

Análisis comparativo de métodos de interpolación espacial utilizando datos de evapotranspiración

Daniel Noe Coaguila Nuñez^{1,2}
Fernando Braz Tangerino Hernandez¹
Yane de Freitas da Silva¹
Diego Gonçalves Feitosa¹

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP
Caixa Postal 34 - 15385-000 - Ilha Solteira - SP, Brasil
{tuheraldo}@gmail.com
{fbthtang}@agr.feis.unesp.br
{yanefsilva}@gmail.com
{diegogfeitosa}@yahoo.com.br

²Instituto Regional de Ciencias Ambientales - UNSA
Casilla Postal 985 - Arequipa, Perú

Abstract. Knowing the values of evapotranspiration us closer to the reality of the water requirements of plants, to have an approximation as close to reality of these values is very important because it would help us to manage more efficiently the water resource. These approaches spatial from values distributed over a surface or over time, are performed by different spatial interpolation methods (tools in ArcGIS, ILWIS). Our objective was to evaluate the performance of three spatial interpolators (kriging, moving average and trend surface) to estimate reference evapotranspiration data of 2011, based on data recorded by Hydraulics and Irrigation Division of 6 weather stations distributed throughout the northwest of the state of São Paulo. These values of evapotranspiration were interpolated using the three spatial interpolation methods. The results indicated that kriging and moving average methods obtained statistically the same values and lower for average (4.21), minimum (3.79) and maximum (4.62), while, trend surface obtained the most favorable results for the average (4.20), minimum (3,53) and maximum (4.87) for the variable estimated of evapotranspiration regard to real values. We conclude that the use of spatial interpolators: trend surface, kriging and moving average obtained the estimated values closest to values real evapotranspiration northwest of São Paulo.

Palabras clave: geoestadística, interpolación, *simple kriging*, *moving average*, *trend surface*, SIG, evapotranspiración.

1. Introducción

La importancia de la evapotranspiración en el mantenimiento del ciclo hidrológico global y continental y en los recursos hídricos globales de agua dulce es raramente cuestionada en hidrología, meteorología, ecología y ciencias del suelo. En la actualidad hay mucha incertidumbre en cuanto a la magnitud y dirección de las tendencias de la evapotranspiración, puesto que el trabajo teórico y los modelos climáticos indican que la evapotranspiración mundial debería ir en aumento en climas cálidos (Katul y Novick, 2009).

La evapotranspiración es un fenómeno complejo y no lineal que depende de varios factores relacionados tales como temperatura, humedad, velocidad del viento, radiación, tipo y etapa de crecimiento del cultivo (Allen et al., 1994). Siendo así que relacionar la evapotranspiración a una superficie estándar específica provee una imagen clara del proceso de evapotranspiración y ayuda a la visualización de procesos biológicos y físicos que intervienen en el balance de energía de la superficie (Allen et al., 1994; Bandyopadhyay et al, 2012). Puesto que la evapotranspiración es la cantidad de agua que se pierde de la superficie por evaporación (suponiendo un suelo saturado) y transpiración, es importante conocer sus valores espacio-temporales, para poder gestionar de una manera adecuada el recurso hídrico.

Es así que la geoestadística de modo general desarrolla y aplica modelos en representaciones de fenómenos naturales cuyas propiedades varían conforme a la posición

espacial de los puntos observados. Actualmente se utilizan diferentes métodos para analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en espacio o tiempo, tales valores no se consideran independientes por el contrario están correlacionados unos con otros (dependencia espacial) (Matheron, 1962; Díaz, 2002).

Se propone comparar algunos métodos de interpolación espacial con la finalidad de favorecer los procedimientos y métodos de selección más adecuados para integrar una aplicación SIG. La interpolación es un procedimiento matemático de ajuste de una función a puntos no muestreados, basándose en valores obtenidos en puntos muestreados. En la práctica los procesos de interpolación parten de la definición de una malla, su separación y sus dimensiones. Esta malla es útil para estimar el valor de cada punto (o nodo) para la selección de los puntos (nodos) con valores conocidos próximos. Los valores de los nodos se restauran por filtrado y funciones (algoritmos) matemáticas que pueden ser similares a los valores base (interpoladores exactos) o aproximar los valores de los puntos de partida. La importancia de los métodos de interpolación junto con sus procesos, para la variable evapotranspiración es necesaria a la hora de estimar valores no muestreados en una determinada región. Diferentes métodos de interpolación espacial han sido utilizados con frecuencia para la estimación de diferentes variables. Aun no existe en la literatura un método que tenga un mejor desempeño frente a los demás. Diferentes métodos ofrecen distintos desempeños, de acuerdo a las características iniciales, es así que se debe determinar el mejor método apropiado para cada situación espacial y/o temporal (Lennon y Tunner, 1995; Caruso y Quarta, 1988; Sun et al., 2009; Cañada et al. 2010; Izquierdo y Marques, 2010; Vargas et al. 2011; Teegavarapu et al. 2012). Por lo expuesto anteriormente, el objetivo del trabajo es analizar y comparar métodos de interpolación espacial, determinando el método que tenga un desempeño adecuado para los valores de evapotranspiración para la región.

2. Material y Métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio seleccionada fue el noroeste del Estado de São Paulo con los medias anuales de evapotranspiración de referencia de la Red Agrometeorológica del Noroeste del Estado de São Paulo operada por el Área de Hidráulica e Irrigação de la UNESP Ilha Solteira (Tabla 1). Se compararon los datos obtenidos entre estaciones y se realizó una media anual. Con esta compilación de datos, se realizaron los diferentes métodos de interpolación de los valores mensuales de evapotranspiración de cada estación, generando valores de evapotranspiración *pixel a pixel*.

Tabla 1. Coordenadas, altitud, denominación y municipios de las estaciones.

Lat.	Long.	Alt.	Estaciones	Municipios
7714042	496470	357	Bonança	Pereira Barreto
7741639	463110	337	Ilha Solteira	Ilha Solteira
7739115	520108	370	Marinópolis	Marinópolis
7785762	545410	436	Paranapuã	Paranapuã
7730039	473995	426	Santa Adélia	Pereira Barreto
7707925	504194	350	Santa Adélia Pioneiros	Pereira Barreto

2.2 Métodos de interpolación

Método *Trend Surface*, es un método analítico, global e inexacto a partir de puntos. Este método se utiliza para separar y describir determinados componentes de variación presentes en los datos, facilitando su interpretación, puesto que cada una de las observaciones puede ser

considerada como resultado de la adición de un componente regional o de tendencia y un componente local (Racca, 1982). Asimismo, considera la autocorrelación de la variable. Ajustándose la variable Z a una ecuación de regresión cuyas variables explicativas son X e Y de los puntos muestrales. Proporciona una descripción sintética de la superficie ondulada que se está tratando y de la variación espacial de la variable temática, facilitando un método para estimar el valor de Z en un punto no muestral cuyas coordenadas X e Y sean conocidas.

Método *Moving average*, es un método directo, local, a partir de puntos, puede ser exacto o no según el factor de ponderación. Se aplica para un gran conjunto de datos. Extrae tendencias intermedias de un número mínimo de puntos definidos dentro de una *Search Ellipse*, asociada a cada uno de los puntos del *grid*. El valor final de cada uno de los puntos del *grid* es igual a la media aritmética de todos los puntos vecinos identificados. Si dentro de la *Search ellipse* no hay un número mínimo de puntos definidos para el cálculo, el área estará en blanco (Moreno, 2007).

Método *Kriging*, es un método analítico, donde la función de interpolación depende de la autocorrelación espacial de la variable, que se representa en variogramas. Utiliza datos tabulares y su posición geográfica para el cálculo de las interpolaciones. Utilizando el principio de la primera ley geográfica de Tobler, que dice que las unidades de análisis más próximas entre si son mas similares que las unidades más lejanas, el *kriging* utiliza funciones matemáticas para añadir más peso en las posiciones más cercanas a los puntos de muestreo y menores pesos en posiciones más distantes, y así crear nuevos puntos interpolados basados en estas combinaciones lineales de datos. Además se está basado en optimizar funciones usando autocorrelación espacial (Ayuga, 2008). En este estudio utilizaremos el *Kriging* simple.

2.3 Variabilidad espacial de los métodos de interpolación

Para evaluar los métodos de interpolación aplicados a la variable evapotranspiración (respetando el muestreo espacial del conjunto y la forma en que se distribuyen en el espacio) se realizó una comparación visual entre los diferentes mapas temáticos, una evaluación de la diferencia de píxel a píxel y el desempeño de los interpoladores analizando comparando los estadísticos, para una mejor comprensión de los resultados finales.

3. Resultados y Discusión

3.1 Variabilidad espacial de los interpoladores

En la Figura 1 se ilustran tres mapas temáticos de evapotranspiración generados mediante los tres métodos de interpolación espacial anteriormente descritos. Concordando con Cañeda et al. (2010) que en su trabajo mostraron que el método *Kriging* eliminó los valores más altos y más bajos, produciendo un suavizado generalizado, asimismo mencionan que el método *Moving average* tiende a crear puntos de concentración o a formar islas en torno a los puntos muestrales.

3.2 Precisión de los interpoladores

Las mayores diferencias entre los valores observados y estimados fueron obtenidos por los métodos *kriging* y *Moving average*, tienen las mayores diferencias y por lo tanto una precisión no muy favorable en la estimación de los valores de evapotranspiración (Tabla 1). En trabajos similares se obtuvieron los mejores rendimientos para el *Kriging*, seguido por *moving average* (Caruso y Quarta, 1998; Sun et al., 2009), por otro lado Vargas et al. (2011) determinaron que *moving average* obtiene menores valores absolutos y que *Kriging* requiere un elevado numero de estaciones y que genera más sobreestimaciones respecto a *Moving average*, pero produce concentraciones bastante fuertes en los puntos de concentración, Teegavarapu et al. (2012) encontraron mejores resultados para *Moving average*, Izquierdo y Marquez (2010) obtuvieron errores más bajos con *Kriging*, por otro lado Villatoro et al.

(2008) obtuvieron un desempeño muy similar para *Moving average* y *Kriging*, aunque *Kriging* fue superior en la predicción de más variables. Caruso y Quarta (1998), en su trabajo reporta que técnicas diferentes ofrecen diferentes desempeños, de acuerdo a las características de los puntos iniciales de datos. El método de interpolación *Trend surface* obtuvo los valores más próximos a los reales (Tabla1). Estos resultados podrían estar relacionados a que este método resulta más apropiado en los casos en que exista con claridad una variación espacial sistemática en la variable, la cual puede ser captada adecuadamente por una superficie relativamente simple (Racca, 1982). Y utilizar este procedimiento nos describe una tendencia global, por lo que produce resultados muy suavizados y, normalmente, poco adecuados (Racca, 1982).

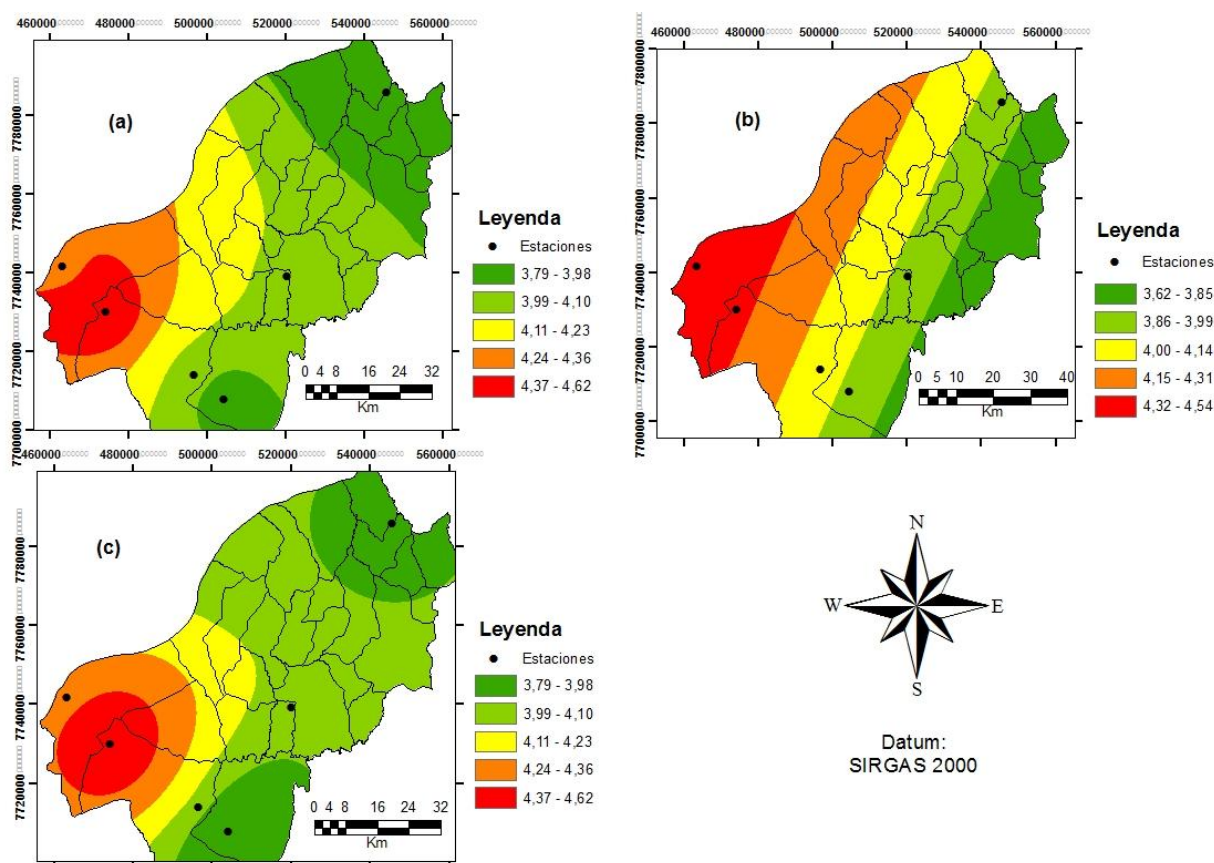


Figura 1. Mapa temático de los tres diferentes interpoladores: (a) *Moving Average*, (b) *Trend Surface*, (c) *Kriging*.

Hay una variedad de métodos para realizar este tipo de interpolaciones, pero la dificultad radica en la elección de la mejor opción que reproduce la superficie actual (Caruso y Quarta, 1998). Cada método tiene sus ventajas y desventajas, que dependen en gran medida de las características del conjunto de puntos de datos. Es así que el *Kriging* elimina los valores más altos y más bajos, de cara a obtener un menor error en la estimación (Cañeda et al., 2010). Este método ofrece una mayor consistencia estadística, un análisis más elaborado, una interpolación menos brusca, con áreas de transición menos abruptas y con menores errores de predicción, pero los valores pronosticados están distantes de la realidad, aunque muy suavizados (Cañeda et al., 2010). El *Moving average* ofrece una menor complejidad en el cálculo, tiende a formar puntos de concentración en torno a los puntos muestrales, este método tiene una tendencia a crear “promontorios” algo abruptos y pronostica valores más cercanos a los observados. El método *kriging* ofrece requiere un elevado número de

estaciones con registros, mientras que el *moving average* no tiene este tipo de restricción (Vargas et al., 2011). En nuestros resultados (Tabla 1 y Figura 1) obtuvimos desempeños semejantes para los interpoladores espaciales *Moving average* y *Kriging*.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de los datos observados y estimados de la Evapotranspiración (mm/día) de los diferentes interpoladores espaciales

Estadísticos	Datos Observados	Datos Estimados		
		<i>Trend Surface</i>	<i>Moving Average</i>	<i>Kriging</i>
Promedio	4,12	4,20	4,21	4,21
Desviación estándar	0,95	0,39	0,24	0,24
Mínimo	2,51	3,53	3,79	3,79
Máximo	6,21	4,87	4,62	4,62

En relación al porcentaje acumulado de pixel, el método *trend surface* obtuvo la menor desviación estándar, en tanto que la interpolación por el método de *kriging* obtuvo el mayor promedio de porcentaje de pixel acumulado (Tabla 2).

Tabla 2. Porcentaje acumulada de pixel de los 3 interpoladores espaciales

Estadísticos	<i>Moving Average</i>	<i>Kriging</i>	<i>Trend Surface</i>
Promedio	67,3	67,7	59,7
Desviación estándar	33,0	37,8	35,9
Mínimo	0,1	0	0
Máximo	100	100	100

4. Conclusiones

Los métodos de interpolación espacial *kriging* y *moving average*, obtuvieron los resultados con poco rendimiento para la estimación de la evapotranspiración. En tanto que, el interpolador espacial *trend surface* obtuvo los valores más próximos a los datos reales.

Para el noroeste del estado de São Paulo y para los datos registrados de evapotranspiración de las 6 estaciones distribuidas en esta área, el método de interpolación espacial *trend surface* fue el que obtuvo los resultados estimados más próximos a los datos reales. En resumen, consideramos que los tres interpoladores espaciales obtuvieron valores estimados muy próximos a los valores reales de evapotranspiración de referencia del noroeste del estado de São Paulo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo por el apoyo financiero para la instalación de la Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista. Además extender el agradecimiento al Programa de Apoyo a Estudiantes extranjeros de Doctorado (PAEDEx) de la UNESP por la Beca de Estudios y oportunidad.

Bibliografía.

Allen, R.G., Smith, M., Perriell, A., Pereira, L.S., 1994. An update for the definition and calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bull.*, v. 43, n. 2, p. 1-34, 1994.

Ayuga T., E. **Estimación e interpolación.** 2008. Disponible en: <http://ocw.upm.es/proyectos-de-ingenieria/sistemas-de-informacion-geografica-tecnicas-cuantitativas-para-gestion-de-datos/contenidos/WEB/TEORIA/08estimacion_e_interpolacion.pdf>. Acceso en: 15.nov.2012.

Bandyopadhyay, A.; Bhadra, A.; Swarnakar, R.K.; Raghuwanshi, N. S.; Singh, R. Estimation of reference evapotranspiration using a user-friendly decision support system: DSS ET. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 154-155, p. 19-29, 2012.

Bustamante, J. Predictive cartography of climatic variables: Comparing interpolation models of temperature in peninsular Spain. **Graellsia**, v. 59, n. 2-3, p. 359-376, 2003.

Cañada T., R.; Vidal D., M.J.; Moreno J., A. Interpolación espacial y visualización cartográfica para el análisis de la justicia ambiental: ensayo metodológico sobre la contaminación por partículas atmosféricas en Madrid. In: Ojeda, J.; Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.). **Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos**. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 2010. p. 691-715.

Caruso, C.; Quarta, F. Interpolation methods comparison. **Computer Math. Applic.** v. 35, n. 12, p. 109-126, 1998.

Díaz V., M. A. 2002. **Geoestadística aplicada**. Instituto de Geofísica. UNAM, 1999. Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/24737935/Geoestadística-Aplicada>>. Acceso en: 15.nov.2012.

Fernández B., B. 1985. Comparación de algunos métodos de interpolación espacial. In: VII Congreso Chileno de Hidráulica, 7, 1985, Concepción. **Anales**. Disponible en: <http://www.sochid.cl/index.php?option=com_content&view=category&id=54&Itemid=78>. Acceso en: 15.nov.2012

Izquierdo, T.; Márquez, A. Comparing interpolation methods for rainfall maps elaboration in the Icod-Cañadas aquifer (Tenerife, Canary Islands). **Geogaceta**. v. 40, p. 307-310, 2006.

Katul, G.; Novick, K. 2009. **Encyclopedia of Inland Waters. Evapotranspiration**. Duke University, Durham, NC, USA, 2009. Pages 661-667.

Lennon, J. J.; Turner, J. R. G. Predicting the spatial distribution of climate: temperature in Great Britain. **Journal of Animal Ecology**. v. 64, n. 3, p. 670-392, 1995.

Matheron, G. 1962. **Traité de géostatistique appliquée. Tome 1**. Paris: Editions Technip, 1962. 334 p.
Moreno J., A. **Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS**. Madrid: Ra-Ma, 2007.

Quevedo, K.; Sánchez, K. Comparison of two interpolation methods to estimate air temperature applying geostatistical techniques. **Revista Peruana geo-atmosférica**. v. 1, p. 90-107, 2009.

Racca, J. M. **Análisis de distribución geográfica utilizando superficies de tendencia, programas para su cálculo**. Notas, Serie A, numero 13. Universidad Nacional del Rosario, Argentina, 1982.

Sun, Y.; Kang, S.; Li, F.; Zhang, L. Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. **Environmental Modelling & Software**. v. 24, p. 1163-1170, 2009.

Teegavarapu, R.S.V.; Meskele, T.; Pathak, C. S. Geo-spatial grid-based transformations of precipitation estimates using spatial interpolation methods. **Computers & Geosciences**. v. 40, p. 28-39, 2012.

Vargar, A.; Santos, A.; Cardenas, E.; Obregón, N. Analysis of distribution and spatial interpolation of rainfall in Bogota, Colombia. **Dyna**. v. 78, n. 167, p. 151-159, 2011

Villatoro, M.; Henríquez, C.; Sancho, F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW Y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE Y P Del Suelo. **Agromonía Costarricense**. v. 32, n. 1, p. 95-105, 2008.