

VALIDACIÓN DE CUATRO MODELOS DE INTERPOLACIÓN PARA CARTOGRAFIAR NITRATO Y AMONIO EN SUELO

Validation of Four Interpolation Model for Mapping Nitrate and Ammonium in Soil

Manuel Fortis-Hernández^{1‡}, Alexis Huerta-García², Miguel Ángel Segura-Castruita^{1†},
José Luis García-Hernández², Juan A. Leos-Rodríguez³, Alberto García-Salazar⁴ y
Ricardo Valdez-Cepeda⁴.

RESUMEN

La validación estadística de cuatro modelos de interpolación en un suelo de la Región Lagunera, se llevó a cabo. Los objetivos de la investigación fueron establecer el modelo de mayor ajuste a la distribución de las concentraciones de amonio y nitratos obtenidos en muestras de suelo con incorporaciones de estiércol bovino y elaborar el mapa de distribución espacial basados en éste. Cuarenta y ocho puntos de una parcela se georeferenciaron para el datum NAD 27, con el sistema de coordenadas geográficas. En cada punto se obtuvieron muestras de suelo (de 0 a 15 y de 15 a 30 cm de profundidad) y se analizaron en laboratorio para determinar la concentración de amonio y nitratos al final de un ciclo de cultivo. Se utilizaron cuatro métodos geoestadísticos para realizar interpolaciones: ponderación inversa de la distancia (IDW), función de base radial (RBF), interpolación del polinomio global (GPI) y método kriging (K). La mitad del total de muestras de suelo (M1) se utilizó para realizar las interpolaciones de prueba y el resto (M2) se excluyó, para emplearse en el proceso de validación. Las pruebas estadísticas revelaron que el método de interpolación de IDW tuvo menor variabilidad, mientras que el submétodo Línea Completamente Regularizada, del interpolador RBF, fue el mejor. La variación en las concentraciones de amonio y nitrato para cada mapa temático indicó que la distribución fue

puntual, debido a la forma de aplicar las enmiendas orgánicas o de fertilizantes.

Palabras clave: *geoestadística, cartografía, contaminación.*

SUMMARY

Statistical validation of four models of interpolation in a soil from Lagunera Region was conducted. The objective of this research was to establish the model that better fit the distribution of ammonium and nitrate content in samples of soil fertilized with manure and, based on this, to develop a spatial distribution map. Forty-eight points in a plot were georeferenced to obtain the datum NAD 27 with the system of geographical coordinates. Ammonium and nitrate concentrations were obtained from each point of soil samples (from 0-15 and 15-30 cm depth) at the end of growing season to determine ammonium and nitrate contents. Four geostatistical interpolation methods were used: inverse distance weighting (IDW), radial basis function (RBF), global polynomial interpolation (GPI) and kriging (K). Half of the soil samples (M1) were used to test interpolations and the rest (M2) were excluded for use in the validation process. The statistical test revealed that the IDW interpolation method had less variability, while the Regularized Completely Linear submethod, from the RBF interpolation, was the best. The variation in concentrations of ammonium and nitrate for each thematic map indicated that distribution was punctual due to the way of applying organic amendments or fertilizers.

Index words: *geostatistics, mapping, pollution.*

INTRODUCCIÓN

Los suelos agrícolas de países en vías de desarrollo se están contaminando por el uso intensivo

¹ Instituto Tecnológico de Torreón, km 7.5 carretera Torreón-San Pedro, ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México.

[‡] Autor responsable (fortismanuel@hotmail.com)

[†] Autor para correspondencia (dmilys@hotmail.com)

² Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. 35110 ejido Venecia, Gómez Palacio, Durango, México.

³ Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

⁴ Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

de agroquímicos y el empleo de aguas residuales para riego. Este problema es mayor en zonas agrícolas de producción intensiva y en lugares cercanos a zonas urbanas, lo que se refleja en la concentración de nitritos en aguas subterráneas (Neeteson y Carton, 2001; Galaviz-Villa *et al.*, 2010). La Región Lagunera, área agrícola y ganadera en el norte de México, no escapa a estos problemas (Fortis *et al.*, 2009). En esta región se produce cerca de un millón de toneladas de estiércol de bovino al año, el cual se aplica en forma directa sin tratamiento previo a los suelos agrícolas (López *et al.*, 2001 y Fortis *et al.*, 2009). La mineralización del estiércol genera diferentes compuestos nitrogenados, como nitrato y amonio, entre otros. No obstante, el nitrato es el contaminante inorgánico comúnmente identificado en aguas subterráneas (Kunjikutty *et al.*, 2007); las concentraciones peligrosas para el ser humano son las mayores de 50 mg L⁻¹ (FAO-WHA, 2002). También se puede encontrar amonio, amoniaco, nitrito, óxido nítrico y nitrógeno orgánico (Pacheco *et al.*, 2002). Uno de los problemas fundamentales en el manejo de los suelos, cuando no se trata de la agricultura de precisión, es el escaso conocimiento de la distribución espacial de nitratos y amonio en un suelo dentro de las parcelas cultivadas. Los sistemas de información geográfica (SIG) son una alternativa para solucionar este problema (Corner *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2007). Los SIG se definen como la estadística relacionada con los datos geográficos, de ahí que se relacionen con la estadística espacial o la geoestadística (Morales-García, 2004). Su principal fundamento tiene como base que las variables físicas y biológicas en la naturaleza, generalmente, muestran heterogeneidad espacial. Sin embargo, se pueden encontrar patrones de distribución, ya que existe continuidad espacial entre las diferentes localizaciones de las variables físicas y biológicas a estudiar (Taylor, 1984). Las metodologías de los SIG se basan en el uso de métodos de interpolación para este fin, por lo que estas se definen como un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable distribuida en el espacio o en el tiempo de forma continua (Johnston *et al.*, 2001); no obstante, la precisión de estos modelos geoestadísticos varía por la naturaleza del área de estudio (Pawlowsky y Olea, 2004). Por lo anterior, es probable que al utilizar la herramienta de la geoestadística, a través de los SIG, se puedan elaborar mapas de distribución espacial de nitratos y amonio a nivel parcelario, los cuales se utilizarían para identificar áreas con mayores

concentraciones de estos iones y emplearse para proponer estrategias de manejo, conservación y ahorro de insumos agrícolas. Por esta razón, los objetivos de este trabajo fueron evaluar cuatro modelos geoestadísticos de interpolación para determinar el que presente el mayor ajuste a datos reales obtenidos en campo y elaborar el mapa de distribución espacial de nitratos y amonio con base en éste.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El trabajo se realizó en una parcela del ejido “Fresno del Norte”, en el km 30 de la carretera Torreón-San Pedro, Coahuila, ubicado entre los 25° 44' y 25° 48' N y 103° 18' y 103° 17' O (Figura 1). El clima es desértico (BW), de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado, con un promedio anual de precipitación de 230 mm y una evaporación que es de 6 a 11 veces mayor que la precipitación anual y una temperatura media anual de 20.7 °C (García, 1981).

Toma de Muestras

Una malla de forma rectangular se sobrepuso en la parcela de estudio. Las dimensiones de cada rectángulo fueron de 3 × 6 m. Muestras de 2 kg de suelo se colectaron a dos profundidades (15 y 30 cm), en el centro de cada rectángulo. Los puntos de muestreo se georreferenciaron con un GPS, marca Garmin GPS60®, para el datum NAD 27 y con un sistema de coordenadas geográficas. Un total de 48 muestras de suelo se obtuvieron para cada profundidad. A cada muestra se le determinó la concentración de nitrato y amonio, de acuerdo con la Norma Oficial para Análisis de Suelo con enfoque de Fertilidad (NOM-021-RECNAT-2000). Del total de las muestras, el 50% se utilizó para realizar las interpolaciones (M1), mientras que, el resto (M2) se utilizó para el proceso de validación (ESRI, 2006).

Métodos de Interpolación

Se elaboró una capa de información vectorial con un tema de puntos por medio del programa ArcGis 9.2® (Gorr y Kurland, 2005), ligada a la base de datos de las variables de nitrito y amonio en sus dos profundidades. Las interpolaciones se realizaron por medio de la extensión geostatistical analyst; del programa

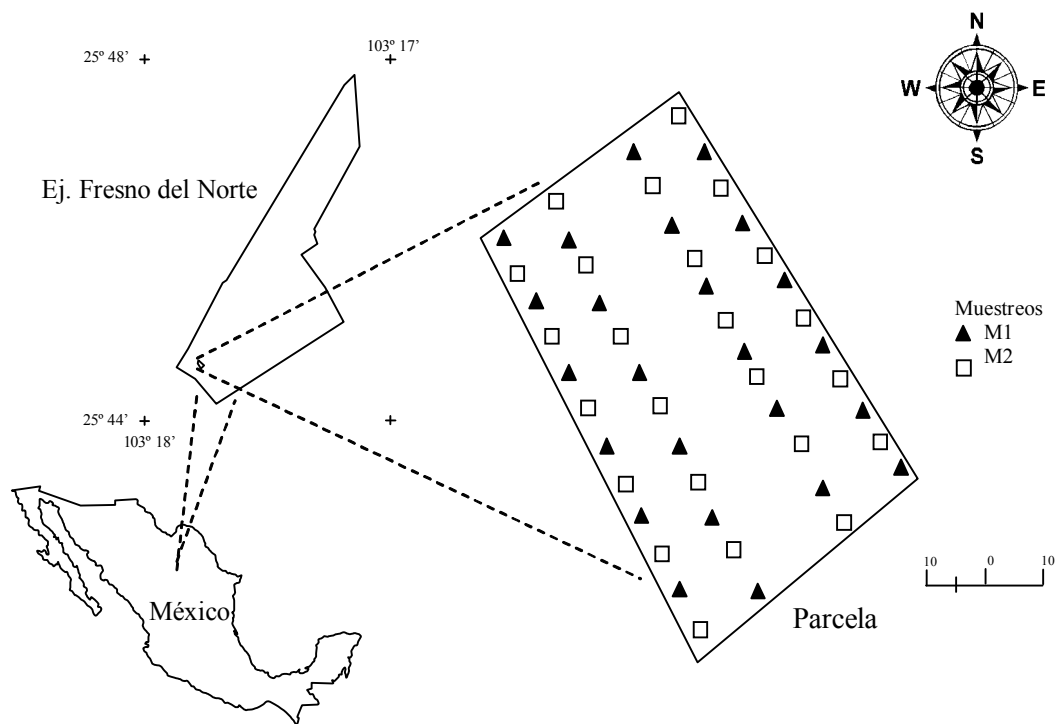


Figura 1. Ubicación geográfica de la parcela experimental del ejido Fresno del Norte, Coahuila.

ArcGis 9.2®. Los métodos geoestadísticos de interpolación utilizados fueron “ponderación inversa de la distancia (IDW)”, “interpolación del polinomio global (GPI)”, “función de base radial (RBF)” y “método kriging (K)”. Éstos se emplearon porque tienen como parámetro común la vecindad de datos, necesaria para realizar búsquedas espaciales (ESRI, 2006). Por esta razón, cada método geoestadístico derivó en grupos cuyas características provienen de la cantidad mínima y máxima de vecinos cercanos. A partir de cada grupo se tuvieron cuatro submétodos (Figura 2) que correspondieron al poder de búsqueda de los interpoladores IDW y GPI, o bien, al método utilizado por el interpolador RBF y K (Pawlowsky y Olea, 2004; Villatoro *et al.*, 2008).

Proceso de Validación

Una vez realizadas las interpolaciones a partir de M1, para los diferentes submétodos, los datos se agruparon en capas de información que permitieron su fácil acceso y manipulación. Para tener acceso a los datos de las diferentes capas de información, cada una se analizó con el método “Jackknife”, a través de la técnica intersect de la extensión “Hawth’s Analysis

Tool” del programa ArcGis 9.2®. Lo anterior se realizó considerando la ubicación de las muestras M2. Por otra parte, se creó una base de datos geográfica con la información excluida de M2 y los datos reales de las interpolaciones que se generaron a partir de M1 para cada una de las variables analizadas.

La validación se realizó comparando la variabilidad entre M2 y las interpolaciones generadas a partir de M1, determinadas por medio de los diferentes métodos, grupos y submétodos empleados. La confiabilidad de los resultados se estableció al realizar un análisis de varianza; por otra parte, una prueba Student-Newman-Keuls se llevó a cabo para determinar el mejor método, grupo y submétodo, con el programa estadístico SAS (SAS, 1998). Una vez validado el mejor submétodo, se procedió a realizar las interpolaciones correspondientes para las variables nitratos y amonios, utilizando el total de las muestras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La concentración de amonio, nitrato y sus coordenadas, en las dos profundidades del suelo en la parcela de estudio, se muestran en el Cuadro 1.

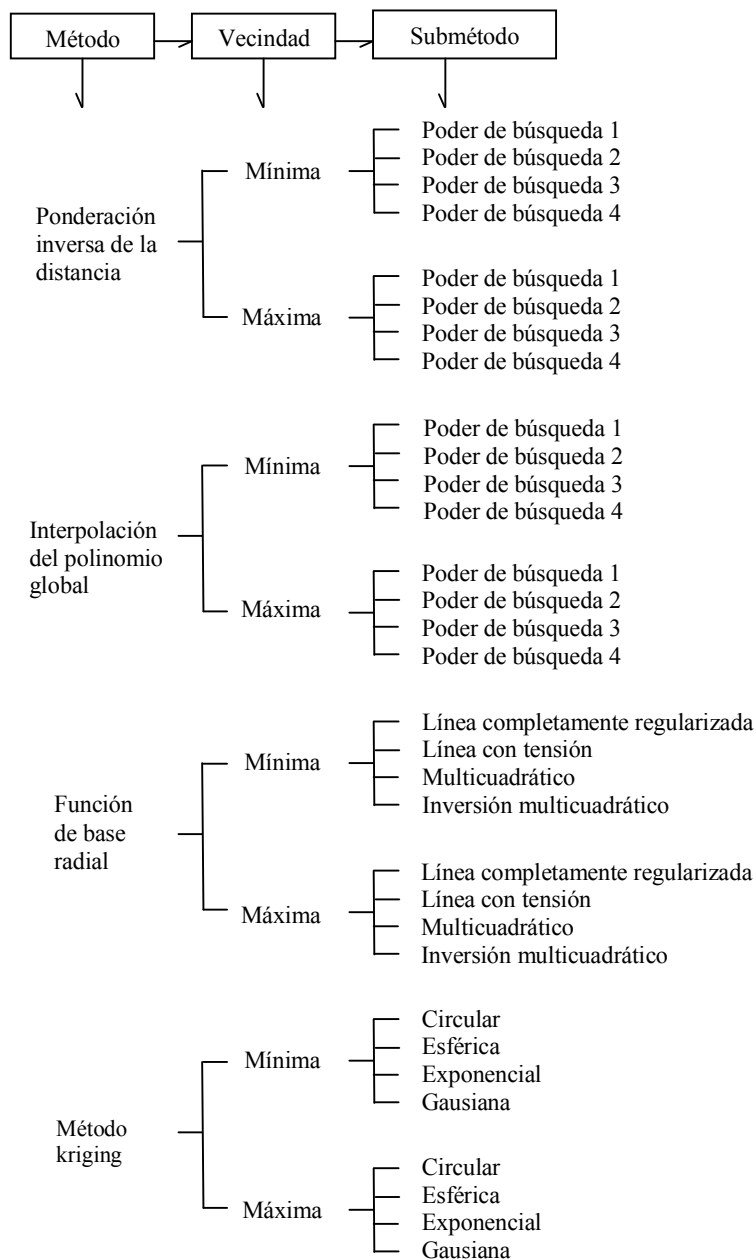


Figura 2. Esquema metodológico empleado.

Las concentraciones de amonio variaron de 1.05 a 13.22 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$, en los primeros 15 cm, mientras que a 30 cm de profundidad ésta fluctuó de 1.05 a 16.67. La concentración de nitrato en el suelo de los primeros 15 cm varió de 4.78 a 34.24 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ y de 3.35 a 42.93 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$, a 30 cm de profundidad. La concentración y distribución espacial de nitratos y amonio obedece a diferentes factores mineralógicos y microbiológicos del suelo, los cuales influyen directamente en la mineralización e inmovilización

de estos iones y, por ende, en su distribución vertical y horizontal (Sumner, 2000).

Después de correr los modelos con los datos de laboratorio de las muestras M1, se obtuvieron ocho mapas temáticos de distribución de nitrato y amonio. En la Figura 3 se muestran cuatro mapas elaborados con los diferentes interpoladores, de la concentración de amonio (0 a 15 cm de profundidad). En este caso, todos los mapas son distintos, debido a la forma como estadísticamente agrupan los datos cada uno

Cuadro 1. Concentraciones de amonio y nitrato del suelo a 15 y 30 cm de profundidad.

| Muestra | Coordenadas | | Amonio 15 | Amonio 30 | Nitrato 15 | Nitrato 30 |
|---------|-------------|-----------|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | ° Norte | ° Oeste | | | | |
| | | | ----- cmol(+) kg ⁻¹ ----- | | | |
| 1 | 25.74759 | 103.29614 | 3.87 | 4.65 | 20.62 | 10.08 |
| 2 | 25.74754 | 103.29612 | 3.13 | 4.15 | 22.42 | 9.08 |
| 3 | 25.74735 | 103.29601 | 1.83 | 2.55 | 17.23 | 16.85 |
| 4 | 25.74745 | 103.29606 | 4.19 | 5.96 | 14.93 | 11.91 |
| 5 | 25.74750 | 103.29609 | 3.84 | 3.07 | 27.84 | 13.83 |
| 6 | 25.74740 | 103.29604 | No disponible | 4.80 | No disponible | 15.48 |
| 7 | 25.74705 | 103.29584 | 7.45 | 2.26 | 16.45 | 9.03 |
| 8 | 25.74730 | 103.29598 | 5.14 | 3.13 | 13.62 | 10.17 |
| 9 | 25.74724 | 103.29595 | No disponible | 1.05 | No disponible | 6.71 |
| 10 | 25.74710 | 103.29587 | 3.30 | 2.58 | 14.45 | 7.21 |
| 11 | 25.74720 | 103.29593 | 4.89 | 4.84 | 34.24 | 17.28 |
| 12 | 25.74715 | 103.29590 | 10.29 | No disponible | 23.66 | No disponible |
| 13 | 25.74771 | 103.29594 | 5.19 | 5.88 | 6.75 | 5.88 |
| 14 | 25.74747 | 103.29580 | 5.42 | 4.71 | 9.03 | 20.08 |
| 15 | 25.74756 | 103.29585 | 2.83 | 5.31 | 9.26 | 7.15 |
| 16 | 25.74752 | 103.29583 | 1.45 | 5.11 | 10.80 | 6.54 |
| 17 | 25.74761 | 103.29588 | 6.20 | 5.24 | 8.78 | 42.93 |
| 18 | 25.74766 | 103.29591 | 6.66 | 4.34 | 11.02 | 7.65 |
| 19 | 25.74719 | 103.29562 | 3.57 | 5.86 | 7.78 | 10.25 |
| 20 | 25.74724 | 103.29565 | 2.74 | 5.77 | 5.68 | 9.06 |
| 21 | 25.74730 | 103.29568 | 3.32 | 8.75 | 4.78 | 8.55 |
| 22 | 25.74735 | 103.29572 | 5.91 | 5.44 | 9.72 | 3.35 |
| 23 | 25.74743 | 103.29577 | 2.72 | 5.42 | 13.20 | 32.34 |
| 24 | 25.74739 | 103.29575 | 4.78 | 4.24 | 11.42 | 7.88 |
| 25 | 25.74740 | 103.29593 | 2.32 | 3.12 | 24.28 | 9.14 |
| 26 | 25.74745 | 103.29596 | 7.10 | 8.87 | 14.47 | 14.09 |
| 27 | 25.74750 | 103.29599 | 1.56 | 4.38 | 11.93 | 12.89 |
| 28 | 25.74764 | 103.29606 | 2.54 | 16.67 | 17.00 | 24.74 |
| 29 | 25.74759 | 103.29604 | 5.45 | 4.15 | 53.77 | 12.20 |
| 30 | 25.74755 | 103.29601 | 2.09 | 5.91 | 37.66 | 18.24 |
| 31 | 25.74730 | 103.29587 | 6.95 | 8.56 | 22.90 | 12.71 |
| 32 | 25.74736 | 103.29590 | 7.79 | 1.78 | 16.31 | 6.86 |
| 33 | 25.74725 | 103.29584 | 3.85 | 3.68 | 19.50 | 10.24 |
| 34 | 25.74710 | 103.29575 | 13.22 | 4.14 | 11.41 | 13.19 |
| 35 | 25.74715 | 103.29579 | 3.15 | 3.39 | 58.49 | 15.65 |
| 36 | 25.74720 | 103.29582 | 6.69 | 6.69 | 20.84 | 28.71 |
| 37 | 25.74776 | 103.29587 | 5.09 | 8.62 | 9.78 | 8.42 |
| 38 | 25.74757 | 103.29573 | 7.32 | 5.64 | 21.54 | 11.28 |
| 39 | 25.74771 | 103.29583 | 4.62 | 5.89 | 10.28 | 7.77 |
| 40 | 25.74766 | 103.29580 | 2.85 | 5.40 | 11.00 | 3.33 |
| 41 | 25.74761 | 103.29577 | 1.05 | 10.74 | 26.45 | 6.89 |
| 42 | 25.74753 | 103.29571 | 4.67 | 7.52 | 15.71 | 7.11 |
| 43 | 25.74727 | 103.29553 | 3.10 | 6.44 | 9.10 | 4.43 |
| 44 | 25.74740 | 103.29563 | 5.17 | 6.64 | 10.14 | 12.66 |
| 45 | 25.74748 | 103.29568 | 3.18 | 4.08 | 15.71 | 7.76 |
| 46 | 25.74735 | 103.29559 | 3.10 | 5.70 | 11.79 | 17.50 |
| 47 | 25.74731 | 103.29556 | 4.39 | 7.54 | 14.84 | 10.60 |
| 48 | 25.74744 | 103.29565 | 2.48 | 5.77 | 9.72 | 7.09 |

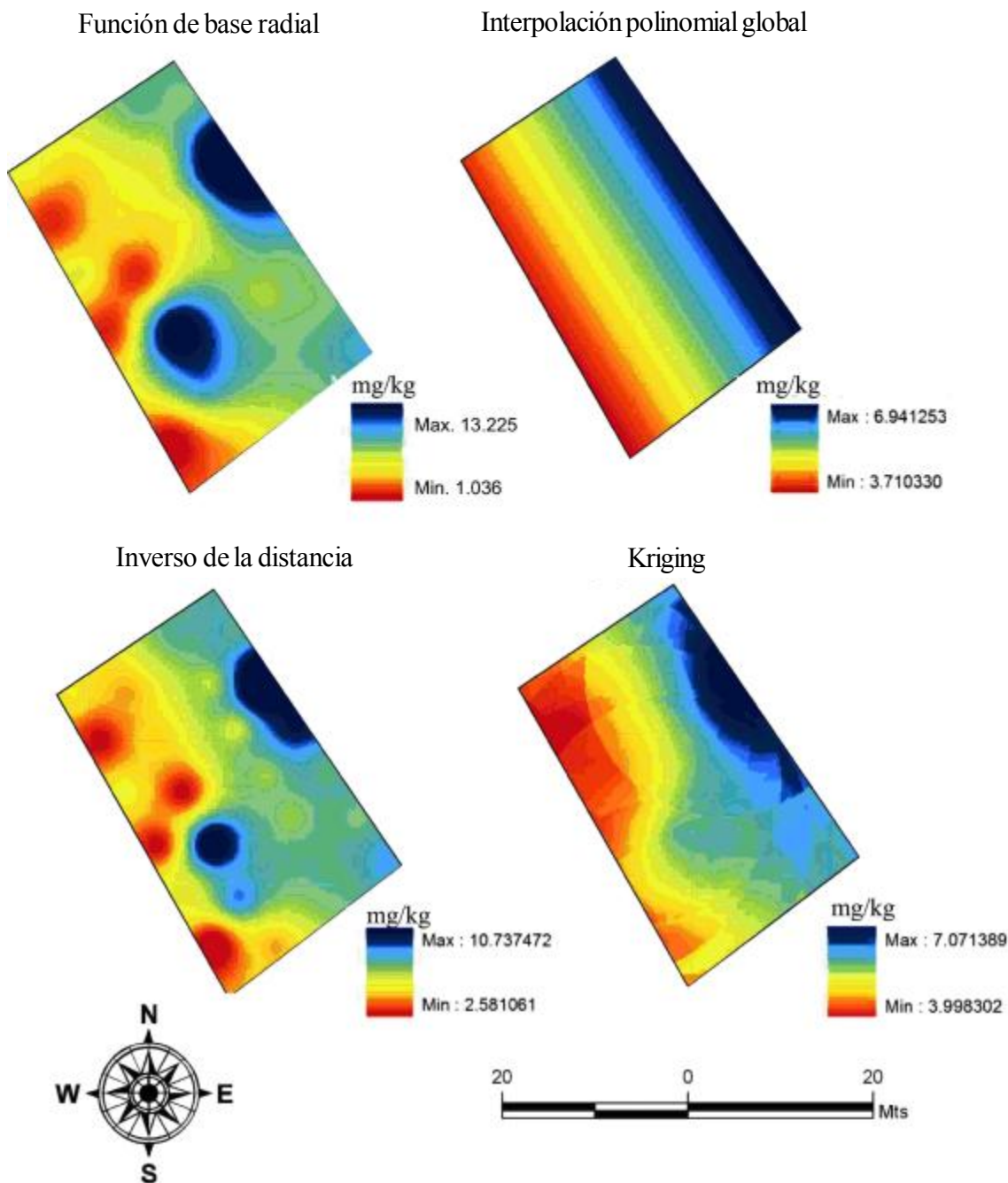


Figura 3. Mapas temáticos de distribución de amonio en la parcela de Fresno del Norte, con cuatro métodos de interpolación.

de los interpoladores, lo cual provoca una diferencia en la probable distribución de los resultados (Ward, 2008; Villatoro *et al.*, 2008; Govindarajan y Chandrasekaran, 2009).

El análisis de los diferentes modelos de interpolación empleados en esta investigación muestra que el IDW es el más significativo (Cuadro 2), mientras que el GPI tuvo una menor significancia. Sin embargo, el considerar

que el IDW asume que las predicciones son una combinación lineal de los datos (Schloeder *et al.*, 2001), tiende a producir patrones poco reales, conocidos como tipo “ojo de buey”, alrededor de los puntos muestreados (Gotway, 1996) y la precisión de las estimaciones es influenciada por la varianza aleatoria, la estructura de variación y la intensidad de muestreo (Lozano *et al.*, 2004), se puede asumir que se requiere un análisis

Cuadro 2. Prueba de significancia para los métodos de interpolación.

| Método | n † | Media |
|-------------------------------------|-----|---------|
| Interpolador del polinomio global | 96 | 15.11 |
| Método kriging | 96 | 4.59 * |
| Función de base radial | 96 | 4.12 * |
| Ponderación inversa de la distancia | 96 | 4.01 ** |

† n = número de muestras; * significativo $\alpha = 0.05$; ** altamente significativo $\alpha = 0.001$.

estadístico a nivel de submétodo, con el fin de verificar la validez de los resultados de la primera interpolación.

El submétodo línea completamente regularizada, en el grupo máxima, del modelador RBF, resultó más significativo (3.81, $\alpha = 0.001$) después de la prueba de Student-Newman-Keuls (Cuadro 3). Este resultado se debe a las características que tienen los interpoladores. El RBF es útil en la interpolación de datos dispersos, debido a que el sistema asociado de ecuaciones lineales resulta invertible, incluso si la distribución de los puntos no presenta regularidad (Echeverri *et al.*, 2004); en cambio, el GPI supone que toda tendencia de los datos puede describirse por un polinomio de orden inferior (Davis, 2002), mientras que el IDW y el K requieren que los puntos sean cercanos al punto de estudio, para incrementar su eficiencia (Villatoro *et al.*, 2008).

Cuadro 3. Prueba de significancia para los grupos de interpolación.

| Vecindad | n † | Media |
|----------|-----|--------|
| Mínima | 192 | 9.33 |
| Máxima | 192 | 4.58 * |

† n = número de muestras; * $\alpha = 0.001$.

Al realizar la prueba de significancia para los grupos de vecindad (mínima y máxima) se constató que la máxima vecindad resultó más significativa (Cuadro 3), lo que es consistente con el resultado que se encontró al realizar la prueba en los submétodos.

Los datos nuevamente se corrieron, pero con el interpolador RBF del submétodo línea completamente regularizada, el cual resultó más significativo. Los resultados fueron cuatro mapas temáticos: dos para amonio y dos para nitrato, en sus dos profundidades (Figura 4).

En la figura anterior se observa que existe un efecto residual de amonio y nitrato, donde la distribución no es homogénea, sino puntual. Ésta tiene relación con las enmiendas localizadas de materia orgánicas aplicadas un año antes. No obstante, los mapas de distribución de amonio y nitratos son diferentes. Lo anterior se puede deber a la diferente movilidad de los iones amonio

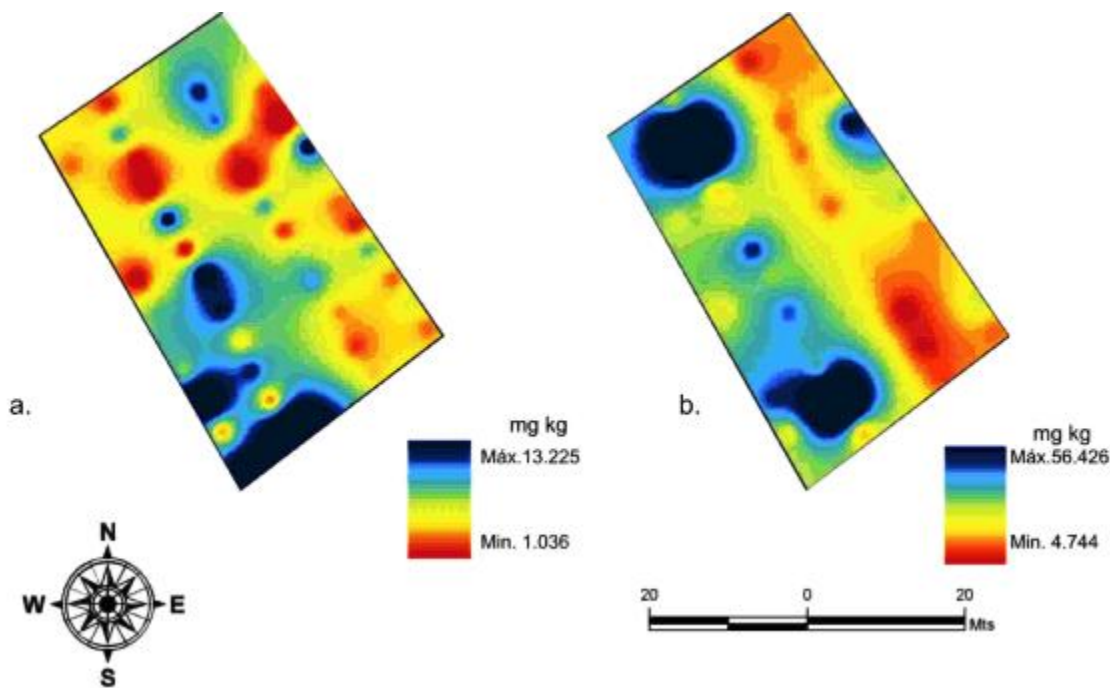


Figura 4. Distribución espacial de las concentraciones de a) amonio y b) nitrato en dos profundidades de 0 y 15 cm.

y nitrato (Johnson, 1992; Sumner, 2000). La concentración de nitrato oscila de 4.7 a 58.42 mg kg⁻¹ (0-15 cm de profundidad) y de 3.2 a 42.93 mg kg⁻¹ (15-30 cm de profundidad). En cambio, en el amonio, la concentración de 1 a 13.22 y de 1 a 16.88 mg kg⁻¹, en los 15 y 30 cm de profundidad, respectivamente. En este sentido, los análisis espaciales generados determinan mapas con áreas continuas que muestran la distribución de las concentraciones, así como su probabilidad de aparición (Johnston *et al.*, 2001). Sin embargo, para que estos resultados sean más efectivos se requeriría introducir en el modelo de interpolación más variables edáficas que permitieran establecer relaciones con los iones amonio y nitrato para obtener resultados en tiempo real.

CONCLUSIONES

El método geoestadístico de interpolación función de base radial, en su variante línea completamente regularizada, generó mapas de superficies continuas de amonio y nitrato en suelos. Este interpolador, estadísticamente superó a los métodos: interpolador del polinomio global, ponderación inversa de la distancia y krigin. Los métodos de interpolación son una aplicación práctica para establecer la distribución espacial de iones, como el nitrato y el amonio, que pueden contaminar suelos agrícolas por mal manejo. Los mapas que se obtienen a partir de métodos de interpolación pueden utilizarse como herramientas en el manejo de suelos agrícolas, para evitar la contaminación de los recursos naturales.

LITERATURA CITADA

- Chen, G. F., L. Y. Cao, G. W. Wang, B. C. Wan, D. Y. Liu, and S. S. Wang. 2007. Application of a spatial fuzzy clustering algorithm in precision fertilization. *N. Z. J. Agric. Res.* 50: 1249-1254.
- Corner, R. J., R. J. Hickey, and S. E. Cook. 2002. Knowledge based soil attribute mapping in GIS: The expector method. *Trans. GIS* 6: 383-402.
- Davis, J. C. 2002. *Statistical and data analysis in geology*. John Wiley. New York, NY, USA.
- Echeverri A., J. A., B. Manrique L., F. J. Moreno y A. Bravo. 2004. Mejoramiento de imágenes usando funciones de base radial. *Rev. Ing. Univ. Medellín* 15: 21-28.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2006. *ArcGis 9.2, Geoestadistical analyst tutorial*. New York, NY, USA.
- FAO/WHO (Food and Agriculture Organization/World Health Organization). 2002. *FAO procedural guidelines for the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives*, Roma. [Online]. Disponible en: http://ftp.fao.org/es/esn/jecfa/2002-09-24_Vet_Drugs_Proc_Guidelinesb.pdf. (Consulta: julio 15, 2010).
- Fortis H., M., J. A. Leos R., I. Orona C., J. L. García-Hernández., E. Salazar S., P. Preciado R., J. A. Orozco V. y M. A. Segura C. 2009. Uso de estiércol en la Comarca Lagunera. pp. 104-127. *In: I. Orona C., E. Salazar S., M. Fortis H., H. I. Trejo E. y C. Vázquez V. (eds.). Agricultura Orgánica*, FAZ-UJED. Gómez Palacio, Durango, México.
- Galaviz- Villa, I., C. Landeros-Sánchez, M. R. Castañeda-Chávez, J. P. Martínez-Dávila, A. Pérez-Vázquez, I. Nikolskii-Gavrilov and F. Lango-Reynoso. 2010. Agricultural contamination of subterranean water with nitrates and nitrites: An environmental and public health problem. *J. Agric. Sci.* 2: 17-30.
- García, E. 1981. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Gorr, L. W. and K. S. Kurland. 2005. *GIS tutorial: workbook for ArcView 9*. ESRI Press. Redland, CA, USA.
- Gotway, C. A., R. B. Fergus, G. W. Hergert, and T. A. Peterson. 1996. Comparison of kriging and inverse distance methods for mapping soil parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1237-1247.
- Govindarajan, M. and M. Chandrasekaran. 2009. Performance optimization of data mining application using radial basis function classifier. *World Aca. Sci. Eng. Tech.* 38: 561-566.
- Groffman, P. M. 2000. Nitrogen in environment. pp. C190- C200. *In: M. E. Sumner (ed.). Handbook of soil science*. CRC-Press. Boca Raton, FL, USA.
- Johnson, D. W. 1992. Nitrogen retention in forest soils. *J. Environ. Qual.* 21: 1-12.
- Johnston, K., J. M. VerHoef, K. Kriyorchko, and N. Lucas. 2001. *Using ArcGis Geostatistical Analyst*. Redlands, CA, USA.
- Kunjikutty, S. P., S. O. Prasher, R. M. Patel, S. F. Barrington, and S. H. Kim. 2007. Simulation of nitrogen transport in soil under municipal wastewater application using leach. *J. Am. Water Res. Assoc.* 43: 1097-1107.
- López-Martínez, J. D., A. Díaz-Estrada, E. Martínez-Rubin y R. D. Valdez-Cepeda. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento de maíz. *Terra* 19: 293-299.
- Lozano, Z., C. Bravo, F. Ovalles, R. M. Hernández, B. Moreno, L. Pinangol y J. G. Villanueva. 2004. Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro* 16: 1-17.
- Moral-García, F. J. 2004. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas* 13: 78-86.
- Neeteson, J. J. and O. T. Carton. 2001. The environmental impact of nitrogen in field vegetable production. *Acta Hort.* 563: 21-28.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 200. *NOM-021-SEMARNAT. 2000. Norma oficial NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis*. Diario Oficial de la Federación. México, D. F.

- Pacheco, J., R. Pat C. y A. Cabrera S. 2002. Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación del agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería* 6: 73-81.
- Pawlowsky G, V. and R. A. Olea. 2004. Geostatistical analysis of compositional data. International Association for Mathematical Geology. Oxford University Press. Oxford, England.
- SAS (Statistical Analysis System). 1998. SAS for Windows. Release 6-12, version 4.0.1111. Cary, NC, USA.
- Schloeder, C. A., N. E. Zimmerman, and M. I. Jacobs. 2001. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 470-479.
- Sumner, M. E. 2000. Handbook of soil science. CRC-Press. Boca Raton, FL, USA.
- Taylor, L. R. 1984. Assessing and interpreting the spatial distributions of insect populations. *Annu. Rev. Entomol.* 29: 321-357.
- Villatoro, M., C. Henríquez y F. Sancho. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial del pH, Ca, CICE, y P del suelo. *Agronomía Costarricense* 32: 95-105.
- Ward, C.O. 2008. Better global polynomial approximation for image rectification. *Int. J. Modelling Simulation* 28: 299-308.