuenca alta del río Nazas donde se encontró relación de la precipitación con la altitud (0.85) y distancia al océano (-0.85) indicando que la precipitación se incrementa con la altura y decrece a medida que se aleja del océano explicando 85% la variación de la cantidad de lluvia. En general de estos estudios se puede concluir, que el método de interpolación empleado debe ser seleccionado en función de las características de la variable de interés, continuidad espacial y superficie geográfica sobre la cual se va aplicar.

Esta investigación tuvo como objetivo realizar una comparación de cuatro métodos de interpolación de datos puntuales de precipitación pluvial en la región de sotavento y barlovento de la República Mexicana.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio comprende una porción de la república situada en la zona de barlovento y sotavento entre los 19° 55' 48" y 18° 47' 24" de latitud norte y los 99° 09' 00" y 96° 03' 36" de longitud oeste, presenta influencia marcada del Golfo de México y de las condiciones de presión, atmósfera y temperatura del Océano Atlántico lo que hace a esta una zona característica en cuanto a las condiciones del clima. Este segmento abarca una extensión de 40 323 km² y está conformada por parte de la llanura costera del Golfo de México y el eje neovolcánico (Figura 1). Mederey y Jiménez (2005) mencionan que en zonas como esta, la precipitación es de tipo orográfica ya que se origina por una masa de aire, forzada a ascender por una barrera montañosa lo que ocasiona que la precipitación sea mayor en el barlovento que en el sotavento.

En lo referente a la información meteorológica, se procesó la base de datos de precipitación diaria del período 1961 a 2003 correspondiente al mes de septiembre registrada en 147 estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional de las cuales 50 se ubican en la zona de barlovento y 97 en la zona de sotavento (Figura 1). Se realizó una validación de la información identificando inconsistencias como valores de precipitación mayores a los 500 mm en 24 h y menores a 0. Para este proceso se utilizó el programa r-climdex (Zhang y Yang, 2004). Las inconsistencias fueron eliminadas de la base de datos; posteriormente los vacíos de información fueron estimados con un generador de datos climáticos (Clim Gen, Nelson, 2003).

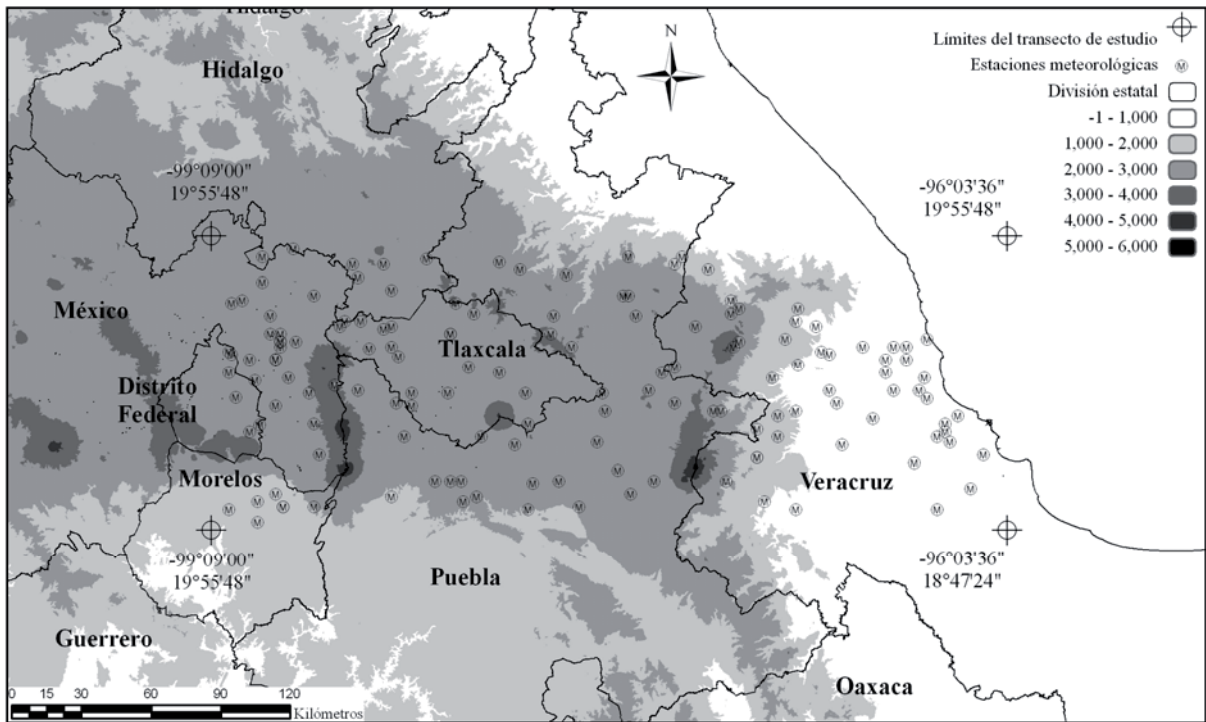


Figura 1. Distribución espacial de 147 estaciones climatológicas en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México.

Uno de los insumos utilizados en este estudio fue el modelo de elevación digital (MED), el cual representa puntos sobre la superficie del terreno cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas X y Y a las que se les agrega un valor de Z el cual corresponde a la elevación (INEGI, 2006). Para este estudio fue considerado extraer el segmento del área de interés para utilizarlo como una variable auxiliar o secundaria en la generación de superficies mediante la interpolación de datos puntuales mediante el método co-kriging y thin plate smoothing spline; la resolución con la que cuenta el MED es de 90 m.

Para realizar el proceso de interpolación fueron utilizados los sistemas de información geográfica (SIG), que se definen como una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada; algunos pueden incluir módulos para realizar la interpolación de datos puntuales. Los SIG utilizados fueron la extensión geostatistical analyst de arcgis 8 (ESRI, 2002) y la versión

4.3 del software ANUSPLIN desarrollado por Hutchinson (2004).

Se entiende como interpolación al proceso de generar una superficie continua en un espacio geográfico con base a una serie de puntos ubicados en diferentes situaciones geográficas de ese mismo espacio (Johnston *et al.*, 2001).

A continuación se realiza una breve descripción de los distintos métodos de interpolación empleados en el desarrollo de esta investigación. El primero que se describe es inverso de la distancia, IDW por sus siglas en inglés y es considerado el método más simple de interpolación; López (1995) refiere a que asigna el peso más grande al punto más cercano y este peso disminuye a medida que aumenta la distancia dependiendo del coeficiente potencia β . El peso de un punto utilizando este método se expresa como:

$$w_i = N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta / \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta \tag{1}$$

donde:

N = número total de estaciones

$d_{e,i}$ = distancia entre el sitio a estimar e y la estación i

β = coeficiente de potencia.

El valor del punto se estima tomando con base en un promedio ponderado de los datos de las mediciones. A cada estación se le asigna un peso en virtud de la localización con respecto a otras y con respecto al punto a estimar. Para una red de N estaciones, la ecuación básica es:

$$p_e = \sum_{i=1}^N w_i p_i \quad 2)$$

donde:

p_e = dato estimado en el sitio e

p_i = dato medido en la estación i

w_i = denota el peso de la estación

i = representa el punto estimado en el sitio e

N = número total de estaciones cercanas al sitio e , que se utilizarán para estimar el dato en el sitio e .

Otro método empleado es el método kriging que se basa en una función continua que explica el comportamiento de una variable en las distintas direcciones de un espacio geográfico y permite asociar la variabilidad de la estimación con base a la distancia que existe entre un par de puntos mediante el uso de un semivariograma o variograma el cual permite percibir el nivel de similitud que existe entre éstos a medida que se encuentran más alejados (Gallardo, 2006). El cálculo de la varianza entre pares de puntos separados por intervalos de distancia se conoce como semivarianza (γ), el cual se representa con:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} N_{(h)} \sum [Z_{(x)} - Z_{(x+h)}]^2 \quad 3)$$

donde:

$\gamma(h)$ y $N_{(h)}$ = semivarianza para todas las muestras localizadas en el espacio y el número total de pares de

muestras separado por el intervalo de distancia, respectivamente, ambos se encuentran separados por una distancia h .

$Z_{(x)}$ = valor de la muestra en una localización x

$Z_{(x+h)}$ = valor de la muestra a la distancia h desde x .

Otra técnica considerada es la de co-kriging la cual es una extensión natural del kriging y permite mejorar la estimación de una variable principal con pocos puntos usando una variable secundaria con mayor cantidad de información y que además esté correlacionada con la principal. De esta forma puede construirse un semivariograma o variograma cruzado el cual representa la varianza de una variable con respecto a la otra y la información que se obtenga de este puede usarse para la predicción de la variable principal.

Por último, el método thin plate smoothing spline (TPSS) se encuentra enfocado hacia aplicaciones climatológicas mediante el cálculo de estimaciones; considera la dependencia espacial de la topografía proporcionando la estimación directa del error de interpolación y el diagnóstico eficaz de errores de los datos (Hutchinson y Gessler 1994). El modelo estadístico para este método considerando dos variables de posición independiente (latitud y longitud) y dependencia lineal de elevación es como se expresa a continuación:

$$q_i = f(x_i, y_i) + \sum_{j=1}^p \beta_j \psi_{ij} + \varepsilon_i \quad 4)$$

donde:

$f(x_i, y_i)$ = función de ajuste desconocida

β_j = conjunto de parámetros desconocidos

x_i, y_i, ψ_j = variables independientes

ε_i = error aleatorio independiente con media cero y varianza $d_i \sigma^2$

d_i = pesos desconocidos.

La función de ajuste f y los parámetros β_j son estimados minimizando:

$$\sum_{i=1}^n \left[\left(q_i - f(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^p \beta_j \psi_{ij} \right) / d_i \right]^2 + \lambda \mathbf{J}_m(f) \quad 5)$$

donde:

$J_m(f)$ = medida de ajuste de f definido en términos de derivadas de f de orden m

λ = número positivo llamado parámetro de ajuste.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis exploratorio de datos de la precipitación pluvial histórica (147 estaciones, período 1961-2003) el mes de septiembre registró un promedio de 281 mm, un mínimo de 56 mm y un máximo de 670 mm. En la Figura 2A se muestra el comportamiento de la distribución de precipitación pluvial cuya distribución es asimétrica positiva; en tanto la Figura 2B muestra la prueba de normalidad de Anderson-Darling cuyo valor fue 5.984 y se comprobó que no existe ajuste a dicha distribución ($p=0.005$).

En lo referente a la elevación, en la Figura 3 las elevaciones varían entre 0 y 5 610 msnm, con 62% de ellas entre 1 871 y 3 116 msnm. La altitud media registrada en la zona seleccionada es de 1 783.92 msnm.

La relación de la precipitación pluvial, elevación, longitud y distancia al océano (Figura 4) se observó que los factores de correlación fueron de -0.39, 0.54 y -0.51 respectivamente, lo cual indica que la cantidad de precipitación se explica en mayor proporción por la posición y distancia al océano.

En la generación de las superficies interpoladas se observó que para el IDW el método que utiliza la potencia 3.58 da un cuadrado medio del error de predicción (65.40) por debajo del que se ocupó con la potencia 2.0 (70.76). En lo referente al método kriging, el modelo Gausiano registró el menor cuadrado medio del error de predicción (57.51); para el método co-kriging utilizando la elevación y longitud como covariables, los modelos óptimos fueron el Gausiano y Exponencial con cuadrado medio del error de 59.02 y 62.47 respectivamente. En el Cuadro 1 se amplía la información sobre los resultados obtenidos.

Las superficies de precipitación pluvial histórica de septiembre mediante la interpolación con el método IDW utilizando el exponente 3.58 (Figura 5A) muestra como en la zona del barlovento existen valores que se encuentran entre los 179 y 652 mm, mientras que sobre el área de sotavento descienden hasta los 80 mm. En la Figura 5B, 5C y 5D se

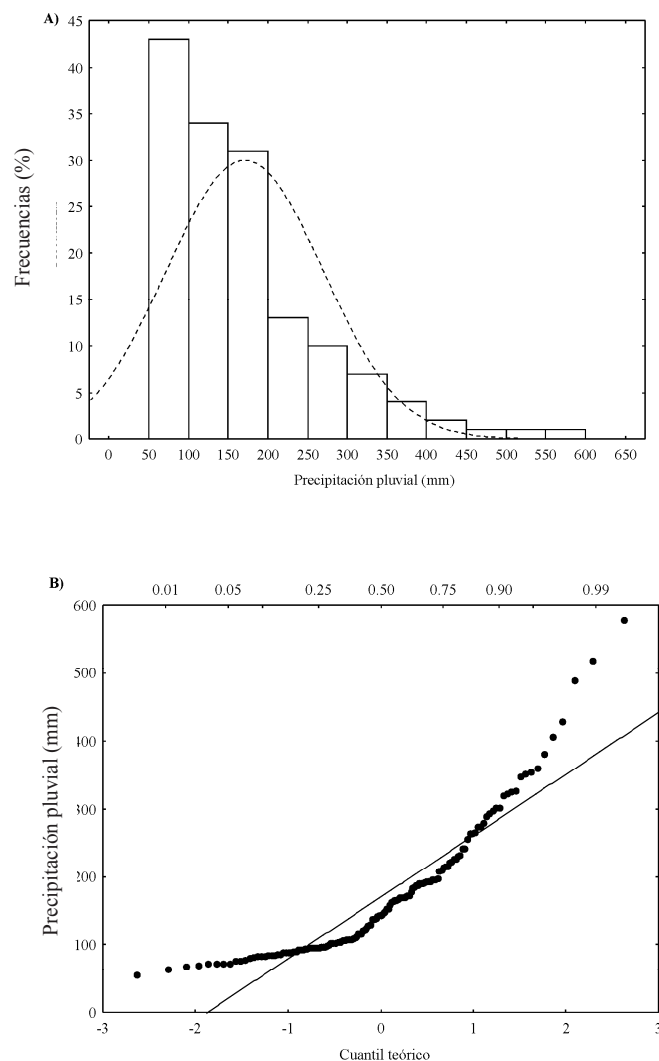


Figura 2. A) distribución de datos y B) gráfico de probabilidad normal correspondiente a la precipitación pluvial histórica de septiembre en el período 1961 - 2003.

muestran las superficies generadas con el método kriging y co-kriging con las covariables elevación y longitud, se observa que existe un comportamiento similar, ya que las precipitaciones oscilan entre los 230 y 490 mm en el área de barlovento, mientras que en el área de sotavento descienden hasta 161 mm. En el caso de la superficie generada con el método TPSS, que se muestra en la Figura 5E, la precipitación en la zona de barlovento registra un máximo de 505 mm y decrecen hasta 144 mm, mientras que en la zona de sotavento la precipitación oscila entre 144 y 82 mm.

En el Cuadro 2 se muestra que los valores de error de predicción del método TPSS que utiliza el modelo spline

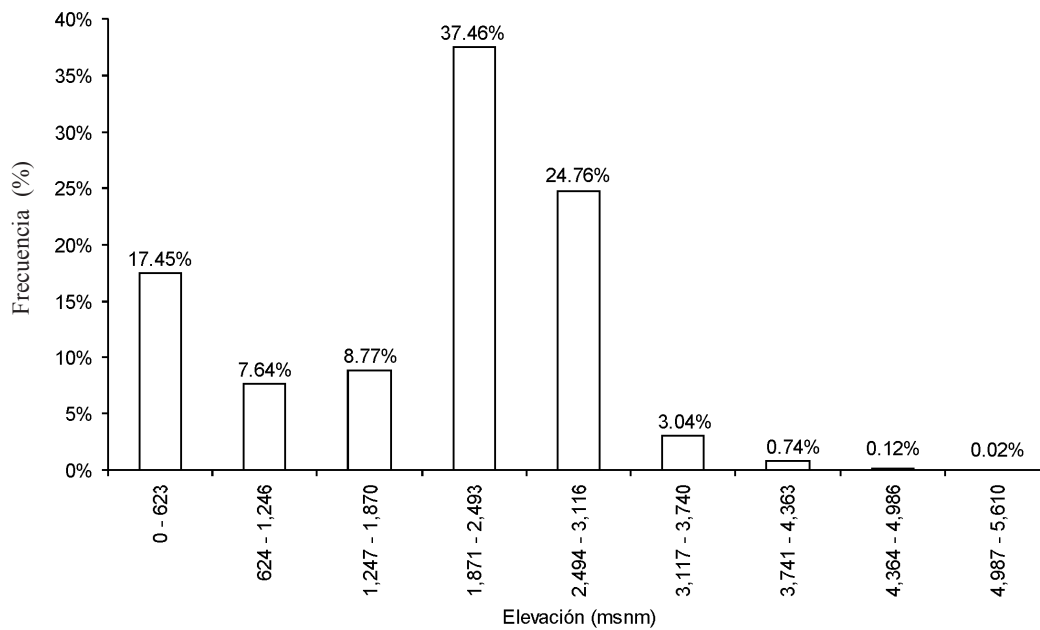


Figura 3. Distribución de frecuencias de la elevación sobre el nivel del mar en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México.

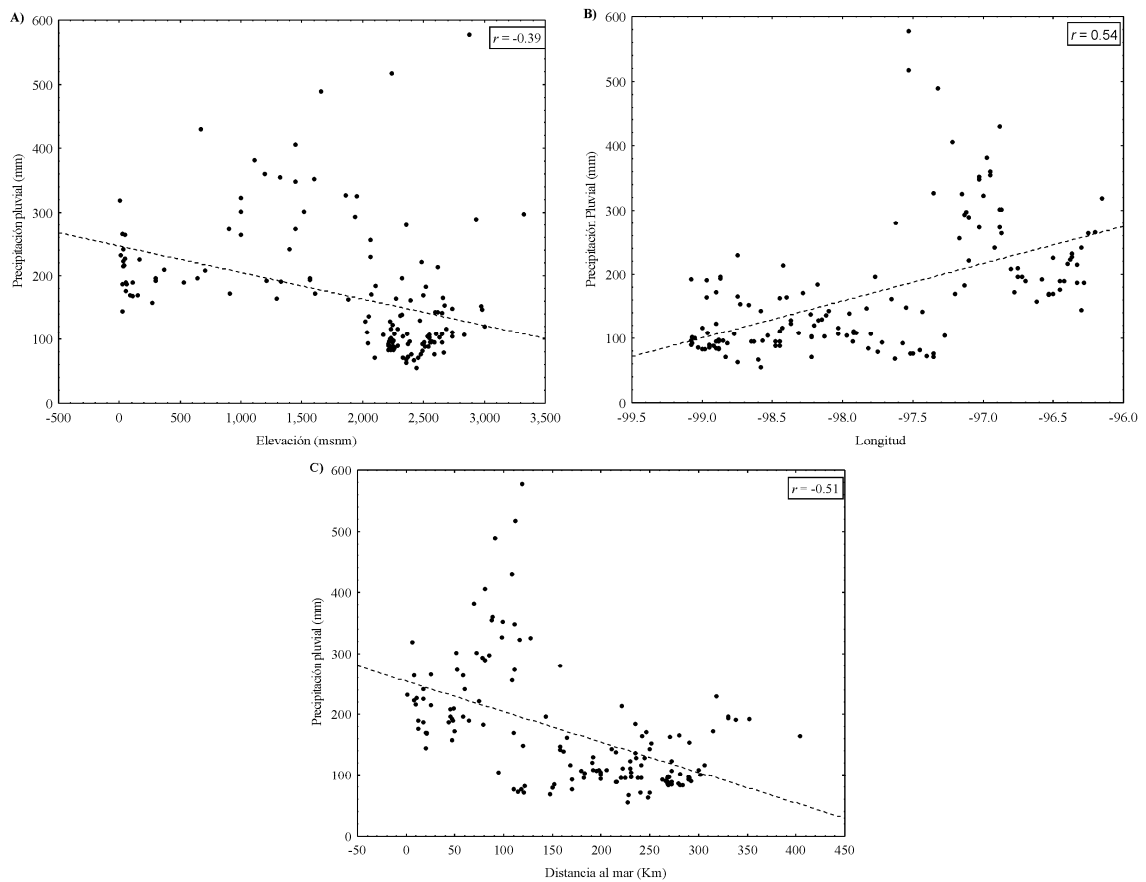


Figura 4. A) relación entre precipitación pluvial y elevación, B) longitud y C) distancia al océano en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México.

Cuadro 1. Parámetros utilizados y cuadrado medio del error obtenido en los diferentes modelos de interpolación y variantes de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México.

Método	Modelos	Software	Potencia	Parámetros			Cuadrado medio del error de predicción	
				Nugget	Sill	Range		
IDW	No aplica	ArcGis	2.00	No aplica	No aplica	No aplica	70.76	
			3.58				65.40	
Kriging	Esférico	ArcGis	No aplica	1 012.5	11 092.0	156 480.0	60.59	
				Exponencial	0.0	12 848.0	206 440.0	67.42
				Gausiano	2 515.2	9 576.3	129 930.0	57.51
Co-kriging: elevación	Esférico	ArcGis	No aplica	1 583.6	11 470.0	189 230.0	60.93	
				Exponencial	786.2	13 982.0	302 410.0	62.46
				Gausiano	2 880.3	9 780.2	144 760.0	59.02
Co-kriging: elevación-longitud	Esférico	ArcGis	No aplica	1 577.0	11 471.0	188 920.0	80.49	
				Exponencial	571.0	13 807.0	279 340.0	62.47
				Gausiano	2 613.5	10 296.0	145 460.0	70.89
TPSS	Spline	ANUSPLIN	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	24.80	

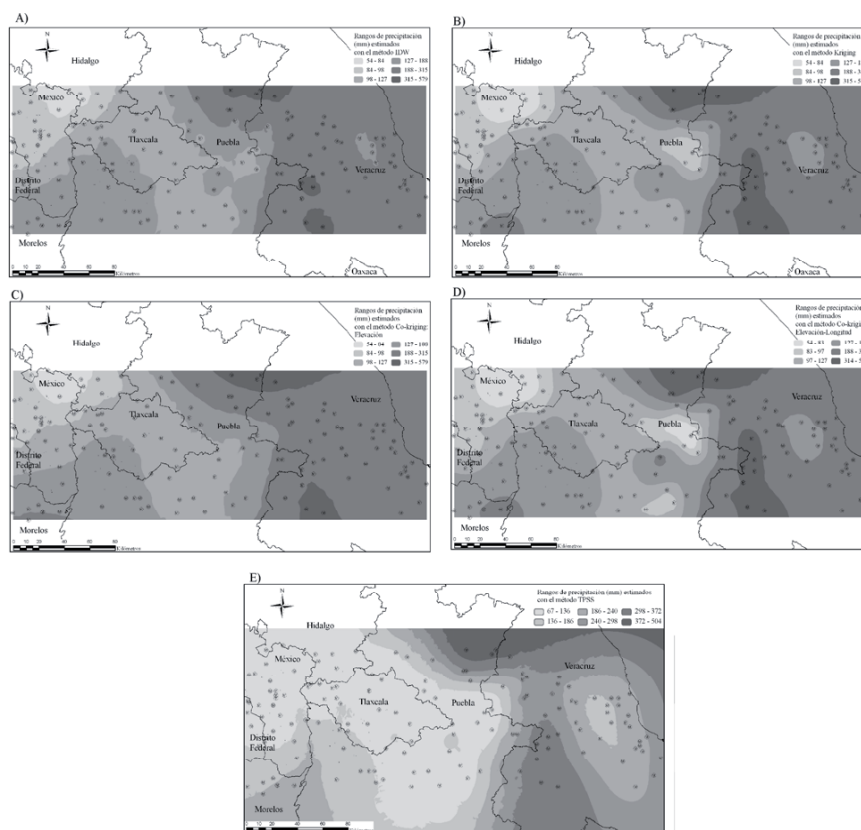


Figura 5. Superficies de precipitación pluvial generadas con distintos métodos y variantes en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México.

Cuadro 2. Estadísticas descriptivas de las superficies interpoladas de precipitación pluvial por distintos métodos en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México.

Método	Modelos	Software	Estadísticas descriptivas de la superficie generada					Rango de la superficie de error de predicción
			Media	Desv. std.	Varianza	Mínimo	Máximo	
IDW	No aplica	ArcGis	303.27	76.44	5 843.07	79.72	652.49	No aplica
Kriging	Gausiano	ArcGis	308.44	69.32	4 805.26	168.41	480.45	83.43 - 146.36
Co-kriging: elevación	Gausiano	ArcGis	308.89	71.42	5 100.82	160.63	490.54	79.87 - 145.97
Co-kriging: elevación-longitud	Exponencial	ArcGis	306.52	64.51	4 161.54	173.21	449.63	90.78 - 145.35
Thin plate smoothing spline	Spline	ANUSPLIN	298.55	79.72	6 355.28	81.75	504.72	18.9 - 29.9
Datos puntuales originales			281.35	111.23	12 372.11	56.20	670.09	No aplica

tuvieron una variación entre 18.9 y 29.9 mm, también se observa que el promedio de la precipitación obtenida en la superficie generada es similar a la registrada en los 147 puntos empleados para desarrollarla.

CONCLUSIONES

Los cuatro métodos utilizados para generar superficies de precipitación realizan una delimitación del comportamiento de la precipitación en las zonas de barlovento y sotavento en la región de estudio.

La ubicación latitudinal y elevación sobre el nivel del mar no son variables que se relacionan con la cantidad de precipitación; no obstante, para el presente estudio resultaron no determinantes cuando se realizan procesos de interpolación con el método co-kriging.

Considerando los cuadrados medios de predicción se puede establecer que el método TPSS, el cual emplea modelos spline y el MED para generar una malla continua de valores de precipitaciones, fue el procedimiento de interpolación más adecuado para eventos de precipitación pluvial ya que crea una superficie de respuesta que corresponde con las características del terreno.

LITERATURA CITADA

Conde, C.; Ferrer, R. M.; Araujo, R.; Gay, C.; Magaña, V.; Pérez, J. L.; Morales, T. y Orozco, S. 1999. El

niño y la agricultura. *In*: Magaña R., V. O. (ed.). Los Impactos de El niño en México. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP. México. p. 103-132.

Descroix, L.; Nouvelot, J. F. y Estrada, J. 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del Norte de México: regionalización de las precipitaciones en la región hidrológica 36. INIFAP. CENID RASPA / ORSTOM. 47 p. (Folleto Científico Núm. 8).

Dressler, K. A.; Fassnacht, S. R.; Bales, R. C.; Davis, R. E.; Lampkin, D. and Myers, D. E. 2000. Geostatistical interpolation of point-measured SWE in the Colorado River Basin. EOS Transactions, American Geophysical Union, Fall Meet. Suppl. 81(48): F 397.

Díaz, P. G.; Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; Cano, G. M. A. y Serrano, A. V. 2006. Estadísticas climáticas básicas del estado de Tabasco (período 1961-2003). INIFAP. CIRGOC. Campo Experimental Cotaxtla. Veracruz, México. 159 p. (Libro Técnico Núm. 12).

Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2002. ArcView Geostatistical Analyst. INC. Redlands, California.

Gallardo, A. 2006. Geoestadística. Ecosistemas (España). Núm. 6:1-11.

Hartkamp, A. D.; De Beurs, K.; Stein, A. and White, J. W. 1999. Interpolation techniques for climate Variables. NRG-GIS, Series 99-01. CIMMYT. México, D. F.

Hong, Y.; Nix, H. A.; Hutchinson, M. F. and Booth, T. H. 2005. Spatial interpolation of monthly mean climate data for China. International Journal of Climatology. 25:1369-1379.

- Hutchinson, M. F. and Gessler, P. E. 1994. Splines - more than just a smooth interpolator. *Geoderma* 62: 45-67.
- Hutchinson, M. F. 2004. Anuspline Version 4.3. Centre for resource and environmental studies, the Australian National University. Canberra, Australia.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Modelos digitales de elevación escala 1:50,000. Nota Técnica Núm. 1. <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/mde/mosaicos/mosaicos.cfm?c=199>. (consultado el 13 de mayo de 2005).
- Jiménez, C. A.; Vargas, T. V.; Salina, C. W. E.; Aguirre, B. M. de J. y Rodríguez, C. D. 2004. Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Investigaciones geográficas, México*. 53:58-74.
- Johnston, K.; Ver Hoef, J. M.; Krivoruchko, K. and Lucas, N. 2001. Using ArcGIS geostatistical analyst. ESRI. New York, United States of America. 300 p.
- López, G. J. V. 1995. Comparación de 4 métodos numéricos utilizados en la interpolación puntual de precipitación pluvial en el estado de Veracruz. Tesis de Maestría. Texcoco, Estado de México. 71 p.
- Maderey, R. L. E. y Jiménez, R. A. 2005. Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. primera. Universidad Nacional Autónoma de México. México. p. 15-20. (serie de textos universitarios, Núm. 1).
- Nelson, R. 2003. ClimGen. Weather Generator. Washinton State University. (consultado 5 de noviembre de 2003): <http://www.bsyse.wsu.edu/climgen/>.
- Tellez, V. O.; Dávila, A. P. D.; Stein, J. L. y Lira, S. R. 2003. Sistema de información climática de la reserva de la biosfera Tehuacan-Cuicatlán, México y sus aplicaciones. *GEOS. México*. 23:221-222.
- Treviño, G. E. J.; Muñoz, R. C. A.; Cavazos, C. C. y Barajas, C. L. 2002. Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. *Ciencia UANL. México*. 5:525-530.
- Zhang, X. and Yang, F. 2004. Rclim Dex 1.0. Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá. (consultado 9 de noviembre de 2004). <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.html>.