

ANÁLISIS ESPACIAL DE LA SALINIDAD DEL ACUÍFERO EN LA PLANICIE ALUVIAL DEL RÍO MOTATÁN- TRUJILLO

Igle Umbría N.¹; Luis Mora M.²; Hervé Jégat³; Ricardo Trezza P.⁴; Jesús E. Mejías.⁵; Luis Araujo F.⁶ y Nelson Rodríguez B.⁷

Universidad de Los Andes, NURR-Trujillo, CIDIAT-Mérida, Venezuela

Resumen

El objetivo del presente trabajo es analizar espacialmente el parámetro salinidad en la planicie aluvial del río Motatán, en el estado Trujillo. El área tiene una extensión aproximada de 705.360 Km² emplazadas en una región potencialmente agrícola. El estudio proporciona una estimación de la variación espacial de salinidad en el acuífero durante el período 1994-1999. Para la obtención de los datos básicos se recopiló, procesó y analizó toda la información de campo levantada en la red de muestreo existente, por el Sistema Hidráulico Trujillano, para ello se contó con los datos de conductividad eléctrica, niveles piezométricos, cotas de pozos, coordenadas UTMX y UTM Y de cada uno de los pozos, información de cultivos entre otros y se aplicaron conceptos, técnicas y métodos geoestadísticos. A partir del muestreo de 101 pozos ubicados en el área de estudio, se aplicó el krigeado para la conductividad eléctrica, y en el análisis se observó que esta presenta un ligero incremento hacia el oeste de la planicie. Finalmente, se recomienda densificar la red de muestreo para así obtener información del comportamiento de la variable en estudio en toda la superficie de la planicie aluvial.

Palabras Claves: Salinidad, Acuíferos, Planicie Aluvial, Niveles Piezométricos, Métodos Geoestadísticos, Conductividad Eléctrica.

SPACE ANALYSIS OF SALINITY OF AQUIFER IN THE ALLUVIAL PLAIN OF MOTATAN RIVER, TRUJILLO

Abstract

The aim of this work is to analyse the spatiality of parameters of salinity in the alluvial plain of the Motatan river, Trujillo, Venezuela. The study area has an approximate surface of 705.360 km², with a high potential for agriculture. The Sistema Hidraulico Trujillano provided basic information regarding crops, soils, electric conductivity, piezometric levels, as well as geographic co-ordinates and elevation, correspondingly to the period 1994-1999. The krigging methodology and geostatistics methods were applied to monitoring the variation of the electric conductivity, both in time and space, using information generated from 101 observation wells. The results obtained showed that the electric conductivity had a slight

¹Docente Investigador del Departamento de Ingeniería del NURR-ULA. Trujillo, Venezuela. E-mail: igleumbria@cantv.net

²Docente Investigador del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT-ULA. Mérida, Venezuela. E-mail: lemm@cidiat.ing.ula.ve

³Docente Investigador del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT-ULA. Mérida, Venezuela. E-mail: jhegat@cidiat.ing.ula.ve

⁴Docente Investigador del Departamento de Ingeniería del NURR-ULA. Trujillo, Venezuela. E-mail: rtrezza@ula.ve

⁵Docente Investigador del Departamento de Ingeniería Agrícola del NURR-ULA. Trujillo, Venezuela.

⁶Ingeniero Agrícola NURR-ULA. Trujillo, Venezuela.

⁷Ingeniero Agrícola NURR-ULA. Trujillo, Venezuela

increment towards the west of the study area. Finally, It is recommended the use of a denser net of field observations, which would include existing wells that are not currently operating to improve the value of this and other works that would study the quality of the groundwater of this aquifer.

Keywords: Salinity, Aquifers, Alluvial Plains, Piezometric Levels, Geostatistics Methods, Electric Conductivity

Introducción

El agua es, junto con el aire que se respira, el patrimonio máspreciado de la humanidad. Esta pequeña molécula se ha infiltrado en todos los terrenos de nuestro universo. Por esto, si bien existe suficiente agua dulce en el planeta para mantener una población más numerosa que la actual, y a pesar de que se recicla constantemente debido a la evapotranspiración provocada por el sol, el agua escasea en muchos lugares del país y la zona baja en el estado Trujillo no es la excepción. El hombre, haciendo frente a este problema, ha buscado las más diversas soluciones; como ejemplo de esto se tiene la utilización del agua que se encuentra en los estratos más profundos del suelo (aguas subterráneas). Esta no es más que el agua meteórica que al llegar a la superficie de la tierra y que logra en parte infiltrarse en el suelo poroso, percolando lentamente entre los poros de las rocas, llega a un acumulador llamado "acuífero".

El crecimiento de la agricultura intensiva, la creciente urbanización y la modificación de las pautas de consumo y culturales en la zona baja en el estado Trujillo, especialmente en la planicie aluvial del río Motatán y su cercanía con el Lago de Maracaibo, han creado impactos sobre el ciclo del agua y especialmente sobre las aguas subterráneas. Estas poseen una mayor oportunidad de disolver materiales por las mayores superficies de contacto, lentas velocidades de circulación, mayores presiones y temperaturas a las que están sometidas. Por ello, sus concentraciones salinas son superiores a las de las aguas superficiales; en general, por esto dichas concentraciones se deben supervisar de manera constante (SHT. CGR, 1994).

Hoy en día todas las ciencias con las que el hombre trata de desarrollar, facilitar y mejorar su medio de vida, pero en especial las ciencias hídricas se basan en la obtención de una gran cantidad de información (datos), para que la implementación de estas técnicas posea validez científica.

Uno de los procedimientos más empleados en la actualidad es la presentación de información de manera cartográfica, ya que esta nos aporta una idea clara, precisa y rápida de la variación de uno o varios parámetros en estudio, con respecto al tiempo y al espacio. Hay que resaltar que en la interpretación de esta información, es conveniente tomar en cuenta que no sólo se debe poseer una cantidad de datos que proporcione resultados que sean coherentes con el fenómeno estudiado; si no que además, reflejen las condiciones reales en que se encuentra este.

También se presenta el problema en que la mayoría de los métodos utilizados de forma más frecuente para la presentación de información en forma cartográfica, no muestran la menor indicación acerca de la incertidumbre de los resultados. En este sentido es importante contar con la geostatística como instrumento de apoyo a este tipo de

investigaciones. La geoestadística proporciona conceptos, teorías y herramientas matemáticas que permiten aportar una solución a este tipo de problema, siempre basándose en una base conceptual sólida.

Considerando que las aguas extraídas en la planicie del Río Motatán son utilizadas con fines de riego, es importante conocer y estimar el grado de contaminación de estas aguas, ya que son un recurso frágil y que la mayoría de los sistemas acuíferos presentan una alta vulnerabilidad y su recuperación de los daños causados principalmente por la actividad del hombre es muy lenta. Por esto es conveniente realizar un control y estudio permanente de estos sistemas para así poder garantizar su conservación y permanencia en el tiempo.

Se pretende en el presente trabajo, mediante la utilización de conceptos geoestadísticos analizar el comportamiento de la salinidad con respecto al tiempo y al espacio en el acuífero ubicado en la planicie aluvial del río Motatán del estado Trujillo. El estudio se basa en la información sobre el parámetro conductividad eléctrica obtenida de la red de muestreo del Sistema Hidráulico Trujillano. Por otra parte, esta investigación persigue adicionalmente contribuir en la toma de decisiones para la gestión del mismo. También se busca mediante la implementación de esta metodología, evaluar los errores de estimación del parámetro conductividad eléctrica que puede tener la red de pozos existente.

Objetivos

General

Desarrollar una metodología que permita la Evaluación Espacial del Parámetro Salinidad de las Aguas Subterráneas del Acuífero Aluvial del Río Motatán en el Estado Trujillo.

Específicos

-Aplicar técnicas geoestadísticas que conduzcan a evaluar la distribución espacial de la salinidad de las aguas subterráneas del acuífero aluvial del Río Motatán en el Estado Trujillo.

-Cartografiar y analizar la distribución espacial de la salinidad de las aguas subterráneas del acuífero aluvial del Río Motatán del Estado Trujillo.

-Analizar la constitución de la red de muestreo de salinidad existente, con base a los objetivos que se desean alcanzar.

Métodos empleados para el análisis.

Recolección y procesamiento de la información básica existente.

La red hidrográfica del área de estudio está constituida por ríos que presentan un régimen de tipo permanente y otros de régimen intermitente o esporádico que se comportan torrencialmente en los períodos de máxima precipitación. Entre los principales cursos de agua de la zona destacan los ríos Motatán, Caús, Buena Vista y La Vichú y entre los cursos menores: Caños Carrillo, Mimbocito, Albarical y Palmira. En la figura 1, se muestra la red hidrográfica de la planicie aluvial del río Motatán, en el estado Trujillo.

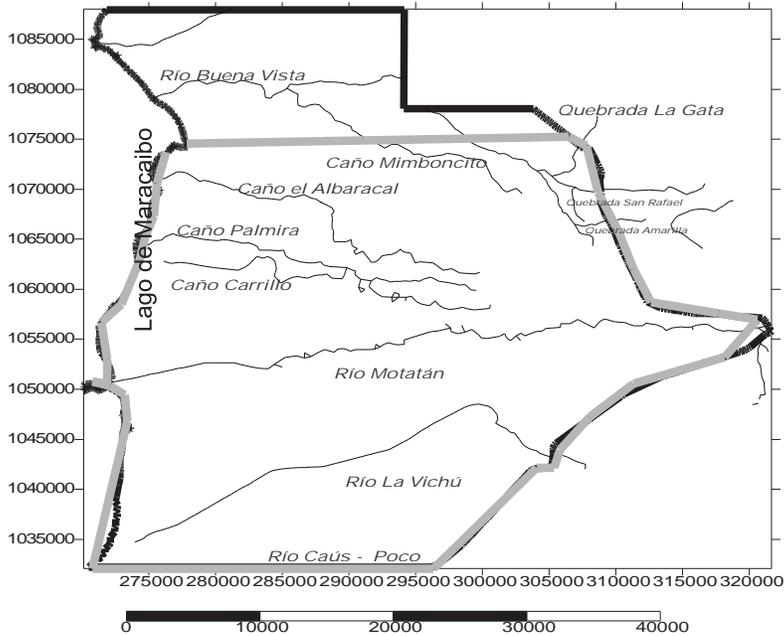


Figura 1. Red hidrográfica de la Planicie Aluvial del Río Motatán.

Las muestras que se analizan en el presente estudio son las tomadas por la Empresa Regional Sistema Hidráulico Trujillano (SHT) en el área de desarrollo de la investigación desde el año 1.994 hasta el año 1.999. Estos datos fueron tomados con una frecuencia mensual para los niveles piezométricos, caudal aforado, caudal extraído, nivel dinámico, temperatura y trimestral para la conductividad eléctrica, pH y sólidos disueltos totales. La misma contiene el inventario de pozos, el cual es de un total de 1.296 pozos, niveles piezométricos correspondientes a 103 pozos con registros históricos desde julio de 1.993 hasta julio de 1.999; y cota de terreno correspondientes a 142 pozos.

Es de destacar que la información cartográfica disponible en cartografía nacional existe a una escala de 1: 25 000 con curvas de nivel a equidistancia de 20 mts, la cual no es conveniente utilizar ya que la planicie tiene una pendiente promedio muy baja ($\leq 2\%$). Dado que este estudio se basa en el análisis del parámetro salinidad de las aguas subterráneas del acuífero, se decidió utilizar los niveles piezométricos y la conductividad eléctrica debido a que estos datos presentaban homogeneidad en el tiempo.

Los datos de conductividad eléctrica fueron tomados cada tres meses, y para facilitar el trabajo de análisis, posteriormente este se dividió por periodos o campañas trimestrales para los años en los cuales se ejecutaron las mediciones. Como resultado, se obtuvo comenzar estos periodos a partir del cuarto período o trimestre del año 1.994, culminando en tercer trimestre del año 1.999. Para permitir una mayor homogeneidad en el estudio, de la base de datos totales se tomaron 101 pozos que se encuentran distribuidos en la planicie.

Variables utilizadas

Identificación de pozos

El Sistema Hidráulico Trujillano para la identificación de cada pozo utiliza un código compuesto de diez dígitos en el que los dos primeros representan el estado donde se encuentran ubicados (TR = Trujillo, ZU = Zulia); los cuatro siguientes son números arábigos que identifican a la sección extensa. La planicie fue dividida en once secciones extensas de aproximadamente 300 km² de superficie; luego tres números arábigos que representan el número del pozo dentro de la sección extensa y el último dígito es una letra que representa la condición de funcionamiento del pozo.

Coordenadas UTM

La ubicación aportada de cada pozo estaba en coordenadas geográficas. Los diferentes programas a utilizarse en lo sucesivo requerían de coordenadas cartesianas (norte-este), las mismas fueron transformadas utilizando el programa TCOR7, tomado del banco de programas del CIDIAT (aún sin editar).

Cota de terreno

La determinación de las cotas de terreno para cada uno de los pozos considerados tuvo dificultades. Los mapas topográficos disponible en cartografía nacional, con curvas de nivel cada 20 mts, no fueron acordes al caso. Asimismo, la dificultad de campo por lo extenso del área en estudio, y la poca precisión del Global Position System (GPS) en la estimación de las cotas de terreno, conllevo a la búsqueda de otra alternativa para generar las cotas de la mayoría de los pozos ubicados en la planicie.

La unidad de Sistema de Información Geográfica (SIG) adscrita al SHT, fue la encargada de realizar un plano digital de la planicie a partir de ortofotomapas a escala 1:25000, generando curvas de nivel cada 5 m. A su vez también se digitalizo parte del borde del sureste del Lago de Maracaibo, la carretera panamericana, el río Pocó, que constituyen los límites este, oeste y sur del área en estudio; así como las principales vías internas y los drenajes naturales más importantes de la zona.

Nivel piezométrico

El SHT a mediados del año 1.993, instalo una red de observación con el objeto de llevar un control mensual de la variación de los niveles de agua en el acuífero, la misma se estabilizo a finales del año 1.994, tomando registros hasta Julio del 1.999.

Niveles

Con base en el mes de inicio que permitiera aprovechar al máximo el periodo de registro continuo. Se seleccionó el 10/94 que corresponde al IV período de estudio; suficiente para elaborar el archivo de niveles más representativo de la planicie el cual será usado como dato que permita estudiar el comportamiento de los mismos al finalizar cada período o campaña de trabajo.

Conductividad eléctrica

Para el manejo de esta variable fue hecho un muestreo por la división de hidrogeología del SHT desde la campaña 4-94 hasta la campaña 3-99, en un total de 103 pozos con una frecuencia trimestral y tomada para el estudio ya que aportaría de una forma homogénea, el comportamiento del parámetro salinidad en la planicie aluvial del río Motatán.

Verificación de la información básica

Previo a todo avance es importante verificar la homogeneidad de los datos con los que se desea trabajar. Afortunadamente, para el caso del parámetro salinidad existe diferentes metodologías bastante aceptadas, que permiten garantizar que los datos actuales presenten la homogeneidad necesaria, para poder realizar un estudio detallado con base geoestadística. Antes de proceder a la aplicación de los métodos geoestadísticos, es importante verificar algunas hipótesis básicas en las que estos se basan y que definen el grado de refinamiento que se alcance, así como el método más adecuado que se pueda emplear. Una de estas hipótesis básicas es el ajuste de los valores muestrales en una distribución probabilística normal.

Prueba de hipótesis de normalidad.

Se utiliza en primer término el método matemático que proporciona el programa llamado "Ajuste" que es un programa para el análisis estadístico de una serie de datos históricos. Para el criterio de aceptación o rechazo de la prueba de normalidad se toma un nivel de significación de $\alpha = 0.05$.

Esta prueba se realiza con el fin de comprobar la bondad de datos entre la curva de frecuencia observada, o distribución empírica y la función de distribución seleccionada.

Para el caso de la distribución normal, se utilizará el test de Smirnov – Kolmogorov, el cual consiste en calcular el $a_{\text{máx}}$, es decir la máxima desviación, en valor absoluto, entre los datos observados y la función ajustada, y compararlo con el valor a_0 , obtenido en la tabla de posición de ploteo que el programa posee internamente, si $a_{\text{máx}}$ es menor que el a_0 se acepta el ajuste, caso contrario se rechaza. Todo esto lo realiza el programa internamente, al cual se le debe crear un archivo de entrada en formato ASCII donde se especifica lo siguiente: 1: quiere decir que se va a realizar una sola prueba de normalidad, el título de la prueba en nuestro caso se colocó DN, número de datos que contiene la prueba, y por último todos los datos de la variable estudiada. Este archivo lleva una extensión.dat y se realizó campaña por campaña hasta dar un total de 20. El nos aportará un archivo de salida donde nos expresa si la distribución fue aceptada o no.

También se utilizó para garantizar la homogeneidad de los datos otra prueba de ajuste que nos la aporta el software "Geoeas". Este programa requiere de un archivo de entrada con extensión.dat; donde en primer término se coloca el título de la prueba, seguido del número de periodos en estudio, el nombre o título de los periodos y finalmente todos los datos por campaña de la variable en estudio. El nos proporciona de forma gráfica los resultados de la prueba.

Durante el proceso de depuración de la información básica además de la prueba de normalidad (la cual nos arrojó resultados preliminares de que la conductividad eléctrica no presentaba una buena distribución normal); se procedió a realizar un primer mapeo con la finalidad de verificar la forma como se comportaban los datos de manera espacial con respecto al tiempo y se obtuvo que existían pozos con información no acorde con el universo de los datos; lo cual ocasiona variaciones significativas en los mapas de isoconductividad y por ende se puede realizar un análisis erróneo de la variable en estudio. Verificándonos esto el porque la conductividad eléctrica (C.E.) no se ajustaba a una distribución normal.

Una vez que se obtuvo la información de los pozos (dos pozos; ubicado el primero en las coordenadas 294231 este y 1048951 norte, el segundo en las coordenadas 319327 este y 1057652 norte) que alteraban de manera significativa tanto la prueba de normalidad como el mapeo, se procedió a verificar la información a campo. Para realizar esto, el SHT por intermedio de su división de Hidrogeología, aportó las condiciones en las que se encuentran esos pozos, las cuales son las siguientes: presentan contaminación por estiércol animal, residuos cloacales y que sólo se tomaban los datos para compararlos con el resto de los pozos que presentaban datos de conductividad eléctrica representativos del acuífero. Por tales motivos se procedió a eliminarlos de la base de datos para así poder representar de forma más real las condiciones en las cuales se presenta la variable de estudio en el acuífero.

Después de realizado todo este procedimiento, se procedió a realizar de nuevo la prueba de normalidad dando ahora que la conductividad eléctrica presenta una distribución normal optima; y luego se procedió a ejecutar con estos datos ya depurados el análisis geoestadístico (mapeo de isoconductividad, variogramas, mapas de errores, mapas blanqueados y validación cruzada).

Análisis estructural

Con la finalidad de caracterizar el comportamiento estructural de los datos de calidad de agua, se realiza el análisis de variabilidad espacial para cada uno de los períodos estudiados, luego se ajusta un modelo teórico al variograma definido, se valida este modelo para pasar luego a la fase de krigeado. A tal efecto, para el análisis de la variabilidad espacial se empleara el programa “Variowin” desarrollado en la Universidad de Lausanne, Suiza (Pannatier, 1995).

Dirección del variograma (φ)

En esta etapa de análisis preliminar, la dirección del variograma puede evidenciar algunos aspectos del comportamiento espacial tales como: isotropías, anisotropías o presencias de derivas en las variables estudiadas. Primeramente se verifica, mediante variograma omnidireccionales, si la variable muestreada presenta una estructura de variabilidad espacial definida, encontrándose que la conductividad eléctrica manifiesta una estructura apreciable.

Variogramas direccionales

Se recomienda generar variogramas con direcciones a 0, 45, 90 y 135° y una tolerancia angular de $\pm 45^\circ$ en estadio preliminares del análisis estructural con el propósito de evidenciar la existencia de fluctuaciones importantes para estas direcciones. Se realizan variogramas para la variable conductividad eléctrica.

Implementación de un modelo teórico al variograma experimental

Luego de realizados los variogramas experimentales se procedió a la implementación de un modelo teórico a estos variogramas (a los omnidireccionales) para poder tener otro criterio firme en la representación gráfica del fenómeno en estudio, ya que con este modelo se obtienen los valores de rango y meseta adecuados para la estimación por el método del krigeado.

Se obtuvo que el modelo adecuado era el exponencial que nos brinda una estructura próxima a los valores de varianza y con esto cometer el menor error posible a la hora de la estimación.

Estimación por krigeado ordinario

Establecidos los variogramas que caracterizan a cada período de estudio; se procede entonces a la estimación de la distribución espacial de la conductividad eléctrica por krigeado ordinario, (Lawrence et al, 1988).

La base de datos utilizada fue grabada en un archivo de entrada con extensión.xls, donde esta información poseía la siguiente descripción.

- Identificación del pozo
- Coordenadas U.T.M.X.
- Coordenadas U.T.M.Y.
- Los datos de la variable en estudio, siguiendo un orden cronológico por campañas antes descrito.

A continuación este archivo de entrada fue utilizado en el programa Golden Software Surfer 7.0; creado por la empresa Golden Software Inc. Bajo el sistema Surface Mapping System, en Colorado Estados Unidos 1.999. El cual procedió a ejecutar los conceptos básicos y teóricos del krigeado. Dándonos como resultado, mapas de isoconductividad, mapas de errores y los mapas blanqueado que nos indican las zonas del área de estudio donde poseemos información confiable de la red de muestreo existente en la planicie aluvial.

El mapa de errores se realiza con la base de datos en un archivo.txt como entrada; luego en el programa Surfer 7.0, se selecciona el período a estudiar, se introducen los valores del variograma adoptado y sus correspondientes valores de rango y alcance. El archivo de salida es con extensión.grd.

Los mapas blanqueados tienen como finalidad presentar solamente las zonas donde existe información confiable, blanqueando el resto de las zonas. Esto lo realiza el Surfer 7.0, donde se le debe indicar el entorno donde va a realizar el blanqueo. Para este estudio se toma que si el error es menor que la varianza de estimación, se acepta el mapa generado, en caso contrario no debe extrapolar información; para lo cual se coloca un número "clave", esto se logra mediante funciones matemáticas, tal como se muestra en la Figura 2.

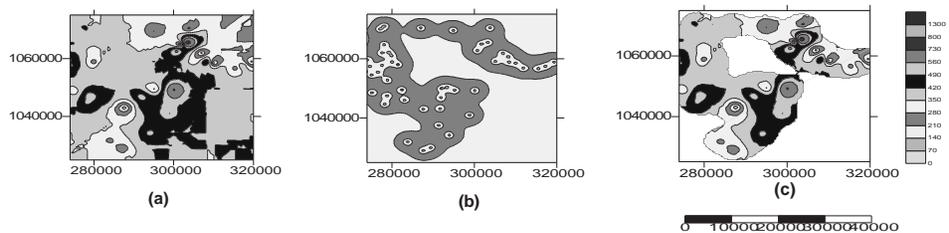


Figura 2. (a) Mapa de isoconductividad, (b) mapa de error y (c) mapa blanqueado del periodo 4 – 94.

Validación cruzada

Este procedimiento se utiliza para validar el modelo teórico ajustado al variograma y confirmar que este es el adecuado para el estudio a realizar ya que este nos permite minimizar los errores de estimación.

Para proceder a la realización de la validación cruzada se utiliza el archivo con el cual se generaron los variogramas, seleccionándose el rango y la escala correspondiente al periodo en estudio (aportados por el variograma); este procedimiento se realiza en el programa Geoeas; este nos aportará los resultados de la validación cruzada.

Es importante destacar los basamentos teóricos de esta prueba; así pues de los N datos disponibles se seleccionan M ($M \leq N$) en los que se lleva a cabo la validación cruzada. Para realizar el krigeado se utilizan N_k puntos que no tienen porque coincidir ni con M ni con N . El entorno para la validación cruzada en un punto x_i se define identificando un número máximo de puntos $MAXR$ ($MAXR \leq N_k$) y un radio máximo $RMAX$ para el entorno. El conjunto de puntos N_i está formado por los $MAXR$ puntos x_j más próximos a x_i localizados a una distancia de x_i menor que $RMAX$. En la validación cruzada de prueba y error se van probando diferentes valores de los parámetros del semivariograma (o de la covarianza).

Mejoramiento de la red de medición

Aunque es ambicioso hablar del mejoramiento de una red de medición, se puede; sin embargo, establecer lineamientos que ayuden al gestor de la red a mejorar sus estimaciones según el objetivo que esta persiga.

El aspecto financiero es una de las restricciones determinantes en la concepción de la red, puesto que el costo de muestreo es proporcional al número de pozos. Un criterio para establecer si un nuevo pozo es conveniente puede expresarse como relación entre el beneficio económico obtenido en la estimación global sobre el incremento porcentual de costos en la red de medición.

Análisis comparativo de la conductividad eléctrica con respecto a los niveles piezométricos

Con la información de los niveles piezométricos suministrada por la Empresa Regional Sistema Hidráulico Trujillano se procedió en primera instancia a depurarla para garantizar su uniformidad, teniendo en cuenta que las mediciones que se realizaron fueron mensuales y los periodos de estudio de la C.E. fueron trimestrales; por lo tanto se calcularon los promedios trimestrales de los nuevos pozos (N.P.) y así poder tener la información por campañas trimestrales al igual que la variable estudiada (C.E.).

El archivo de datos se realizó en un archivo bajo una hoja de cálculo (xls); luego se obtuvieron los promedios finales por campaña, graficándolos y así poder compararlos con los valores de C.E, tal como se puede observar en la Figura 3.

Influencia agrícola

Utilizando el trabajo de investigación "Evaluación de tierras con fines de planificación agrícola de la planicie aluvial del río Motatán estado Trujillo (Diagnóstico físico e inventario de tierras" realizado por Pineda y Jaimes (1.994), se procedió a realizar una comparación

entre el análisis y conclusiones del citado trabajo, con los mapas de isoconductividad generados en la presente investigación por el método del krigeado, con la finalidad de obtener la ubicación de las zonas con posibles problemas de salinidad, debido a que una de las conclusiones más importantes aportadas por el trabajo de los autores citados, es que los valores de pH del suelo varían de neutro a ligeramente alcalino en algunos sectores de las unidades de tierras estudiadas en la planicie aluvial del río Motatán. Sin embargo, se pudo observar además, que existen problemas físicos asociados con los altos contenidos de sodio cambiables en pequeñas zonas que están localizados en áreas cercanas a los sitios conocidos como El Gallo y la Hacienda La Perla, correspondientes al municipio Sucre.

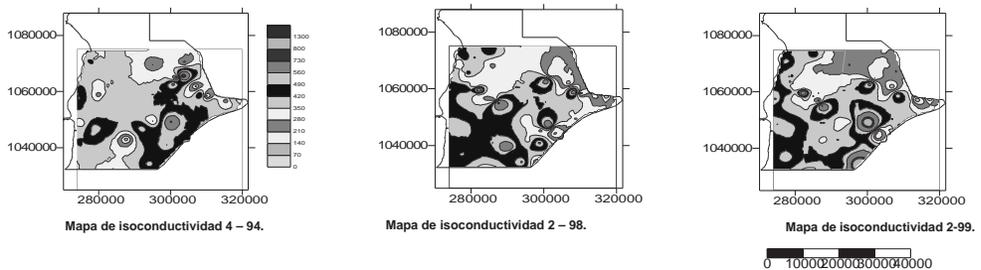


Figura 3. Variación de la conductividad eléctrica hacia el oeste de la planicie.

Análisis de resultados

Información existente

Una vez que se obtuvo toda la información levantada por el SHT y procesada de manera que se seleccionó a la conductividad eléctrica como el parámetro que nos aportaría el conocimiento necesario sobre el comportamiento espacial de la salinidad en el acuífero aluvial del río Motatán.

Se calculó la conductividad eléctrica promedio para cada período o campaña de trabajo, siendo la máxima conductividad de 381.508 mmhos en el período IV – 94, cuando se comenzó a medir esta variable y la mínima conductividad fue de 333.43 mmhos en el período II – 97. En general estos valores de conductividad eléctrica en un primer término (comparación entre medias) varían muy poco uno con respecto al otro, e inclusive son valores que se pudiera inferir no afectan a la mayoría de los cultivos existentes en la zona.

Se trató de buscar correlación entre la conductividad eléctrica y los niveles piezométricos y no se encontró que existiese relación directa entre estas variables hidrogeológicas. A continuación, se presenta los valores promedios de niveles piezométricos, la gráfica de su variación y la gráfica de la correlación entre C.E y nuevos pozos.

Haciendo un estudio detallado de la posible correlación entre la C.E. y los nuevos pozos se puede inferir que las pequeñas variaciones existentes de conductividad eléctrica no se ven influenciadas de manera directa por lo niveles piezométricos, porque estos no han variado drásticamente en el tiempo, de alguna manera los balances se han mantenido para las condiciones de explotación existentes en el período de estudio (IV – 94 al III – 99), es importante resaltar esto ya que si se comienza a sobre explotar el acuífero de la planicie es probable que comience de una manera significativa la intrusión salina proveniente del Lago de Maracaibo y en ese momento se podría incrementar los niveles de salinidad

de las aguas subterráneas.

Verificación del ajuste de los valores muestrales a una distribución normal

Los resultados obtenidos de las dos pruebas de normalidad realizadas, Ajuste y Geoeas demuestran que se trabajó con una uniformidad de datos excelente; de estas pruebas se determina que la variable de estudio mantiene en el tiempo una distribución probabilística normal.

Análisis estructural

Como primer término, por intermedio de los variogramas omnidireccionales se verifica que la variable muestreada (conductividad eléctrica), presenta una estructura uniforme y se podría decir casi constante en el tiempo. En los variogramas direccionales no se aprecia variaciones significativas mostrando una estructura típica; no se observa la presencia de derivas, que es una tendencia cuadrática tratada por Journel y Huijbregts (1.979) que ameritan una investigación más detallada.

Para tratar de minimizar los errores de campo (a pesar de que eso no es totalmente cierto), se trabajó con un efecto de pepita igual a cero. Con implementación de un modelo teórico (exponencial) a los variogramas, se obtuvo los valores de rango y escala o meseta utilizados para la aplicación del krigeado.

Los variogramas fueron validados con el índice de buen ajuste (validación cruzada), previamente explicada. Mediante el krigeado se elaboró el mapeo de los datos muestrales, donde se encontró que la media espacial es aproximadamente igual a la media muestral lo cual corrobora la hipótesis del krigeado.

También se evidenció una evolución de la salinidad hacia el oeste de la zona de estudio (hacia el Lago de Maracaibo), siendo el período de menor salinidad el 4 – 94, el período intermedio el 2 – 98 y el de máxima el 2 – 99.

Red de medición

Uno de los principales beneficios que nos aporta el krigeado, es que permite conocer el error de estimación cometido y que éste no depende directamente de los datos levantados en campo. Esto facilita pensar en la ubicación de nuevos puntos de muestreo o la utilización de otros ya existentes, teniendo de esta forma una minimización de la varianza de la estimación tanto en forma global como local.

En el caso estudiado, se observa que el gestor utilizó sólo una parte de la base de datos (pozos existentes en la planicie), 103 pozos de un total de 1.296 implantados en la zona; también es importante acotar que para la investigación se eliminó en la fase de depuración dos pozos por encontrarse contaminados.

Es de hacer notar que el SHT a la hora de realizar su inventario de pozos, trató de ubicar los puntos de observación para obtener una mayor distribución de los mismos. En la actualidad existen registros históricos 103 pozos desde julio de 1.993 hasta julio de 1.999 y específicamente la información de conductividad eléctrica se levantó desde el mes de octubre de 1.994 (IV – 94) hasta julio de 1.999 (III – 99). Pese a este esfuerzo del ente gestor, existe una zona hacia el Este de la planicie donde no se posee información

alguna (generando un error de estimación muy alto), que nos permita analizar de forma más precisa el comportamiento espacial de la C.E en el acuífero. A esto principalmente se debe la presencia de regiones blancas en los mapas de blanqueo de errores.

En zonas donde no existe una buena densidad de muestreo, produciéndose una varianza de krigeado elevada. Este efecto se puede disminuir; en nuestro caso particular existe la presencia de perforaciones en la zona donde el error de estimación es alto y para reforzar esta región de máxima incertidumbre se puede tomar muestras de C.E. en pozos ubicados o cercanos a la zona; que existen pero en el inventario histórico no fueron utilizados. Siempre tomando en cuenta que no se debe alterar la calidad química de la muestra, ya que debe ser comparable a la del acuífero en un entorno inmediato a un punto considerado o de referencia.

Influencia agrícola

En el análisis comparativo entre las zonas que presentan suelos con problemas de salinidad identificados por Pineda y Jaimes (1.994) y los mapas de isoconductividad presentados en esta investigación no se encontró relación alguna entre la salinidad de las aguas del acuífero y estas zonas; ya que la salinidad es baja y para el período del estudio daños en las características edáficas de los suelos de la planicie y por ende en la producción agrícola de la zona.

Conclusiones

Para obtener un análisis real y confiable a la hora de realizar un estudio de variabilidad espacial de cualquier parámetro o variable regionalizada es fundamental poseer no sólo calidad y cantidad de datos de muestreo sino una densidad adecuada de estos. Un gran número de muestras esparcidas uniformemente en la planicie aluvial pueden definir de manera más clara el comportamiento de la conductividad eléctrica y por ende de la salinidad de las aguas del acuífero. Se tiene el conocimiento que existe un gran número de pozos inventariados por el Sistema Hidráulico Trujillano y que ellos por razones de económicas sólo han utilizado para el monitoreo de la conductividad eléctrica y niveles piezométricos un pequeño número de ellos; esto ha limitado el análisis ya que se tienen zonas donde no existe información levantada en campo.

Los mapas de isoconductividad obtenidos por el método del krigeado, representan el comportamiento global del parámetro estudiado; realizándose una depuración de datos que presentaban característica no acorde con el universo de los mismos. Debido a que no existen registros históricos anteriores ni de niveles piezométricos ni de conductividad eléctrica al período del estudio; no se puede inferir que los niveles de salinidad se han mantenido en el tiempo con respecto a datos previos. Los niveles de conductividad eléctrica en los pozos de observación van creciendo de este a oeste con respecto al tiempo, presentándose su período crítico o máximo en el II - 98.

En cuanto al diseño de la red de medición, esta debe obedecer al interés que persiga, es decir, si el interés es el de reducir las zonas que presenta una variabilidad muy grande como es nuestro caso, entonces la utilización de pozos ya existentes para la medición del parámetro en estudio estará destinada a reducir esta varianza. Los métodos utilizados en esta investigación, como lo son los variogramas y los mapas de isoconductividad,

específicamente los de errores constituyen elementos de suma importancia a la hora de optimizar la red de muestreo ya que este es un proceso dinámico, costoso y debería ser de constante revisión y se ve afectada si la información levantada no es abundante.

Durante el período de estudio se puede concluir que la conductividad eléctrica ha sufrido un ligero aumento y se encuentra entre valores que no afectan de manera significativa a los cultivos implantados en la zona (pastos existentes en los potreros y en regiones que se encuentran en desuso o barbecho, bananos, caña de azúcar, guayabas, sorgo); además que no existe ninguna correlación entre la variación de los niveles piezométricos y la variación del parámetro analizado.

En cuanto a las zonas que presentan problemas de suelos con salinidad y en algunos casos con sodicidad, estos no son producidos por el uso de aguas del acuífero para el riego; sino que se pueden deber a características edafológicas propias de los suelos de esas zonas y al uso de láminas de lavado no adecuadas. Por existir el agua del Embalse de Agua Viva, de alguna manera se asegura la calidad que la calidad del agua para el riego permanezca como buena para la gran mayoría de los cultivos presentes en la zona en el tiempo.

En general los métodos geoestadísticos empleados en la realización de esta investigación pueden ser utilizados para analizar la variabilidad espacial de otras variables, parámetros o fenómenos que puedan ser tomados como regionalizados.

Recomendaciones

Antes de realizar cualquier tipo de análisis geoestadístico, tener la certeza que las coordenadas de los puntos de muestreo y las lecturas del parámetro en estudio, posean un nivel de exactitud confiable, de caso contrario se debe proceder a realizar un nuevo recorrido en campo y obtener de manera clara los valores de los datos a analizar o visitar el ente gestor de la red y solicitarle la información correcta.

Con la finalidad de garantizar la representatividad de las muestras y facilitar los trabajos de procesamiento y análisis de la información, es recomendable dividir los datos por campañas o períodos de medición. Es necesario densificar la red de muestreo de tal forma que presente homogeneidad adecuada y la varianza de estimación sea cada vez más pequeña, en nuestro caso particular, se recomienda utilizar pozos existentes en la zona en la cual se presenta un error de estimación muy alto (zona blanqueada); tomando en cuenta que los puntos de medición deben poseer más o menos una separación de un tercio del alcance del variograma (distancia integral) y con esto obtener una buena correlación entre pozos.

Se recomienda que si los pozos que se seleccionen para la densificación de la red de muestreo se encuentran desactivados se debe realizar un bombeo previo antes del muestreo, lo que supone realizar obras de un diámetro suficiente para permitir el bombeo. Para realizar este bombeo no existen reglas muy precisas pero se deben tomar en cuenta algunas recomendaciones expuestas por autores citados por Landreau A. et al (1.985, citados por Mora,1.996).

Se recomienda al SHT, responsable de la red de muestreo realizar un análisis de beneficio – costo que detalle las implicaciones financieras que traería el trabajo de densificación de la red y que tomen en cuenta las ganancias económicas (en cuanto al rendimiento de los cultivos) que esto traería a los productores de la zona. Es recomendable que el SHT tome en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo de investigación ya que presenta de forma clara las zonas donde se debe ampliar la red de medición específicamente hacia el este de la planicie aluvial del río Motatán.

Se recomienda al gestor de la red, reactivar las mediciones de niveles piezométricos y de conductividad eléctrica, ya que estas fueron interrumpidas desde el período III – 99, hasta la presente fecha; con esto poder llevar un control más detallado de las condiciones en las que se encuentra el acuífero. Se recomienda hacer un análisis espacial de los niveles piezométricos del acuífero, para así poseer información de cómo ha sido la explotación y la ubicación de posibles zonas donde los niveles hallan variado significativamente.

Referencias

- Journel, A. y Huijbregts. Ch. (1.979). Mining geostatistics. London. Academic Press.
- Landreau, A; Lallemand – Barrès, A y Seguin J.J. (1.985). “Conception des réseaux de surveillance de la qualité des eaux souterraines. Orleáns”, Bureau de Recherches Géologiques et Minières., BRGM. Note technique 85 SGN 627 EAU.
- Lawrence, S.; Seely – Reynolds, D. y Reynolds R. (1.988). “Applications of kriging to estimating mean annual precipitation in a region of orographic influence”. Water Resources Bulletin. 24(2):329 – 339.
- Mora M, L. (1.996). “Aplicación de Métodos Geoestadísticos para el Análisis de Parámetros de Calidad de Agua en Acuíferos”. Tesis de Maestría. CIDIAT. Mérida – Venezuela. 1.996.
- Pannatier, Y. (1.995). MS – Windows programs for exploratory variography and variogram modeling in 2D. International Workshop on Statistics of Spatial Processes. Theory and Applications. Version 2.2. University of Lausanne, Lausanne, Suiza.
- Pineda, N. y Jaimes, E. (1.994). Evaluación de tierras con fines de planificación agrícola de la planicie aluvial del río Motatán, estado Trujillo.
- S.H.T. – C.G.R. Ingenieros.(1.994). Estudio Agroclimático en la Planicie Aluvial Cáus – Pocó. Trujillo – Venezuela.