

Estimación de la superficie freática en zonas de ecotono del Parque Nacional de Doñana mediante datos piezométricos, covariables topográficas y métodos geoestadísticos

O. Gutiérrez-Hernández¹, R. Cámara Artigas², J.M. Senciales González³, L.V. García¹

¹ Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología. Departamento de Biogeoquímica, Ecología Vegetal y Microbiana. Av. / Reina Mercedes 10, 41012 Sevilla.

² Universidad de Sevilla. Departamento de Geografía física y Análisis Geográfico Regional. C. / María de Padilla s/n, 41004 Sevilla.

³ Universidad de Málaga. Departamento de Geografía. Campus de Teatinos, 29071 Málaga.

ogutierrez@irnas.csic.es, rcamara@us.es, senciales@uma.es, ventura@cica.es

RESUMEN: Entre las marismas y las arenas estabilizadas se concentran las áreas con mayor biodiversidad del Parque Nacional de Doñana, un ecotono donde el nivel freático se mantiene próximo a superficie y condiciona la existencia de comunidades vegetales propias de ambientes mediterráneos húmedos. La red piezométrica del parque se halla desigualmente distribuida y resulta insuficiente para caracterizar espacialmente la heterogeneidad espacial del nivel freático, especialmente en zonas alejadas de los piezómetros. En esta comunicación, comparamos interpoladores y procedimientos geoestadísticos para estimar la superficie freática mediante la combinación de datos piezométricos y covariables topográficas. Los resultados muestran que las covariables, cuando están correlacionadas con las variables primarias y mejor muestreadas que estas, permiten mejorar el detalle y reducir el error de las predicciones. En estos casos, recomendamos métodos geoestadísticos sobre interpoladores y, específicamente, Co-Kriging sobre Kriging.

Palabras-clave: Doñana; freático; piezómetros; topografía; geoestadística; Co-Kriging.

1. INTRODUCCIÓN

En los ecosistemas mediterráneos, la disponibilidad de agua es uno de los principales factores limitantes de la vegetación y resulta fundamental comprender los procesos que subyacen en la distribución espacial de los recursos hídricos y las interacciones que se producen entre estos y los ecosistemas (Pueyo, 2013). La ecohidrología emerge como un ámbito de estudio que aborda las influencias de los recursos hídricos en los ecosistemas terrestres (Hannah et al., 2004). En el Parque Nacional de Doñana, el agua, en sus diferentes manifestaciones, es un factor de primer orden (Castroviejo, 1993). Las zonas de ecotono cercanas a la marisma y áreas donde el nivel freático se encuentra próximo a superficie constituyen un auténtico refugio para diferentes especies más propias de ambientes mediterráneos húmedos (García Murillo y Sousa Marín, 1999). Así algunos autores sugieren una relación entre los cambios que experimenta el freático y la respuesta de las comunidades vegetales a escala local en algunas zonas del parque (Muñoz Reinoso, 2001). El conocimiento de la distribución espacial del nivel freático puede aportar importantes claves para comprender la problemática de las comunidades vegetales.

Existe una importante red de piezómetros gestionada por Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) que se mantiene para monitorizar las características de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y su entorno. Esta red es complementada con los piezómetros del propio Parque y aquellos instalados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). A través de sus registros es posible conocer las características del nivel freático o la calidad de las aguas subterráneas en un área donde los impactos de las actividades humanas llevan décadas interfiriendo sobre el estado del sistema acuífero y la situación de éste, a su vez, podría estar haber estado condicionando diversos aspectos ecológicos del entorno (Custodio et al., 2009).

En geografía y ciencias ambientales, normalmente se utilizan interpoladores y métodos geoestadísticos para modelar superficies continuas a partir de datos puntuales. La geoestadística, además, utiliza funciones

estadísticas con base espacial para modelar la autocorrelación espacial de los fenómenos localizados en el espacio geográfico a través de las cuales es posible predecir superficies continuas (Isaaks y Srivastava, 1989). La calidad de estas predicciones estará determinada por los datos de partida y la eficacia de los estimadores. A medida que nos alejamos de los puntos muestreados, de acuerdo con la Primera Ley de la Geografía (Tobler, 1970), aumenta el error de las estimaciones. Con frecuencia, se interpolan superficies basándose en puntos irregularmente repartidos en el espacio, por lo que también se hace necesario el conocimiento de la distribución del error asociado a las predicciones. Los estimadores geoestadísticos de la familia del Kriging ofrecen información sobre la calidad de las predicciones y permiten, además, incorporar co-variables mejor muestreadas que las variables primarias para mejorar las estimaciones modelando estructuras de autocorrelación espacial cruzadas.

La red piezométrica que se utiliza para conocer la evolución del nivel freático en el entorno de Doñana se halla irregularmente repartida en el espacio. Estos freatómetros registran datos muy fiables para determinar la profundidad del freático en zonas próximas. Sin embargo, para conocer la situación del freático en áreas más alejadas se requieren métodos geoestadísticos que permitan modelar la estructura de variación espacial, realizar predicciones y conocer la distribución del error. En acuíferos detríticos no confinados, la definición de la superficie freática está condicionada por las características topográficas del área, por lo que es apropiado utilizar los datos suministrados por un modelo digital del terreno y así agregar variables secundarias que mejoren las predicciones basadas en variables primarias (Desbarats et al., 2002). En la presente comunicación, se expone una comparativa entre interpoladores y métodos geoestadísticos con el objetivo de estimar la superficie freática mediante el uso de datos piezométricos y covariables topográficas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y problemática ambiental

Globalmente, nuestro ámbito de estudio (Figura 1) es el freático situado bajo las arenas del entorno de Doñana, dentro del acuífero Almonte-Marismas. Localmente, estamos interesados en un área rectangular de 70 km² que incluye el ecotono situado entre las marismas y las arenas estabilizadas y se extiende a través del acuífero libre hacia el interior del parque, una zona donde se sucede un mosaico de ecosistemas mediterráneos vinculados –entre otros factores- con las distintas manifestaciones superficiales e hipogeas del agua y en la que estamos desarrollando diferentes trabajos relacionados con el decaimiento forestal del alcornoque.

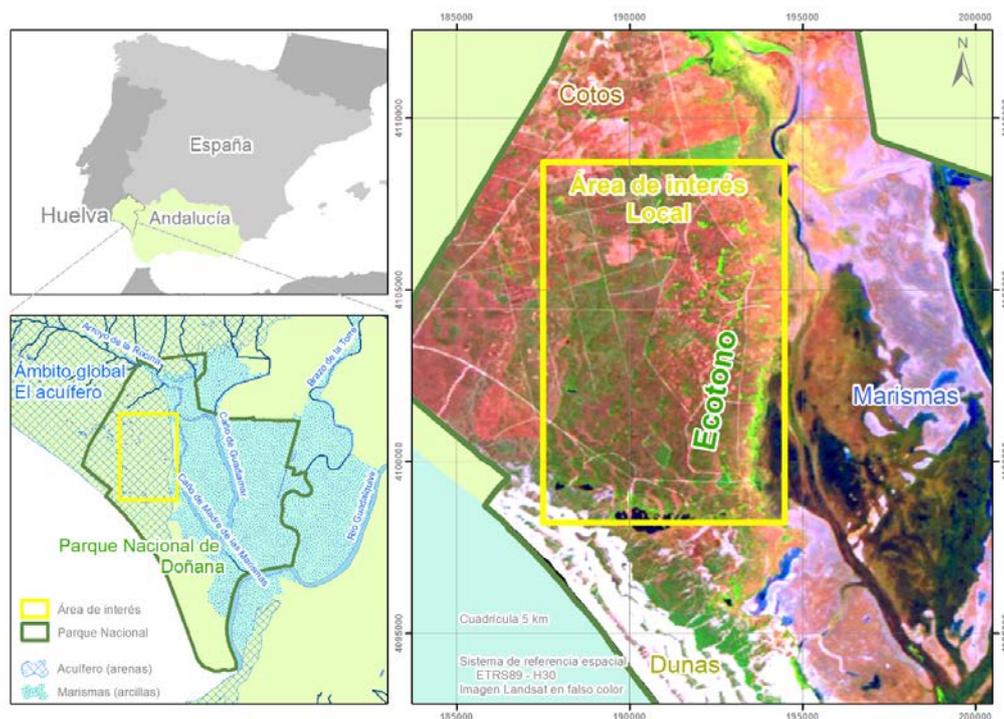


Figura 1. Situación.

La mitad oriental del Parque Nacional de Doñana comprende una importante extensión arcillosa que se inunda estacionalmente, la marisma. Hacia el oeste, las arenas avanzan desde el frente marítimo dunar, se estabilizan en los cotos y se entremezclan a través de una franja de ecotono en el contacto con las marismas. Los suelos arenosos conforman un importante acuífero libre limitado por el mar y el arroyo de la Rocina que vierte hacia a la marisma a través del Caño de la Madre de las Marismas, donde el acuífero se encuentra confinado por las arcillas (Juárez et al., 2012). Los niveles freáticos están muy cerca de superficie en las zonas más deprimidas y próximas a la marisma, de acuerdo con la superficie piezométrica, la topografía y la dirección del flujo de las aguas subterráneas que tiende hacia el este en la zona de ecotono conocida como La Vera. Las aguas subterráneas también varían -en su conjunto- anual e interanualmente según las precipitaciones y, localmente, según las extracciones producto de la actividad antrópica (Custodio et al., 2009).

A grandes rasgos, sobre las arenas estabilizadas, se distinguen dos formaciones vegetales condicionadas por la mayor o menor disponibilidad del agua (Rivas-Martínez et al., 1980): “monte blanco”, allí donde el freático está más profundo, es un matorral con especies xerófilas dominantes; y, “monte negro”, con aguas hipogeas próximas a superficie, lugares propicios para diferentes especies higrófilas. Junto con estas comunidades arbustivas crecen diferentes especies arbóreas propias de ambientes más húmedos, especialmente en el citado ecotono de La Vera. También persiste un importante alcornocal centenario testigo de poblaciones que en el pasado fueron mucho más numerosas (Corona et al., 1988) y que en las últimas décadas viene experimentando diferentes procesos de decaimiento relacionados con distintas causas entre las que se encuentra la influencia indirecta de las aves zancudas nidificantes debido a los aportes de guano en el suelo (García et al., 2011). En este punto, la presencia del agua podría adoptar un rol fundamental de cara a las perspectivas de futuro de estos árboles, de acuerdo con los escenarios de cambio climático predichos (IPCC, 2013) que estiman una aridificación del clima en la región, de ahí la importancia del estudio de la distribución espacial de los recursos hídricos.

2.2. Fuente de datos: datos piezométricos y variables secundarias

Los datos primarios utilizados para realizar las predicciones proceden de la red de piezómetros freáticos que la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) mantiene en el Parque Nacional de Doñana y su entorno. Se descartaron registros duplicados y se promediaron los datos procedentes de diferentes piezómetros situados en la misma localización.

Es conveniente utilizar el mayor número de puntos posibles para estudiar adecuadamente la autocorrelación espacial y obtener unas predicciones geoestadísticas más exactas, pero también es preciso reducir el radio de la vecindad para producir superficies locales más fiables. Algunos autores recomiendan no utilizar menos de 30 observaciones para estimar el semivariograma (Journel y Huijbregts, 1978) y 50 para realizar la predicción espacial (Webster y Oliver, 1992), aunque podemos encontrar trabajos publicados en los cuales sus autores trabajan con menos puntos (Li y Heap, 2011). Nosotros empleamos, en total, un máximo de 50 observaciones para estimar las superficies y no menos de 30 para el semivariograma. Para ello, se incorporaron todos los registros posibles para realizar un estudio completo de la autocorrelación espacial de los datos piezométricos y las covariables y así conocer el funcionamiento global del sistema en las áreas donde el acuífero es libre y sus aguas se encuentran interconectadas. Por otro lado, como el objetivo específico del trabajo es producir superficies freáticas más exactas en las zonas de ecotono, redujimos el ámbito de la vecindad.

La base de datos contiene registros de profundidad del freático que toman como fecha de referencia 1 de octubre de cada año. La serie completa comprende datos desde 1994 hasta 2012. Nosotros calculamos el promedio anual del nivel freático en cada localización con piezómetro, esto es, cada punto registra el nivel freático promedio de los últimos 18 años tomando como fecha de referencia el nivel freático registrado en octubre de cada año.

Para incorporar variables secundarias, trabajamos con el Modelo Digital del Terreno (MDT) elaborado por el Instituto de Cartografía de Andalucía (IECA) para el conjunto de la región basado en fotogrametría con 10 metros de resolución de malla o píxel. A partir del MDT se obtuvieron un conjunto de modelos derivados: altimetría, pendiente, distancia a la marisma y lagunas, índice topográfico de humedad. Posteriormente, realizamos un muestreo sistemático regular en toda el área de estudio basado en una malla de puntos con 500 m de equidistancia. Mediante geoprocésamiento, asignamos los valores de cada píxel en los diferentes modelos digitales del terreno por cada localización de la nube de puntos. Así, mientras con las variables primarias, tenemos un máximo de 50 puntos irregularmente distribuidos, el muestreo regular incorpora 1500 puntos con registros de extraídos del MDT en cada nueva localización. Este muestreo

mantiene los puntos que registran las localizaciones de los piezómetros, por lo que es posible comparar, en las mismas localizaciones, los valores de la variable primaria (nivel freático) con los correspondientes valores de las variables secundarias (altimetría, pendientes, humedad, etc.). La Figura 2 ilustra la distribución espacial de los datos.

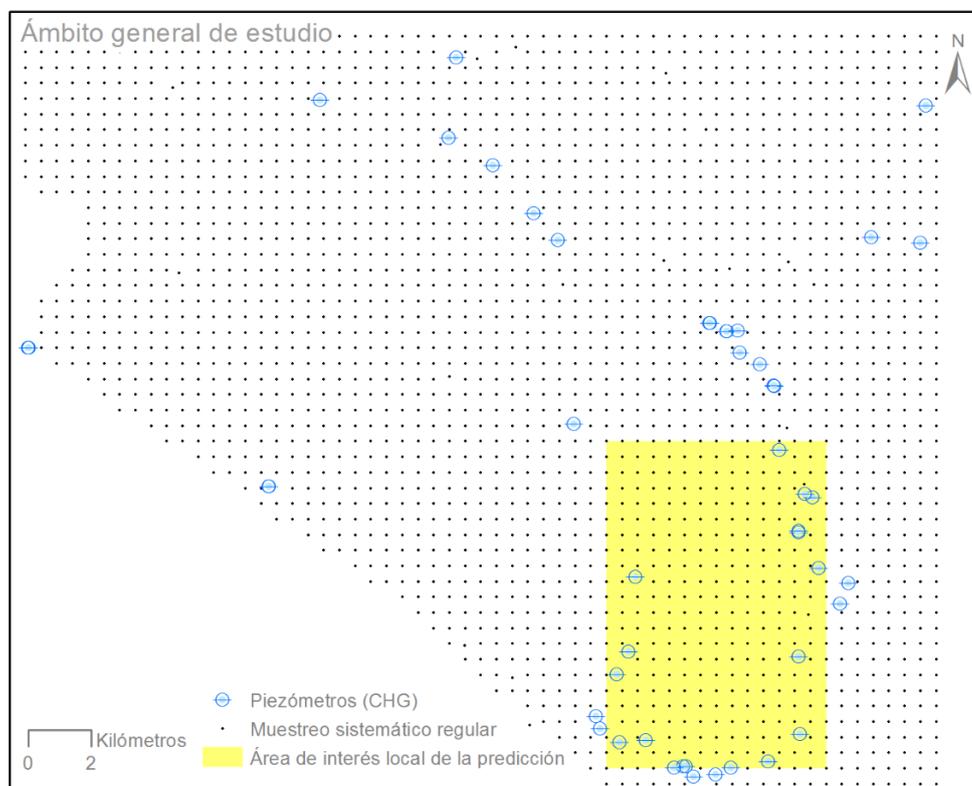


Figura 2. Red piezométrica y muestreo sistemático regular.

2.3. Análisis exploratorio, interpoladores y métodos geoestadísticos

El primer paso que conlleva un estudio geoestadístico es el análisis exploratorio (Goovaerts, 1997). Llevamos a cabo un análisis estadístico descriptivo para estudiar la distribución de los datos piezométricos y estimar medidas de tendencia, forma y dispersión, aplicando transformaciones en caso de falta de normalidad. Seguidamente, examinamos la estructura de la autocorrelación espacial a través del semivariograma empírico y el gráfico de covarianza cruzada.

La predicción de las superficies se ha llevado a cabo siguiendo tres métodos diferentes. En primer lugar, se utilizó un interpolador exacto muy robusto, media ponderada por el inverso de la distancia (IDW). Seguidamente, aplicamos el método geoestadístico más generalizado, Kriging Ordinario, ya que nos permite interpolar superficies y conocer, además, la distribución del error al mismo tiempo. Finalmente, se incorporaron las variables secundarias a través de Co-Kriging Ordinario debido a las deficiencias detectadas en el muestreo de las variables primarias, con el objeto de minimizar los errores en la predicción. En los tres casos, buscando que las predicciones se realizaran basándose en los mismos puntos, se definió un radio de vecindad común que incorpora el mismo número de vecinos para los tres métodos, con la salvedad de Co-Kriging que agrega además los registros mejor muestreados procedentes de la variable secundaria. La variable secundaria es aquella mejor correlacionada estadísticamente con la variable primaria. Igualmente, se verificó el vínculo espacial entre la variable primaria y la variable secundaria a través de un gráfico de covarianza cruzada.

Fijamos las predicciones minimizando los errores de las mismas. La evaluación entre los modelos se realizó con validación cruzada para obtener los siguientes estadísticos: el error medio, parámetro fundamental, con un valor óptimo en cero; el error cuadrático medio, donde prima el valor más bajo; y, el error cuadrático medio estandarizado, que debe aproximarse a 1. Asimismo, comparamos la coherencia espacial de las superficies predichas y la distribución espacial del error, pues esta última resulta especialmente útil en el caso de la predicción local.

El análisis estadístico de los datos se llevó a cabo operando con el software de análisis estadístico *Statistica 7.0* y para el procesamiento geoestadístico y mapeado empleamos conjuntamente *ArcMap 10.3* y la extensión *Geostatistical Analyst 10.3*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis estadístico

Los niveles freáticos (Figura 3) oscilan entre los 0 y los 10,5 metros de profundidad, con un valor medio de 2,9 m. Sin embargo, la dispersión es elevada ($\sigma = 2,4$). Predominan los valores muy bajos. Esto se debe a que la mayor parte de los puntos se concentran en determinadas franjas próximas y homogéneas entre sí, hecho que determina un histograma de frecuencias con asimetría positiva. A través del gráfico de cajas y bigotes, se constata la existencia de diferentes valores extremos que se corresponden con los puntos más alejados.

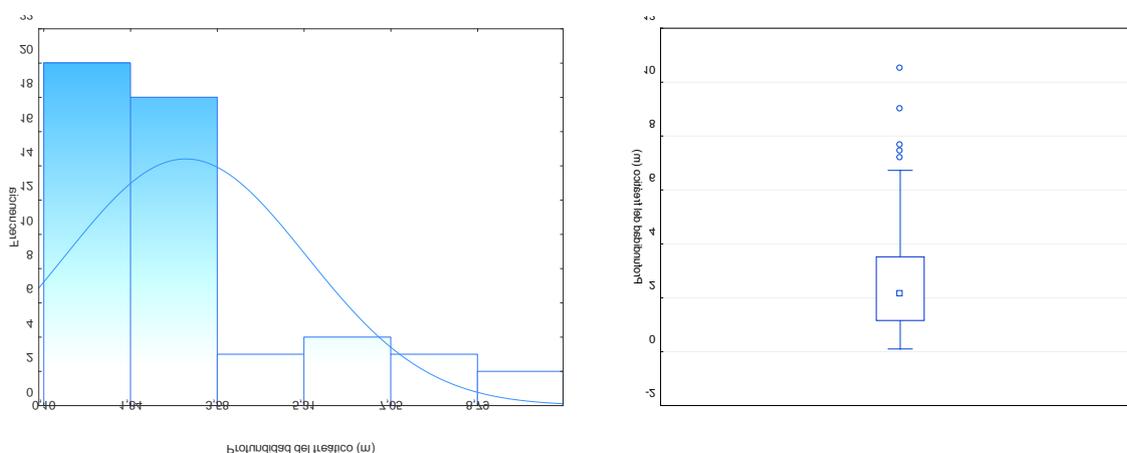


Figura 3. Histograma y gráfico de cajas y bigotes. Registros piezométricos

Los datos no se ajustan a la normalidad, hecho que también se infiere a través del gráfico Q-Q (Figura 4). Existen influencias direccionales muy potentes en dirección este-oeste; a medida que avanzamos hacia poniente y nos alejamos de la marisma los registros son más elevados. También hay una pequeña tendencia de aumento de los datos conforme avanzamos hacia el norte. Se requiere una transformación de los datos piezométricos y considerar la tendencia. En nuestro caso, la transformación logarítmica resultó satisfactoria, igualando media-mediana y reduciendo la varianza.

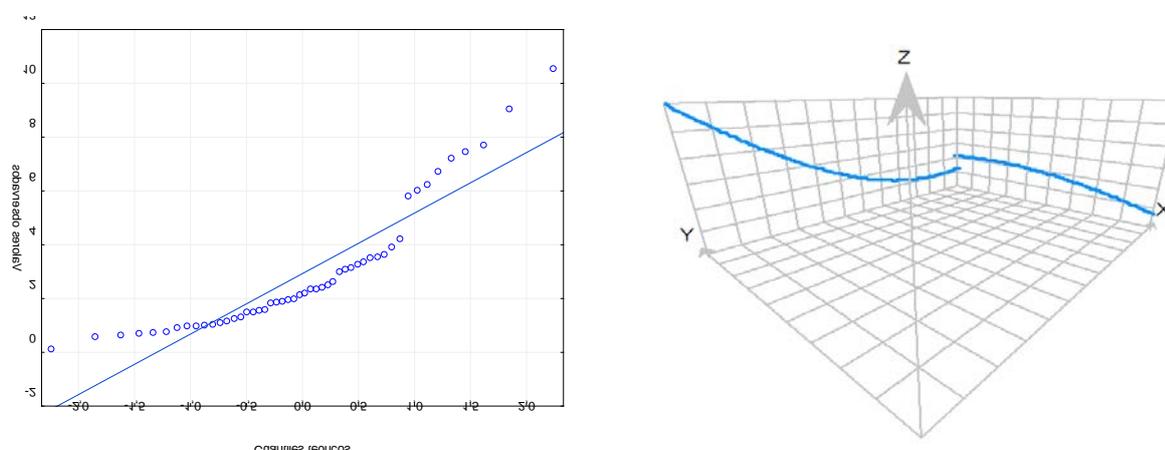


Figura 4. Gráfico de normalidad y gráfico de tendencia. Registros piezométricos.

Cuando analizamos las variables secundarias obtenidas a través del modelo digital del terreno pero en los puntos coincidentes con los datos piezométricos, mantenemos el problema de la falta de normalidad de los datos, consecuencia de la estructura espacial del muestreo. El estudio de la correlación (Figura 5) nos permitió detectar una correlación alta ($r = 0,83$; $p = 0,001$) entre la profundidad del nivel freático y los datos altimétricos. También encontramos una correlación moderada-alta entre los niveles piezométricos y la distancia a las principales zonas húmedas ($r = 0,72$; $p = 0,001$). Algunos autores han obtenido buenos resultados con Co-Kriging partiendo de coeficientes de correlación relativamente bajos, en torno a un $r = 0.4$ (Yang et al., 2014), debido a que este método geoestadístico corrige los sesgos del muestreo y fija los modelos con la covarianza cruzada. De cualquier modo, elegimos exclusivamente los datos altimétricos como variable secundaria.



Figura 5. Matriz de correlaciones.

3.2. Estructura espacial

Uno de los principales objetivos de la geoestadística es modelar la dependencia espacial de los fenómenos geográficos y para ello la principal herramienta es el variograma o semivariograma empírico (Oliver y Webster, 2014), un gráfico que representa distancia entre pares de puntos en el eje de abscisas (x) y la mitad de las diferencias al cuadrado entre estos pares en el eje de ordenadas (y). En nuestro caso (Figura 6), a través del semivariograma se infiere la estructura espacial que presentan los registros piezométricos cuya varianza aumenta con la distancia hasta cierto punto y, a partir de éste, la distancia ya no ejerce un efecto sobre la varianza. El gráfico de covarianza cruzada se basa en el mismo principio de dependencia espacial, relacionando una variable primaria y una variable secundaria. Cuando no existe dependencia espacial, la dependencia es igual a cero. Registros piezométricos y altimétricos co-evolucionan según la distancia. En estos casos, se dice que los datos tienen estructura espacial y es factible la predicción superficies mediante métodos geoestadísticos.

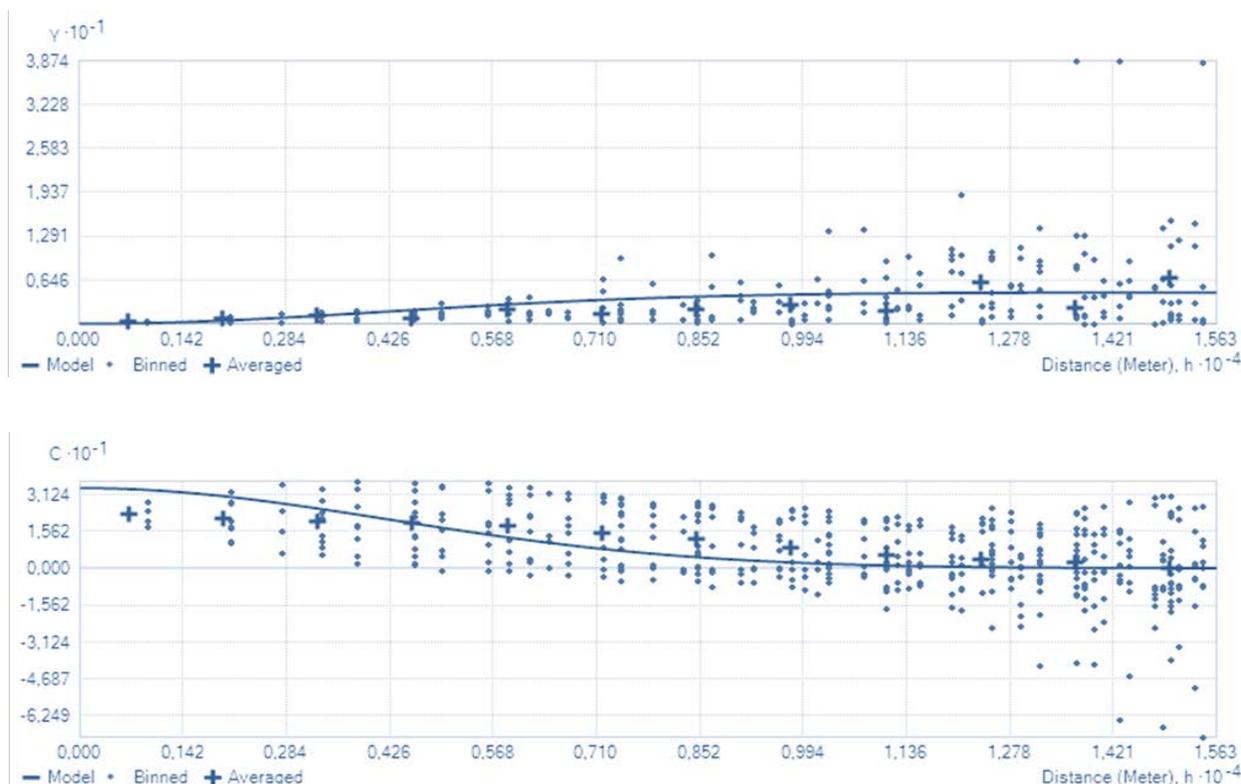


Figura 6. Semivariograma y gráfico de covarianza cruzada.

3.3. Predicción de superficies y evaluación de modelos

Una vez esclarecida la dependencia espacial de nuestras variables, se puede interpolar y estimar las superficies continuas coherentemente. Antes de realizar la predicción, para cumplir el supuesto de normalidad, realizamos una transformación logarítmica. Es posible reducir el efecto de la tendencia operando con radios de vecindad pequeños, incluso se puede modelar incorporando la propia tendencia mediante la combinación de superficies polinómicas de tendencia y kriging, es lo que se conoce con el nombre de Kriging Universal. Pero como en nuestro caso optamos realizamos Kriging Ordinario, para asegurar la estacionariedad de los datos, removimos la tendencia.

Los resultados muestran (Tabla 1) una mayor exactitud de los métodos geoestadísticos sobre el clásico interpolador basado en la media ponderada de la distancia. Co-Kriging produce superficies donde la media del error medio entre los valores medidos y los valores predichos es más baja. No obstante, es importante señalar que Co-Kriging sobreestima más la variabilidad en las predicciones. Los mapas con las predicciones globales (Figura 7) muestran superficies que en IDW mantienen los clásicos “ojos de buey” alrededor de los puntos. Estas superficies aparecen más suavizadas en el Kriging. Finalmente, Co-Kriging proyecta los matices de la topografía y los contornos son más coherentes con la dirección del flujo subterráneo de las aguas.

Tabla 1. Comparación de modelos.

Método / Parámetro	IDW	Kriging	Co-Kriging
Error medio	-0,09363	0,03517	0,00193
Error cuadrático medio	1,27244	1,11762	1,13387
Error medio estandarizado		-0,0315	0,00352
Error cuadrático medio estandarizado		0,9807	0,67751

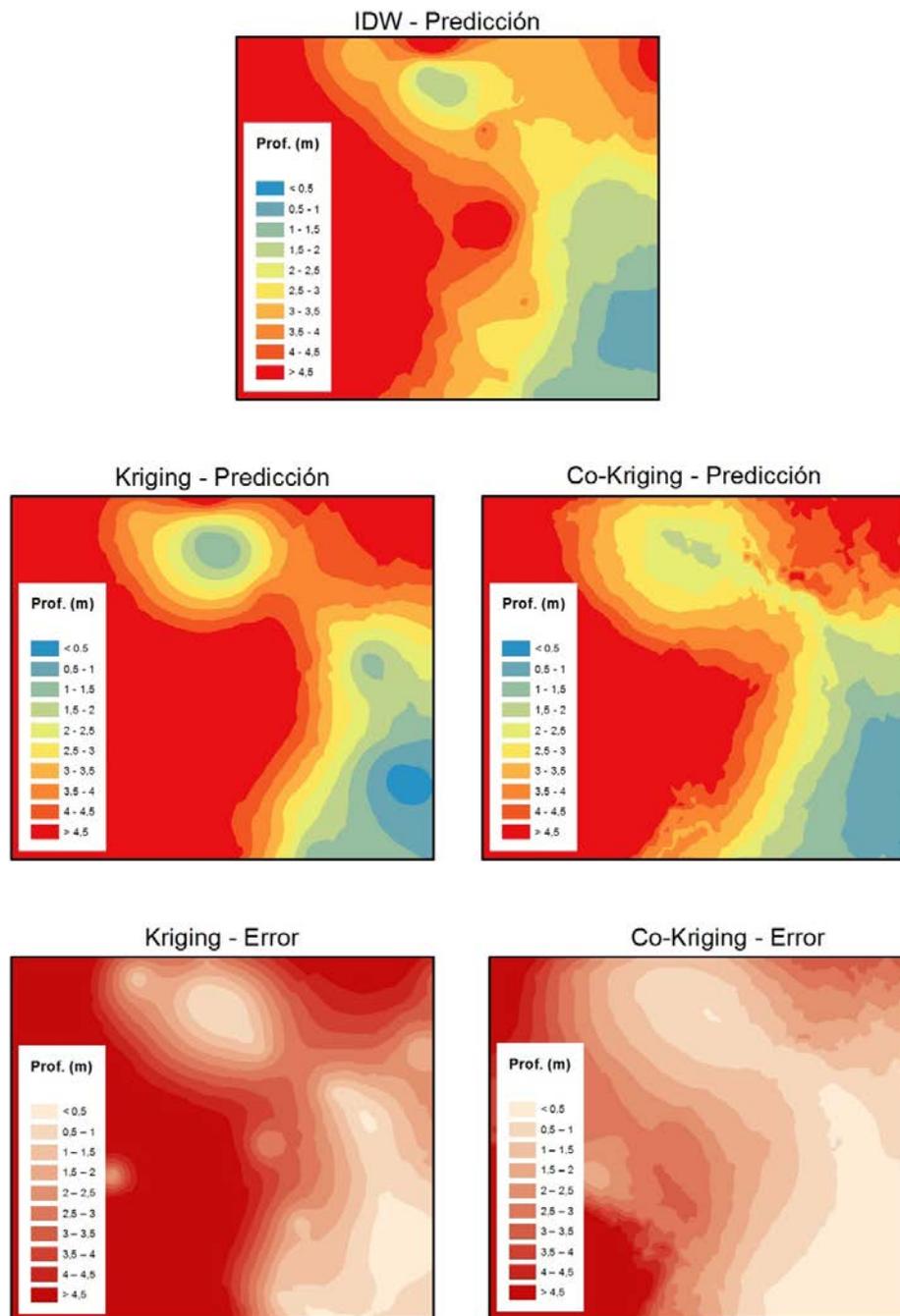


Figura 7. Predicciones globales. Profundidad del freático en metros.

Como decíamos anteriormente, un aspecto que constata la bondad del Co-Kriging es la minimización del error medio. Tanto los estadísticos generales como la distribución espacial del error arrojan mejores resultados para Co-Kriging. El mapa de error permite además localizar espacialmente las zonas donde el error es más bajo y las predicciones más exactas. Las predicciones locales (Figura 8) confirman este punto. Co-kriging produce superficies suavizadas acordes con la dirección del flujo de las aguas y con un error más bajo.

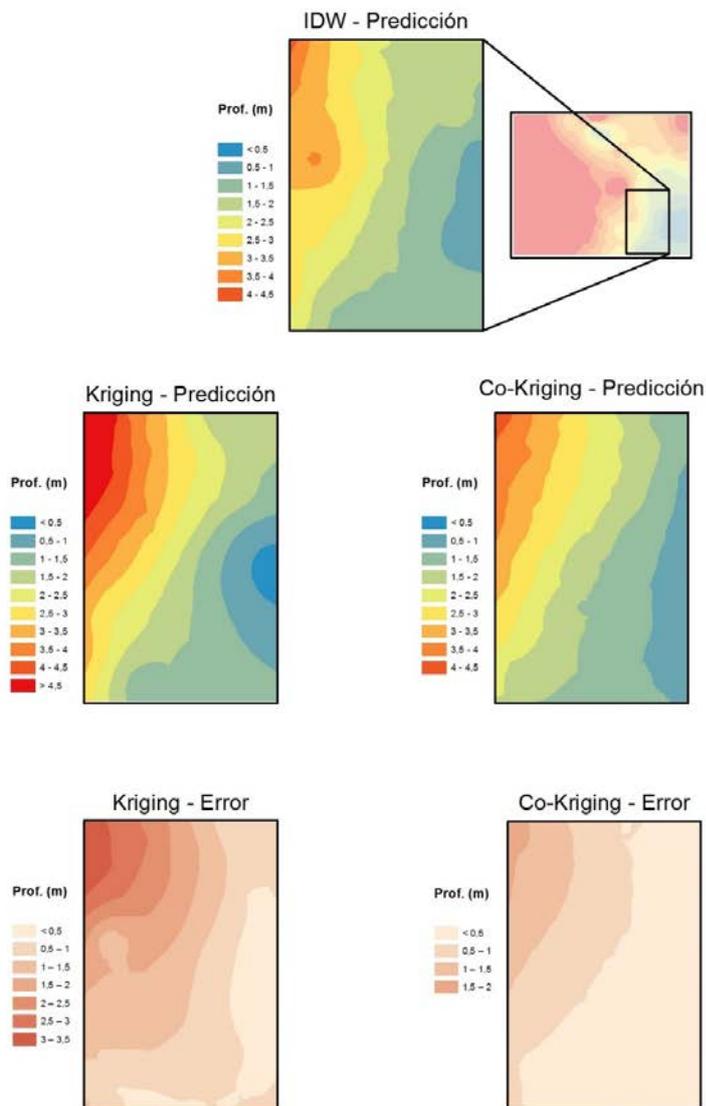


Figura 8. Predicciones locales. Profundidad del freático en metros.

4. CONCLUSIONES

En general, interpoladores y métodos geoestadísticos predicen adecuadamente superficies continuas basadas en puntos. Cuando los datos primarios son escasos y están irregularmente repartidos, conviene decantarse por métodos geoestadísticos debido a que ofrecen mayor información sobre la exactitud y la incertidumbre en las predicciones. Además, cuando es posible incorporar variables secundarias correlacionadas y bien muestreadas, el Co-Kriging mejora el desempeño del Kriging.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a una Beca Jae-Predoc cuyo beneficiario es Oliver Gutiérrez Hernández. Asimismo, los trabajos también han sido financiados por los proyectos DECALDO (OAPN 091/2009) y BIOGEOBIRD (P09-RMN-4987).

5. BIBLIOGRAFÍA

- Castroviejo, J., (1993): Memoria del Mapa del Parque Nacional del Doñana. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- Corona, M.G., Vicente, A.M., Novo, F.G., (1988): "Long-term vegetation changes on the stabilized dunes of Doñana National Park (SW Spain)". *Vegetatio* 75, 73–80.
- Custodio, E., Manzano, M., Montes, C., (2009): Las aguas subterráneas en Doñana: Aspectos ecológicos y sociales. Agencia Andaluza del Agua, Sevilla.
- Desbarats, a. J., Logan, C.E., Hinton, M.J., Sharpe, D.R., (2002): "On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model". *J. Hydrol.* 255, 25–38.
- García Murillo, P., Sousa Marín, A., (1999): "El paisaje vegetal de la zona oeste del Parque Natural de Doñana (Huelva)". *Lagascalía* 21, 111–132.
- García, L. V., Ramo, C., Aponte, C., Moreno, A., Domínguez, M.T., Gómez-Aparicio, L., Redondo, R., Marañón, T., (2011): "Protected wading bird species threaten relict centenarian cork oaks in a Mediterranean Biosphere Reserve: A conservation management conflict". *Biol. Conserv.* 144, 764–771.
- Goovaerts, P., (1997): *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Hannah, D.M., Wood, P.J., Sadler, J.P., (2004): "Ecohydrology and hydroecology: A "new paradigm"?" *Hydro. Process.* 18, 3439–3445.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, New York.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., (1989): *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Journel, A., Huijbregts, C.J., (1978): *Mining Geostatistics*. Academic Press, New York.
- Juárez, I., Custodio, E., Manzano, M., (2012): Relación aguas superficiales–aguas subterráneas y recarga del acuífero de Los Sotos, Doñana, in: *Agua y Constitución: VIII Simposio Del Agua En Andalucía*. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Instituto Geológico y Minero de España, Cádiz, pp. 1479–1489.
- Li, J., Heap, A.D., (2011): "A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors". *Ecol. Inform.* 6, 228–241.
- Muñoz Reinoso, J., (2001). "Vegetation changes and groundwater abstraction in SW Doñana, Spain. J". *Hydro. Process.* 242, 197–209.
- Oliver, M. a., Webster, R., (2014). "A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging". *Catena* 113, 56–69.
- Pueyo, Y., (2013): "Aportación de los modelos ecohidrológicos con feedbacks al conocimiento del funcionamiento de los ecosistemas de zonas áridas y semi-áridas ". *Cuad. Inv. Geográfica* 39, 243–258.
- Rivas-Martínez, S., Costa, M., Castroviejo, S., Valdés, E., (1980): "Vegetación de Doñana (Huelva , España)". *Lazaroa* 2, 5–180.
- Tobler, W., (1970): "A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region". *Econ. Geogr.* 46, 234–240.
- Webster, R., Oliver, A., (1992): "Sample adequately to estimate variograms of soil properties". *J. Soil Sci.* 43, 177–192.
- Yang, Q., Jiang, Z., Ma, Z., Li, H., (2014): "Spatial prediction of soil water content in karst area using prime terrain variables as auxiliary cokriging variable". *Environ. Earth Sci.* 72, 4303–4310.