

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO ESPACIAL DE CUATRO IONES MAYORITARIOS Y ARSÉNICO EN EL ACUÍFERO CALERA, ZACATECAS

• Hugo E. Júnez-Ferreira • Carlos F. Bautista-Capetillo •
• Julián González-Trinidad •

Universidad Autónoma de Zacatecas, México

Resumen

Conocer la distribución espacial y evolución temporal de la cantidad y calidad del agua subterránea resulta fundamental en el manejo de acuíferos. En este artículo se presentan los resultados de un análisis geoestadístico espacial realizado a cuatro iones mayoritarios (calcio, cloruro, sodio y sulfato) y arsénico (elegido por el alto grado de toxicidad que representa), considerados parámetros indicadores de la calidad del agua para el acuífero Calera, Zacatecas, México. Las configuraciones espaciales obtenidas complementan el modelo conceptual existente del funcionamiento del agua en el acuífero. Se observó que, en general, el agua subterránea en la zona es de buena calidad de acuerdo con los valores establecidos por la NOM-127-SSA1-1994.

Palabras clave: geoestadística, semivariograma, iones mayoritarios, arsénico, calidad del agua, acuífero, Calera, Zacatecas.

Introducción

El conocimiento de la calidad del agua y su evolución —ya sea debido a procesos naturales o actividades antropogénicas— es muy importante para tomar medidas preventivas, de remediación o para determinar su disponibilidad. La calidad del agua se determina mediante un conjunto de valores relativos a parámetros físicos, químicos y biológicos, de los que se han establecido límites tolerables y valores máximos en función del uso previsto del recurso (Varela, 1993). El conocimiento de la distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos ayuda también a complementar el entendimiento del funcionamiento del agua en acuíferos. Existen varios trabajos en la literatura donde se ha utilizado la estimación espacial y/o temporal basada en la geoestadística de alguna variable hidrogeológica, algunos recientes son: Ahmadi y Sedghamiz (2007), Zaidi y Guner (2007), Mendoza-Cázarez y Herrera-Zamarrón (2007), Ahmadi y Sedghamiz (2008), y Ta'any y Tahboub (2009).

El objetivo de este trabajo fue encontrar modelos geoestadísticos para diversos parámetros fisicoquímicos muestreados en el acuífero Calera y obtener estimaciones espaciales con un bajo nivel de incertidumbre para cada uno de ellos.

Materiales y métodos

Descripción de la zona de estudio

El acuífero Calera se localiza al centro del estado de Zacatecas y cubre una superficie aproximada de 2 087.6 km². En la zona ocurre una precipitación media anual de 450 mm, a una temperatura media anual de 16 °C y una evapotranspiración potencial media de 1 990 mm por año. Este acuífero constituye la principal fuente de abastecimiento de agua potable, agrícola e industrial de la región, con una extracción promedio anual de 125 Mm³; tiene régimen libre y espesores que varían de 38 m en el norte a 570 m en la parte centro-sur (Conagua, 2009).

La recarga del acuífero proviene principalmente de la precipitación pluvial que ocurre sobre las sierras y lomeríos de la cuenca (figura 1a). En menor proporción, el agua precipitada en el valle recarga verticalmente al acuífero (BETSCO Consultoría, 2004). Finalmente, otro volumen proviene de los retornos de riego por bombeo. La descarga artificial se realiza por bombeo de pozos y norias; de manera natural, un volumen pequeño está siendo drenado por flujo subterráneo hacia las lagunas Santa Ana y Sedano. La dirección preferencial del flujo subterráneo es de sur a norte, con ingreso en las porciones este y oeste dentro de los límites con las sierras y lomeríos (figura 1b).

Análisis geoestadístico

La geoestadística considera la estructura de correlación espacial y/o temporal entre datos de una variable para su estimación en posiciones

y/o tiempos de interés. A continuación se describen los pasos que comprenden un análisis geoestadístico.

Análisis preliminar y exploratorio de los datos

Se revisa la base de datos para detectar la eventual presencia de datos anómalos y se verifica que el histograma de la muestra tenga una distribución cercana a la normal; en caso contrario, se pueden eliminar los valores atípicos y/o hacer una transformación de los datos. Para una distribución normal, el coeficiente de asimetría es cero y la curtosis es tres (Webster y Oliver, 2007).

Análisis estructural

El semivariograma experimental se estima cuando los datos presentan una distribución cercana a la normal, a éste se le ajusta un mo-

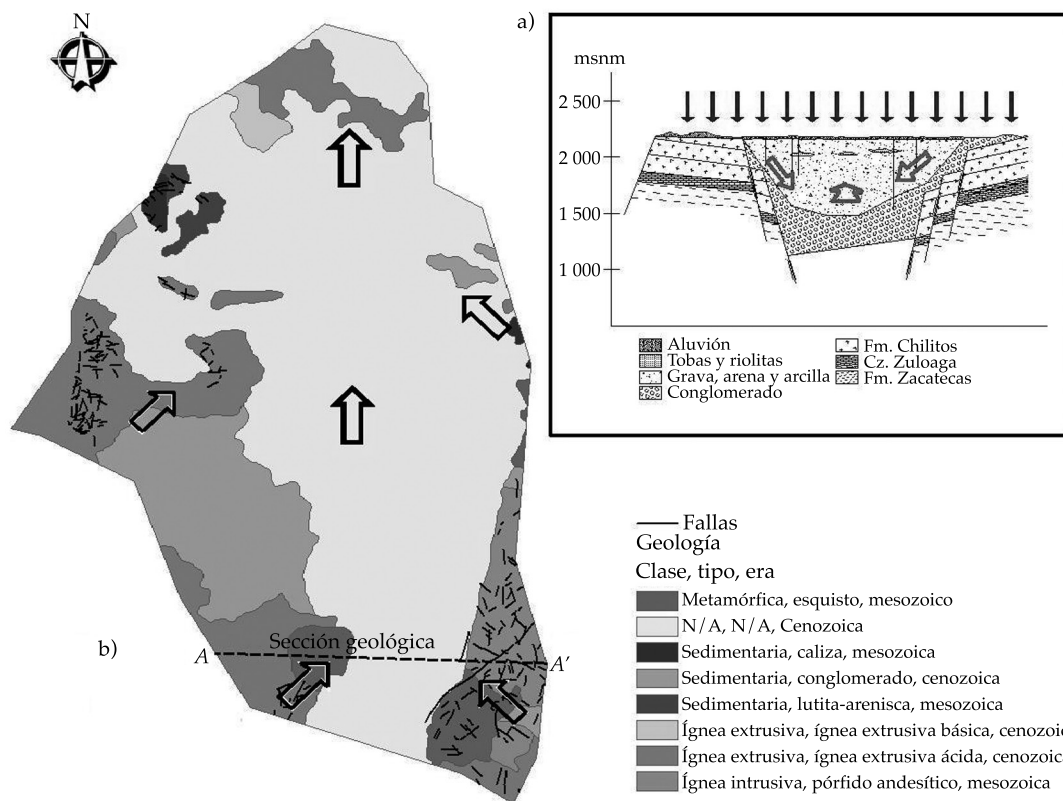


Figura 1. Modelo conceptual hidrodinámico del acuífero Calera: a) vista en planta, b) sección transversal A-A'.

Cuadro 1. Estadígrafos de los datos utilizados en el análisis geoestadístico.

Variable	Arsénico	ln arsénico	Calcio	Calcio (sin dos valores atípicos)	Cloruro	ln cloruro (sin un valor atípico)	Sodio	ln sodio (sin un valor atípico)	Sulfato	ln sulfato (sin dos valores atípicos)
Datos	43	43	43	41	43	42	43	41	43	41
Mínimo	0.004	-5.426	56.95	56.95	2.26	0.82	13.80	2.62	6.74	1.91
Máximo	0.090	2.402	402.73	156.62	117.97	4.07	156.40	4.46	468.00	4.57
Media	0.023	-3.934	108.37	96.49	13.82	2.18	47.83	3.72	51.58	3.37
Mediana	0.021	-3.863	99.66	97.63	8.36	2.11	43.24	3.75	34.70	3.54
Desviación estándar	0.015	0.618	60.19	23.78	19.10	0.67	25.04	0.46	83.74	0.59
Asimetría	2.134	-0.245	3.54	0.56	4.22	0.52	1.96	-0.63	4.14	-0.65
Curtosis	10.069	3.101	16.58	2.99	22.37	3.47	9.34	3.07	19.42	3.17

delo teórico. El ajuste del modelo se realizó a prueba y error, según los estadígrafos de la validación cruzada mediante el método de *leave one out*. Algunos estadígrafos importantes a considerar durante el ajuste son la raíz cuadrada del error cuadrático medio (raíz del ECM), que representa el error aproximado en la estimación sobre la zona de estudio, y el error cuadrático medio estándar (ECME), que indica la consistencia de las varianzas en la estimación calculadas contra las observadas. Un valor cercano a uno indica un buen ajuste. Delhomme (1978) propuso que, en ciencias del agua, el ECME debe estar en el rango $1 \pm 2\sqrt{\frac{2}{n}}$, donde n = número de datos.

Estimación espacial

Se estima el parámetro sobre la zona de estudio mediante krigado ordinario. El objetivo del krigado es obtener, en posiciones de interés, una estimación $Z^*(x)$ de $Z(x)$, como una combinación lineal de los valores medidos Z_i en los puntos de observación x_i , además permite calcular la varianza del error en las posiciones de estimación. Para el desarrollo de las ecuaciones de krigado ordinario se impone que la estimación sea lineal, sin sesgo y con varianza mínima.

Resultados

Los parámetros indicadores de la calidad del agua analizados geoestadísticamente fueron arsénico (por su alta toxicidad), calcio, cloruro, sodio y sulfato (iones mayoritarios); éstos fueron muestreados durante febrero y marzo de 2007. En todos los casos se contó con datos en 43 pozos y las mediciones se llevaron a cabo en mg/L. Se detectaron algunos valores atípicos que no se emplearon en la construcción del semivariograma experimental, pero sí en la estimación. Fue necesaria una transformación logarítmica de algunos parámetros (ver cuadro 1). A todos los parámetros fisicoquímicos les correspondió un semivariograma esférico (figura 2).

Los parámetros de los modelos y los resultados de la validación cruzada se presentan en el cuadro 2. Los resultados de las estimaciones se presentan en la figura 3.

Para el arsénico se observa una distribución prácticamente uniforme sobre el acuífero, salvo un valor de 0.0905 mg/L al sur, que se encuentra por encima del límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (de 0.05 mg/L). Para los iones mayoritarios se advierte en general una tendencia en el incremento de las concentraciones de sur a noreste; el sulfato presenta un valor de 468 mg/L, por encima del límite permisible de 400 mg/L.

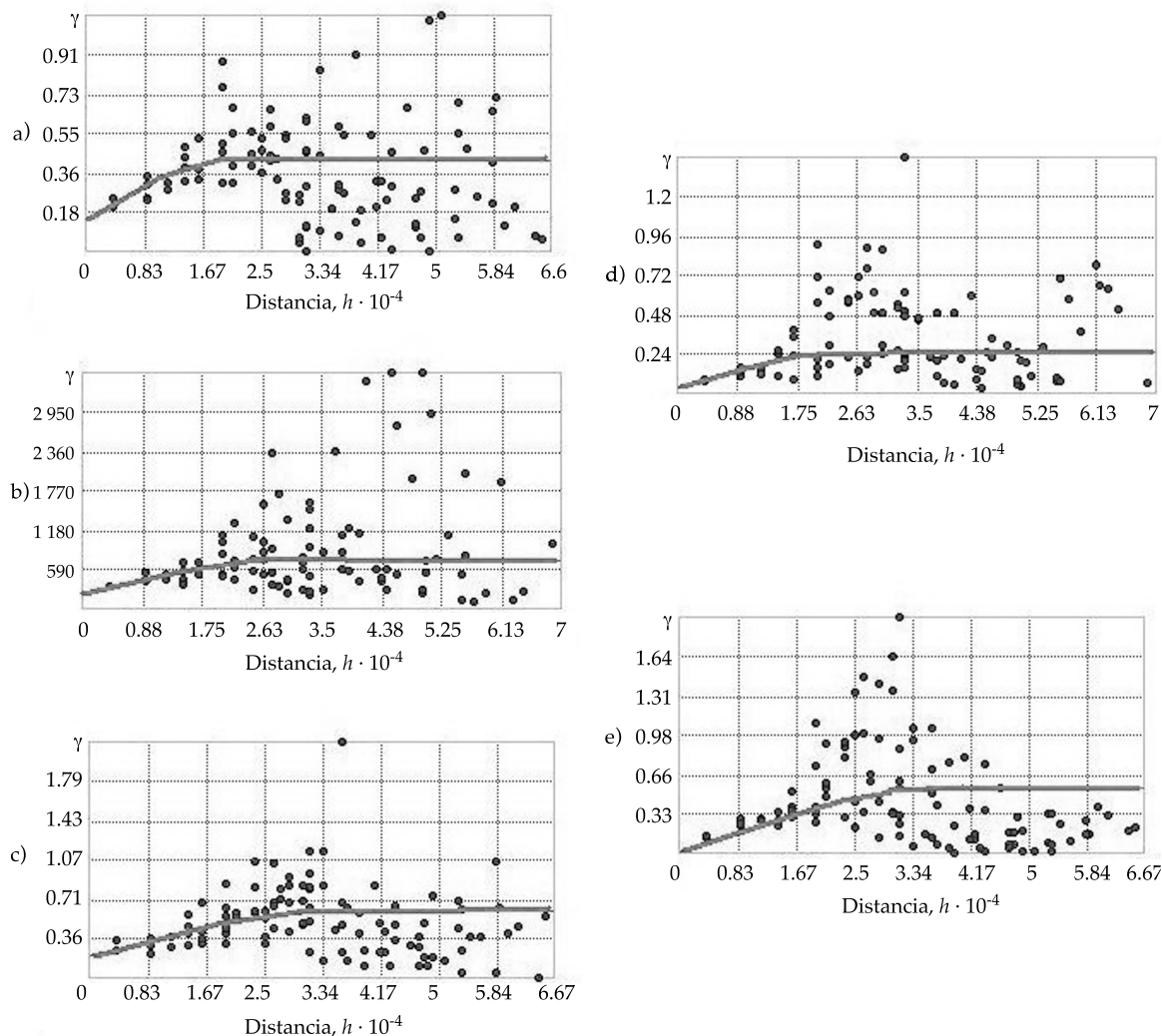


Figura 2. Semivariogramas experimental y teórico de los datos de: a) In arsénico, b) calcio sin dos valores atípicos, c) In cloruro sin un valor atípico, d) In sodio y e) In sulfato sin dos valores atípicos.

Cuadro 2. Parámetros de los modelos seleccionados y resultados de la validación cruzada.

Variable	Modelo	Parámetros del modelo			Resultados de la validación cruzada (variable original)				
		Nugget	Sill	Alcance	Error medio (mg/L)	Error mín. (mg/L)	Error máx. (mg/L)	ECME	Raíz del ECM (mg/L)
In arsénico	Esférico	0.147	0.423	21 727.800	-0.0003	-0.0673	0.0257	1.2785	0.0154
Calcio	Esférico	179.84	736.01	38 127.70	-1.020	-51.114	53.756	1.235	20.580
In cloruro	Esférico	0.20	0.60	37 000.00	-0.445	-49.576	13.853	1.299	10.159
In sodio	Esférico	0.03	0.25	27 233.30	0.036	-52.256	48.657	1.388	17.332
In sulfato	Esférico	0.001	0.54	38 900.00	0.585	-46.392	39.130	1.000	13.980

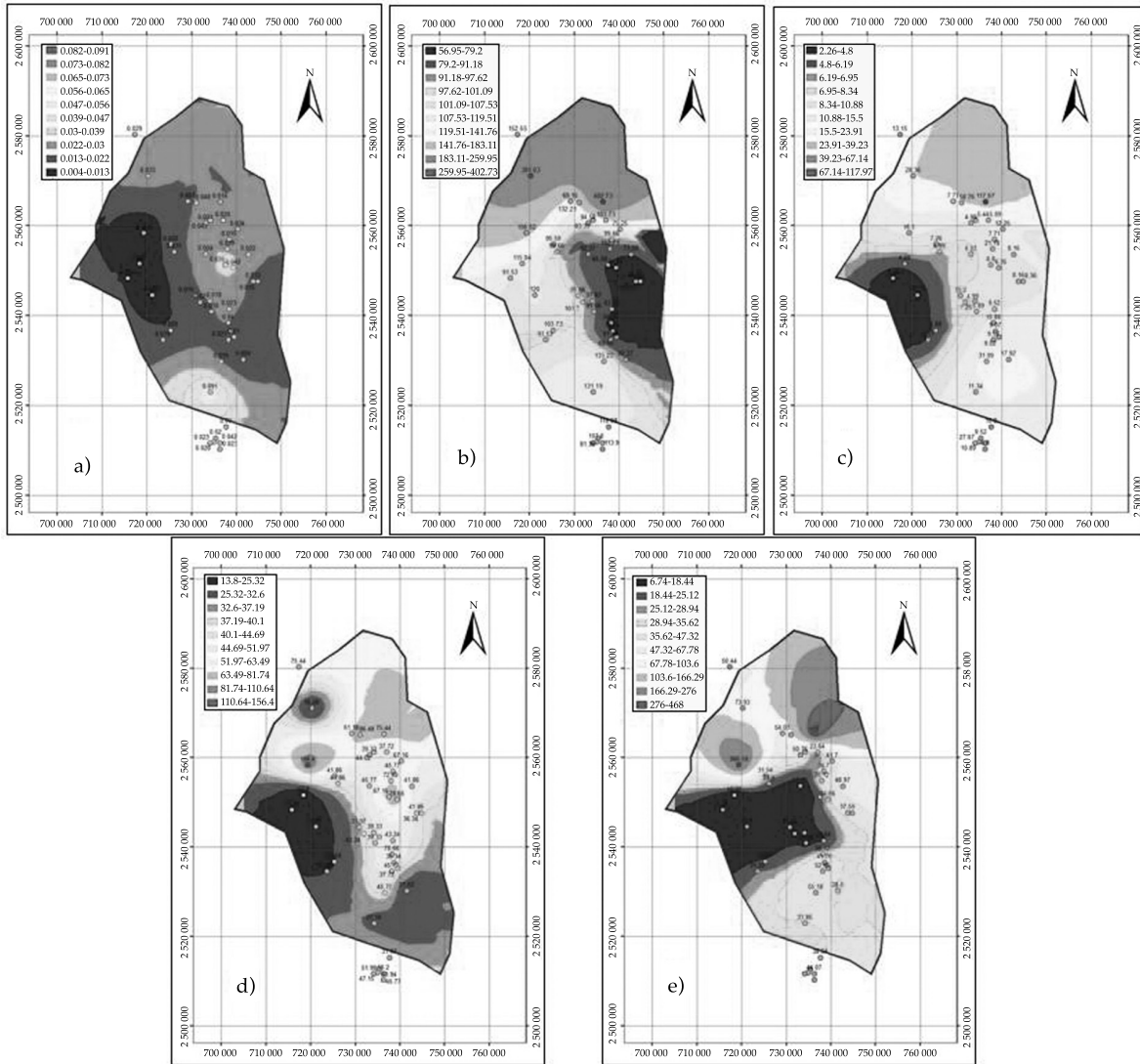


Figura 3. Estimación espacial mediante kriging ordinario de: a) arsénico, b) calcio, c) cloruro, d) sodio, y e) sulfato en el acuífero Calera.

Conclusiones

En general, se tiene una calidad buena del agua subterránea en cuanto a arsénico y a los iones mayoritarios analizados se refiere. Se debe prestar especial atención en los valores por encima de los límites permisibles; en el caso del arsénico, cerca de la ciudad de Zacatecas, y para el sulfato, en un pozo ubicado al noreste del acuífero. Las tendencias muestran que las concentraciones para los diferentes

parámetros aumentan preferentemente partiendo del sur, suroeste y este hacia la parte norte, lo cual es consistente con el movimiento del flujo propuesto en el modelo conceptual del acuífero.

En un trabajo posterior se presentará el diseño de una red de monitoreo de calidad del agua para el acuífero Calera mediante la metodología propuesta por Júdez (2005), en la que se emplean los modelos de semivariograma obtenidos.

Recibido: 16/08/10
Aceptado: 16/07/12

Referencias

- AHMADI, S.H. and SEDGHAMIZ, A. Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol. 138, 2008, pp. 357-368.
- AHMADI, S.H. and SEDGHAMIZ, A. Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level. *Monitoring and Assessment*. Vol. 129, 2007, pp. 277-294.
- BETSCO CONSULTORÍA. *Actualización Piezométrica del Acuífero Calera, Zacatecas*. Zacatecas, México: Subgerencia de Ingeniería, Gerencia Estatal Zacatecas, Comisión Nacional del Agua, México, D.F., 2004, 57 pp.
- CONAGUA. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, Acuífero (3225) Calera*. Comisión Nacional del Agua. *Diario Oficial de la Federación*. Agosto de 2009.
- DELHOMME, J.P. Kriging in the hydrosciences. *Advances in Water Resources*. Vol. 1, No. 5, 1978, pp. 251-266.
- JÚNEZ, H.E. *Diseño de una red de monitoreo de la calidad del agua para el acuífero Irapuato-Valle, Guanajuato*. Tesis de Maestría. México, D.F.: UNAM, 2005.
- KEMAL, S.G. and GUNAY, I. Spatial analyses of groundwater levels using universal kriging. *Journal of Earth System Science*. Vol. 116, No. 1, 2007, pp. 49-55.
- MENDOZA-CÁZAREZ, E.Y. y HERRERA-ZAMARRÓN, G. Estimación multivariada espacio-tiempo de la carga hidráulica en el valle de Querétaro-Obrajuelo. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXII, núm. 1, enero-marzo de 2007, pp. 63-80.
- TA'ANY, R.A. and TAHBOUB, A.B. Geostatistical analysis of spatiotemporal variability of groundwater level fluctuations in Amman-Zarqa basin, Jordan: a case study. *Environmental Geology*. Vol. 57, 2009, pp. 525-535.
- VARELA, M. *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas*. Madrid: Servicio Geológico, Dirección General de Obras Hidráulicas, 1993.
- WEBSTER, R. and OLIVER, M. *Geostatistics for environmental scientists*. Second Edition. West Sussex, United Kingdom: Wiley, Chichester, 2007.

Abstract

JÚNEZ-FERREIRA, H.E., BAUTISTA-CAPETILLO, C.F. & GONZÁLEZ-TRINIDAD, J. *Spatial geostatistical analysis of four major ions and arsenic in the Calera Aquifer, Zacatecas. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 1, January-March, 2013, pp. 179-185.*

Knowing the spatial distribution and temporal evolution of the quantity and quality of groundwater is essential to aquifer management. This paper presents the results of a geostatistical spatial analysis carried out with four major ions (calcium, chloride, sodium and sulfate) and arsenic (chosen for its highly toxic effect), which are considered indicators of water quality in the Calera aquifer in Zacatecas, Mexico. The spatial configurations obtained complement the existing conceptual model of the functioning of water in the aquifer. It was observed that, in general, groundwater in the area is of good quality according to the values established by the NOM-127-SSA1-1994.

Keywords: *geostatistics, semivariogram, major ions, arsenic, water quality, aquifer, Calera, Zacatecas.*

Dirección institucional de los autores

*Dr. Hugo E. Júnez-Ferreira
Dr. Carlos F. Bautista-Capetillo
Dr. Julián González-Trinidad*

Maestría en Ingeniería Aplicada
Universidad Autónoma de Zacatecas
Av. Ramón López Velarde núm. 801
Carretera a la Bufa
98010 Zacatecas, México
Teléfono: +52 (492) 9239 407, extensión 1617
hejunez@hotmail.com
baucap@uaz.edu.mx
jgonza@uaz.edu.mx