

Monitoreo hidrogeoquímico de acuíferos cársicos costeros afectados por intrusión salina

Hydrogeochemical monitoring of coastal carsic aquifer affected by saline intrusion

Gladis YERA DIGAT*,
Juan R. FAGUNDO CASTILLO**

*Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”
e-mail: gladis.yera@reduc.edu.cu

**Universidad de La Habana. Cuba.
e-mail: juan.fagundo@quimica.uh.cu

Recibido: 23 agosto 2017

Aceptado: 12 octubre 2017

RESUMEN

En muchos acuíferos cársicos costeros se ha deteriorado la calidad del agua subterránea como resultado de malas prácticas agrícolas, sobreexplotación, malos diseños de los sistemas de explotación, ocurrencia de períodos secos prolongados, contaminación, intrusión salina y conexión de acuíferos de características hidroquímicas distintas; todo esto aparejado a que no ha sido utilizada una adecuada metodología de monitoreo de calidad que permita implementar políticas adecuadas de explotación de este valioso recurso. El presente trabajo tiene como objetivo proponer una nueva metodología para el análisis de los datos obtenidos en la actividad de monitoreo del agua subterránea en acuíferos afectados por la intrusión salina, como resultado del estudio hidrogeoquímico detallado de la Costera Sur de la provincia de Camagüey, Cuba.

Palabras clave: acuífero cársico costero, hidrogeoquímica, intrusión salina, modelación hidrogeoquímica inversa, sobreexplotación

ABSTRACT

The quality of the underground waters in many carsic coastal aquifers has been deteriorated as a result of bad farm practice, overexploitation, bad designs of the exploitation systems, occurrence of long dry periods, contamination, saline intrusion, connexion of aquifers of different hydrochemical characteristics and because that the methodology used to monitoring the quality has not been good in order to implement adequate exploitation of this valuable resource. The present work propose a new methodology for the analysis the data obtained from the monitoring of underground water in aquifers affected by saline intrusion, as a result of a detailed hydrochemical study of the South Coastal of the Camagüey province, Cuba.

Keywords: carsic coastal aquifer, hydrogeochemistry, saline intrusion, inverse hydrogeochemical modeling, overexploitation

INTRODUCCIÓN

El territorio cubano está constituido en más del 65 % por un medio geológico cársico, que contiene aproximadamente el 80 % de los recursos totales de agua subterránea. Gran parte de estos recursos se encuentran afectados por los procesos de intrusión salina, o en peligro de estarlo. En Cuba, varias ciudades patrimoniales como La Habana, Santiago de Cuba y Gibara han sido construidas sobre rocas carbonatadas, en las cercanías al mar, por lo que el proceso de intrusión salina es una de las principales problemáticas hidrogeológicas que las afecta. En el ámbito de las construcciones, la composición química del agua subterránea desempeña un papel muy importante ya que tiene gran influencia en el diseño y conservación de cimentaciones, sistemas de conducción de agua y alcantarillado, entre otros.

La composición química del agua subterránea en los acuíferos costeros está influenciada por las propiedades físicas del medio, los factores de alimentación (fundamentalmente asociados al régimen de lluvias) y la explotación a que están sometidos sus recursos.

Los acuíferos cársicos litorales generalmente se encuentran en estado libre, en relación hidráulica con el mar, donde se establece un equilibrio dinámico entre el agua dulce que drena al mar a través de los conductos cársicos y el agua marina que penetra en el acuífero por los mismos conductos; con mayor intensidad en los períodos secos donde se produce mayor explotación del acuífero para el abasto a la población o la agricultura, pues la presión hidrostática se deprime. En el período lluvioso, cuando es menor la explotación, la presión hidrostática es mayor y se limita la entrada de agua marina (Fagundo, Valdés y Rodríguez, 1996).

La alteración de las condiciones físico-químicas y biológicas incide en el equilibrio de los distintos ecosistemas, lo que provoca en algunos casos cambios perdurables o impactos. La sensibilidad a impactos naturales o antropogénicos de los sistemas se conoce como vulnerabilidad, esta es una propiedad intrínseca del medio que depende de sus características hidrogeológicas y de los suelos que le sobreyacen.

En algunas cuencas cársicas costeras se ha producido un sensible deterioro de la calidad del agua subterránea como resultado de malas prácticas agrícolas, sobreexplotación, malos diseños de las obras de captación y la ocurrencia de períodos secos prolongados, todo esto aparejado a una inadecuada metodología de monitoreo de sus características de calidad.

Una metodología hidrogeoquímica incluye los métodos y procedimientos de estudio; depende del carácter de los problemas que resuelve, de la complejidad y el grado de conocimiento de las condiciones naturales y de otros factores; debe asegurar la obtención de información evidente, necesaria para dar solución rápida, correcta, eficiente y científicamente argumentada de las tareas planteadas.

En la bibliografía consultada se proponen algunas metodologías hidrogeoquímicas, en particular se destaca la propuesta de Houlihan y Botek (2007) quienes presentan una

metodología general para el análisis de los datos obtenidos en la actividad de monitoreo del agua subterránea.

Como resultado del estudio hidrogeoquímico detallado de la Cuenca Costera Sur de la provincia de Camagüey, Cuba (Yera, 2012), realizado a partir de la metodología general para el análisis de los datos obtenidos en la actividad de monitoreo del agua subterránea propuesta por Houlihan y Botek (2007), se establece una nueva metodología para el monitoreo hidrogeoquímico de acuíferos cársicos costeros afectados por los procesos de intrusión salina y se propone analizar la información hidroquímica disponible, su precisión, e igualmente el comportamiento de los niveles hidrostáticos, caracterizar el comportamiento de las variables hidrogeoquímicas y de potabilidad en el tiempo y el espacio, determinar los factores que condicionan la hidrogeoquímica en la cuenca y valorar el proceso de mezcla agua dulce-agua salada.

DESARROLLO

A. Análisis de la información hidroquímica y su precisión

Para interpretar correctamente los procesos que determinan las características de calidad del agua subterránea se hace imprescindible contar con suficiente información y realizar un adecuado tratamiento numérico de los datos; para cumplir con este objetivo es preciso disponer de una red de monitoreo hidroquímico y de niveles, en pozos distribuidos de forma relativamente homogénea.

La observación de los niveles en los pozos se realiza con frecuencia mensual, trimestral, semestral o anual. La observación hidroquímica, por su parte, contiene muestreos en la superficie de los pozos y en su profundidad con una frecuencia semestral o anual. Se debe señalar que el diseño de la red de pozos para el control de la composición química del agua en superficie y profundidad, y su esquema de observación, han de ajustarse a los requerimientos, dadas las condiciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas existentes en el acuífero.

Las muestras de agua subterránea recolectadas, según las normas establecidas (Oficina Nacional de Normalización, 1985), son conservadas y trasladadas al laboratorio donde se realizan las mediciones de los contenidos de los macroconstituyentes y los parámetros químico-físicos fundamentales. Los análisis químicos de las muestras serán realizados mediante los métodos estándares (APHA; AWWA; WPCF, 1989).

Para garantizar la precisión de los análisis químicos de las muestras se emplean dos métodos de control:

- **Método 1:** al comparar las sumas de aniones y cationes (en meq/l), la diferencia no debe exceder el 6 % ;
- **Método 2:** al comparar la conductividad eléctrica real y la conductividad eléctrica teórica, el error calculado (1) no debe exceder el 10 %.

$$e = \frac{CE_T - CE_R}{CE_R} * 100 \quad (1)$$

Donde:

CE_R : conductividad eléctrica real
 CE_T : conductividad eléctrica teórica

En cada una de las muestras fueron determinados los macroconstituyentes (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), las SST (Sales Solubles Totales), el pH y la conductividad eléctrica. Cuando se sobrepasan los errores permisibles, las muestras son desechadas.

Análisis del comportamiento de los niveles hidrostáticos

En el estudio hidrogeoquímico de las cuencas cársicas costeras resulta de gran interés profundizar en el comportamiento de los niveles hidrostáticos, la sobreexplotación puede ocasionar descensos considerables de estos, lo que trae como consecuencia la salinización por intrusión marina. Para valorar el comportamiento de los niveles hidrostáticos en la cuenca se propone analizar los niveles mínimos registrados.

B. Análisis del comportamiento de las variables hidrogeoquímicas en el tiempo

Algunos pozos de la Cuenca han sufrido cambios apreciables en sus características hidrogeoquímicas en el tiempo, pero estos cambios no han sido siempre de igual magnitud o sentido, ni han ocurrido simultáneamente en todas las áreas. Son varios los factores que pueden influir, tanto naturales como antrópicos, por tanto, en el presente acápite se valora la influencia del ciclo hidrológico y el régimen de explotación, así como el ajuste de las variables hidrogeoquímicas a la distribución normal.

En el análisis del comportamiento de las variables hidrogeoquímicas en el tiempo se emplean los métodos estadísticos univariados. Estos métodos se utilizan para analizar en cada pozo el comportamiento de las variables hidrogeoquímicas (estadística descriptiva), para valorar la influencia del ciclo hidrológico y del régimen de explotación en su comportamiento (prueba de suma de rangos) y determinar si las variables ajustan su comportamiento a la ley de distribución normal (prueba de la curtosis).

Prueba de suma de rangos

Los métodos no paramétricos no suponen conocimiento alguno acerca de las distribuciones de las poblaciones, excepto que estas sean continuas. Dentro de las pruebas no paramétricas se destaca la prueba U de suma de rangos, como una alternativa no paramétrica de la prueba t bimuestral, conocida como prueba de Wilcoxon o prueba de Mann-Whitney. Esta prueba consiste en probar si dos poblaciones son las mismas, o si una probablemente produzca observaciones mayores que la otra (Miller, Freund y Johnson, 2007).

En el presente trabajo se implementa por primera vez, para estudios hidrogeoquímicos de acuíferos cársicos costeros afectados por la intrusión marina, la prueba de suma de rangos con el objetivo de probar si existen diferencias significativas en la composición química del agua, ya sean relacionadas con el ciclo hidrológico o el régimen de explotación.

Con el objetivo de valorar la influencia del ciclo hidrológico se debe seleccionar un grupo de pozos, en cada uno de los pozos las observaciones registradas deben ser separadas por períodos hidrológicos, lo que permite formar la Muestra I (fin seco) y la Muestra II (fin húmedo). Se determinan las estadísticas de ambas y en los casos en que se detecten diferencias será necesario dar respuesta a la siguiente interrogante: ¿son notables estas diferencias a un nivel de significación $\alpha=0,01$?

Para dar respuesta a la interrogante expresada anteriormente los datos de cada uno de los macroconstituyentes deben ser clasificados en orden creciente por su magnitud y se debe destacar a qué muestra pertenecen. El lugar que ocupan en el ordenamiento se denomina rango, en caso de existir nexos entre valores pertenecientes a diferentes muestras, se le asigna a cada una de las observaciones la media de los rangos que tienen conjuntamente.

Donde:

W_1 y W_2 : sumas de los rangos de las muestras.
 n_1 y n_2 : medidas de las dos muestras.

Cuando n_1 y n_2 exceden 8, la distribución muestral de U_1 (o U_2), con (2)

$$U_1 = W_1 - \frac{n_1(n_1+1)}{2} \quad (2)$$

Se aproxima a la distribución normal con media (3)

$$\mu_{UI} = \frac{n_1 n_2}{2} \quad (3)$$

y varianza (4)

$$\sigma_{UI}^2 = \frac{n_1 * n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12} \quad (4)$$

En consecuencia, cuando n_2 es mayor que 20 y n_1 es al menos 9, se puede utilizar el estadístico Z (5) (Walpole, Mayers y Myers, 2008):

$$Z = \frac{U_1 - \mu_{UI}}{\sigma_{UI}^2} \quad (5)$$

La hipótesis nula se rechaza si: $Z < -2,575$ o $Z > 2,575$

Cuando no se cumplen las condiciones expuestas anteriormente para n_1 y n_2 se hace necesario emplear la tabla de valores críticos para la prueba de suma de rangos, dado el nivel de significación seleccionado. Debe señalarse que los autores del trabajo no cuentan con la tabla de valores críticos para la prueba de dos colas, con $\alpha=0,01$ por lo que se empleará para estimar el valor crítico de U_1 la interpolación entre los valores de U_1 para $\alpha=0,002$ y $\alpha=0,02$. En este caso se acepta la hipótesis nula cuando el valor calculado de U_1 es mayor que el valor crítico. Se plantean como hipótesis a contrastar:

H_0 : El ciclo hidrológico no influye en la composición química del agua.
 H_1 : El ciclo hidrológico influye en la composición química del agua.

Para valorar si el régimen de explotación a que ha estado sometido el acuífero afecta la composición química del agua subterránea se procede a analizar en cada uno de los pozos en estudio, las series de tiempo de los macroconstituyentes. Si han ocurrido cambios en su comportamiento y si estos se mantienen en el tiempo será necesario valorar si son apreciables a un nivel de significación $\alpha=0,01$. Para ello se propone diseñar la prueba de suma de rangos para los componentes mayoritarios del agua (HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) y las SST.

En cada uno de los pozos seleccionados se conforman dos muestras, la Muestra I constituida por las observaciones realizadas antes del cambio y la Muestra II con las observaciones después del cambio. La metodología de trabajo es similar a la descrita anteriormente. Las hipótesis a contrastar son las siguientes:

- H_0 : El régimen de explotación no influye en la composición química del agua.
 H_1 : El régimen de explotación influye en la composición química del agua.

Prueba de normalidad de una muestra

Con el objetivo de realizar predicciones y emplear correctamente distintas técnicas estadísticas se analiza la posibilidad de ajustar el comportamiento de las variables hidrogeoquímicas a la distribución normal. Para las variables aleatorias continuas la densidad de probabilidad normal es la más importante de las leyes de distribución.

Para probar la normalidad de una distribución se propone realizar, por primera vez en un estudio hidrogeoquímico, una prueba basada en la esbeltez de la distribución (curtosis). En esta prueba se emplea la variable Z (6)

$$Z_{curtosis} = \frac{Curtosis}{(24/N)^{1/2}} \quad (6)$$

Donde:

- Curtosis: valor calculado de la curtosis
N: tamaño de la muestra

Se plantean como hipótesis:

- H_0 : La variable cumple con la ley de distribución normal.
 H_1 : La variable no cumple con la ley de distribución normal.

El valor calculado de $Z_{curtosis}$ se compara con el valor crítico para un nivel de significación de $\alpha=0,01$; la hipótesis nula se rechaza cuando $Z < -2,575$ o $Z > 2,575$. Si el valor calculado entra en el rango de aceptación de la hipótesis nula, entonces el gráfico de frecuencia se puede ajustar a la curva de distribución normal, por tanto, se asume que la variable estudiada cumple con la ley de distribución normal.

Los pozos con variables que desvían su comportamiento de la normalidad se encuentran generalmente afectados por condiciones hidrológicas extremas o sobreexplotación. Las condiciones hidrológicas extremas se producen después de una

intensa sequía de más de dos años, asociada a niveles altos de explotación. La sobreexplotación provoca la pérdida de la normalidad de las variables; si se mantiene este régimen en el tiempo, se alcanzan nuevas condiciones de normalidad (Fig. 1).

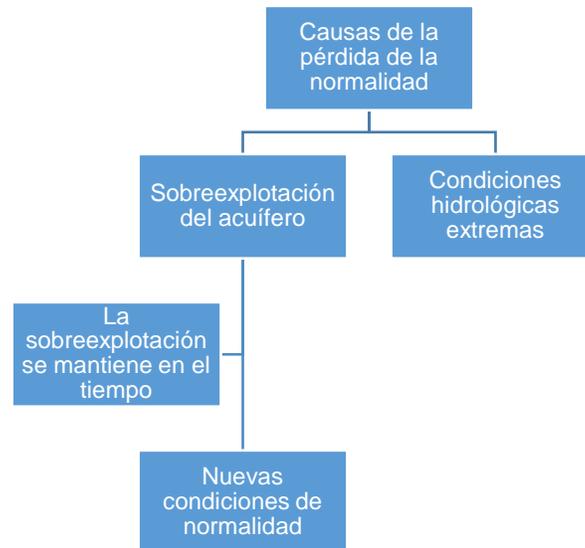


Fig. 1. Pérdida de la normalidad de las variables hidrogeoquímicas
Fuente: Elaborado por los autores

Análisis del comportamiento de las variables hidrogeoquímicas en el espacio de los acuíferos cársicos

En el estudio hidrogeoquímico en el espacio de los acuíferos cársicos afectados por procesos de intrusión salina, se observó un alto nivel de variabilidad espacial en el comportamiento de las variables hidrogeoquímicas y en el cumplimiento de las condiciones químicas de potabilidad establecidas. Por la experiencia de trabajo y los resultados obtenidos, se hizo imprescindible implementar el uso de algunos métodos, entre ellos se destacan: clasificación hidroquímica, índices, patrones, gráficos y mapas hidrogeoquímicos.

Clasificación hidroquímica del agua

La clasificación hidroquímica se basa en destacar el contenido de los iones más abundantes en el agua sometida a investigación. En este estudio se seleccionó el método propuesto por Kurlov (citado por (Fagundo, Valdés y Rodríguez, 1996)), que toma en cuenta los iones que se encuentran en un porcentaje superior al 20 % del total de aniones o cationes.

Índices hidrogeoquímicos

En el estudio de los acuíferos cársicos afectados por la intrusión marina son ampliamente usados los índices hidrogeoquímicos y dentro de estos se destacan las relaciones iónicas, ellas permiten caracterizar las propiedades hidrogeoquímicas de un acuífero y determinar si están afectadas por elementos ajenos al medio geológico. Para determinar el grado de contaminación salina, entre otros métodos, se utiliza la clasificación de Simpson (citado por Stiff, 1951) que parte de la relación $Cl^-/(HCO_3^- + CO_3^{2-})$, en meq/l y da lugar a la clasificación que aparece expresada en la Tabla 1.

| Resultados de la relación | Denominación del agua |
|---------------------------|--------------------------------|
| < 0,5 | Agua normal |
| 0,5-1,3 | Agua ligeramente contaminada |
| 1,3-2,8 | Agua moderadamente contaminada |
| 2,8-6,6 | Agua bastante contaminada |
| 6,6-15,5 | Agua altamente contaminada |
| >15,5 | Agua de mar |

Tabla 1. Clasificación del agua por su grado de contaminación salina

Patrones y gráficos de Stiff

El uso de relaciones matemáticas entre las concentraciones iónicas y la conductividad eléctrica se propone como base de un modelo de adquisición de la composición química del agua, lo que permite agrupar las muestras estudiadas en patrones. La clasificación en patrones hidrogeoquímicos resulta de gran utilidad ya que permite agrupar muestras con diferente composición química y analizar posibles relaciones entre ellas, además, proporciona una información cualitativa de los procesos que pueden estar influyendo sobre la composición de las mismas.

Una forma que resulta más sencilla y útil para caracterizar el agua es a través de los gráficos hidrogeoquímicos; en este sentido se destaca el diagrama propuesto por Stiff (1951), que consiste en un sistema de ejes horizontales paralelos y un eje vertical. A la izquierda del gráfico se ubican las concentraciones de los cationes ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} y Mg^{2+}), a la derecha los aniones (Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-}), en ambos ejes el ordenamiento es de arriba hacia abajo y las concentraciones se expresan en % meq/l.

A continuación se muestra cómo queda conformado el diagrama de Stiff (Fig. 2).

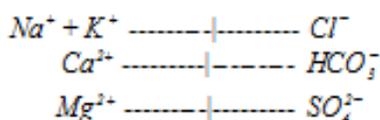


Fig. 2. Esquema del diagrama propuesto por Stiff
 Fuente: (Stiff, 1951)

Mapas hidrogeoquímicos

Los mapas geográficos son representaciones reducidas, generalizadas y matemáticamente determinadas de la superficie terrestre sobre un plano, en las cuales se interpreta la distribución, el estado y los vínculos de los diferentes fenómenos analizados y caracterizados de acuerdo con los objetivos concretos del mapa. En el marco de los avances alcanzados por la informática y las comunicaciones, la cartografía a escala mundial ha tenido un desarrollo complejo y versátil con la aparición y desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En los SIG las bases de datos se organizan y almacenan en forma de tablas, campos y registros.

Entre los paquetes especializados en el trabajo con los SIG se destaca la familia del software *Mapinfo*, creado por *Mapinfo Corporation* para un ambiente *Windows XP* profesional o cualquier otro Sistema Operativo compatible. Es un sistema de naturaleza vectorial con grandes capacidades para la gestión de información y la cartografía,

además de poseer determinadas capacidades para soportar el análisis espacial, las cuales se han visto mejoradas mediante bloques de programas adicionales que se insertan dentro de su arquitectura y permiten desarrollar operaciones formato *raster*.

En el modelo *raster* el espacio se subdivide en celdas y la localización de los objetos geográficos se define por las filas y columnas de las celdas que ocupan. La base de esta extensión son los ficheros *grid*, considerados como el cuarto tipo de datos (además de los puntos, líneas y regiones). *Mapinfo* incorpora un nuevo módulo para el análisis de datos *raster* denominado *Vertical Mapper* (VM). *Mapinfo* implementa seis métodos de interpolación: triangulación, inverso de la distancia con ponderación, vecino natural, interpolación rectangular, *kriging* y estimación de puntos de fronteras.

Los mapas hidrogeoquímicos ofrecen valiosa información sobre las relaciones existentes entre la composición química del agua y las condiciones geológicas, así como físico-geográficas cuando se superponen la litología, la red de drenaje y los diagramas con la composición química del agua. Resulta de gran utilidad en la confección de los mapas el uso de las isolíneas, definidas como líneas curvas que pasan por puntos con iguales valores para el índice cuantitativo que caracteriza al fenómeno cartografiado. Ellas permiten expresar la magnitud o la intensidad de fenómenos continuos que varían gradualmente en el espacio.

En este estudio se emplea la interpolación por el método de *kriging*, por ser considerado el mejor estimador lineal no sesgado que convierte los datos generados en superficies continuas. Los valores asignados a las celdas son calculados a partir de puntos de datos sin un radio de búsqueda especificado, estos puntos se ponderan de acuerdo con la distancia y orientación geográfica de las celdas. Se usa un semivariograma para obtener ramas direccionales.

Los mapas hidrogeoquímicos permiten profundizar en el comportamiento espacial de las variables hidrogeoquímicas. La metodología propone la confección de mapas hidrogeoquímicos de la cuenca en SIG, a escala 1: 250 000 o mayor, porque resultan de gran utilidad al tomar decisiones sobre el manejo de los recursos hídricos subterráneos: mapa de isosales (isolíneas 500, 1 000, 2 000 y 3 000 mg/l, mapa de isocloro (las isolíneas a intervalo de 100 mg/l, hasta la isocloro 500 mg/l); mapa de relación $Cl^-/(HCO_3^-+CO_3^{2-})$, las isolíneas según la clasificación propuesta por Simpson (citado por Stiff, 1951) (0,5; 1,3; 2,8 y 6,6).

C. Condiciones de potabilidad y factores que determinan la hidrogeoquímica

Al comparar los valores medios de los macroconstituyentes y las SST en los pozos en estudio, se puede observar grandes diferencias, incluso entre pozos con relativa cercanía geográfica. El nivel de heterogeneidad observado en muchos casos impide describir las características de potabilidad de forma general en la cuenca, por lo que se propone formar grupos de pozos más homogéneos y determinar los factores que determinan las características de potabilidad con el empleo de técnicas estadísticas multivariantes.

Los métodos estadísticos multivariados son la rama de la estadística y del análisis de datos que estudia, interpreta y elabora material estadístico sobre la base de $p > 1$ variables que pueden ser cualitativas, cuantitativas o la mezcla de ambas. Deben reducir al máximo la subjetividad y los a priori, el modelo debe seguir a los datos y no al revés. Su aplicación está relacionado con la variación de algunas de las características del espacio evidencias, pretende explicar la variación conjunta o sincronizada, más o menos intensa, lo que permite medir el grado de asociación entre variables. Pueden ser empleados si se cumple lo siguiente: aleatoriedad de la muestra, que las variables sean independientes en sentido estocástico y que ninguna de las variables implicadas en el análisis tenga importancia superior a las demás.

En el análisis de las condiciones de potabilidad se emplea el análisis cluster y en la determinación de los factores que condicionan la hidrogeoquímica en la cuenca el análisis factorial clásico.

Análisis de cluster

Las técnicas de agrupación se emplean con el objetivo de identificar grupos de elementos de composición relativamente homogénea a partir del estudio de las regularidades correspondientes al conjunto de atributos usados para su descripción. Estos métodos emplean procedimientos automáticos destinados a determinar clases de individuos (cluster) lo más semejantes posible. Los cluster son los subconjuntos de individuos del espacio de representación que pueden ser identificados por ciertas zonas del espacio donde existe una gran densidad de individuos y que en la zona del espacio que separa estos subconjuntos existe una baja densidad de puntos.

Dentro de los métodos de agrupación más usados se encuentra el de las K-medias, que consiste en mover, en cada paso, un punto de un cluster a otro. En cada paso se ejecuta el mejor de los movimientos, el procedimiento termina cuando no se produce mejora. Este método permite realizar la agrupación de puntos en forma de nube alrededor del centro de gravedad que se corresponde con el individuo medio. En esta investigación se emplea la agrupación en cluster mediante el método de las K-medias

Con el objetivo de determinar el número de grupos existentes deben analizarse diferentes agrupaciones. De las estructuras ensayadas (dos, tres, cuatro, cinco, cluster) debe seleccionarse la agrupación en cluster que muestre mayor homogeneidad en los grupos formados.

Análisis factorial clásico

El análisis factorial clásico se basa en el reordenamiento o reducción del espacio evidencia, lo que da lugar a componentes o factores que pueden tomarse como variables causales de acuerdo a las interrelaciones existentes entre las variables observadas. Este análisis se basa en la propiedad de la correlación. La muestra sometida al análisis factorial debe cumplir las condiciones de normalidad, homocedasticidad y linealidad.

Se parte de haber realizado observaciones de las variables medibles y se busca lograr un nuevo sistema de atributos, calculados a partir de los ya existentes, que satisfagan los siguientes requisitos: ser independientes entre sí; que entre todos los atributos existan algunas relaciones; el número de variables del nuevo sistema debe ser menor que el ya existente; el nuevo sistema de variables se obtiene a partir de una relación lineal homogénea de los atributos originales.

Los factores se determinan de modo que expliquen la mayor varianza de la población. Se calcula también la contribución de cada variable antigua a cada nuevo factor y el coeficiente de cada muestra respecto a las nuevas variables. Cada una de las nuevas variables es linealmente independiente y la varianza explicada es progresivamente menor, por lo general, cuatro o cinco factores suelen explicar la mayor parte de la varianza de la población (entre 70 y 80%). Se recomienda retener únicamente aquellos componentes cuya varianza (λ_i) sea mayor que uno, esto se basa en el hecho de que cualquier factor debe representar más variación que las variables originales estandarizadas, aunque en la práctica muchas veces se retienen factores cuyos valores propios son aproximadamente igual a uno, aunque menor que él.

Este análisis debe realizarse con la rotación de los ejes para lograr la máxima variabilidad de los factores, mejorar la interpretación de la matriz factorial y reducir el nivel de ambigüedades. El nuevo sistema de ejes factoriales, que se corresponde con una matriz factorial de estructura simple, deberá presentar una carga lo más cercana a uno o a cero, respectivamente.

Si las nuevas variables van a estar no correlacionadas debe realizarse una rotación ortogonal. La más popular es la llamada Varimax que persigue los siguientes objetivos: simplificar las columnas de la matriz factorial, alcanzar la máxima simplificación posible de las columnas de la matriz factorial y maximizar la suma de las varianzas de las cargas requeridas de la matriz de factores.

Para determinar los factores que regulan la composición química del agua subterránea se propone emplear el análisis factorial clásico mediante la rotación de los ejes por el método Varimax. La matriz de observación está conformada por los valores medios de los nueve macroconstituyentes fundamentales y las SST observada en cada pozo; la matriz de correlación entre variables es del orden 10*10. Se debe destacar por su nivel de significación, la correlación entre diferentes pares de variables y al examinar las características geológicas del área, determinar el posible origen de los distintos macroconstituyentes en el agua y las asociaciones. Se puede añadir que las relaciones de dependencia más fuertes se encuentran generalmente asociadas con los procesos de mezcla agua dulce-agua salada, fenómeno propio de la intrusión salina.

Las variables causales de la hidrogeoquímica en la cuenca quedarán expresadas como combinación lineal de las variables originales. Se debe analizar el grado de asociación de las variables originales con los nuevos factores. Se consideran en la conformación de nuevas variables las antiguas variables que presenten cargas factoriales significativa, en atención al tamaño de la muestra (número de pozos) y el nivel de significación seleccionado.

D. Proceso de mezcla agua dulce-agua salada

En la valoración del proceso de mezcla agua dulce-agua salada, se aplica la modelación hidrogeoquímica inversa que emplea un modelo de balance de masas y mezcla de agua a partir de dos muestras referencias: agua de mar y agua propia de la cuenca.

Modelación hidrogeoquímica inversa

La modelación hidrogeoquímica inversa fue desarrollada como una estrategia determinista para la interpretación de la composición química del agua subterránea. Consiste en utilizar los datos del sistema (mineralogía, composición de gases, datos físico-químicos) para determinar qué reacciones químicas han ocurrido, en qué medida han tenido lugar, las condiciones bajo las cuales ocurrieron, cómo cambiará la calidad del agua en respuesta a los procesos naturales y a las perturbaciones del sistema. A partir de la información obtenida mediante la clasificación del agua en patrones hidrogeoquímicos y dos muestras como referencias, se determina qué proporción de cada muestra de referencia interviene en la conformación del patrón.

A continuación se describen algunos programas que pueden ser usados para desarrollar la modelación hidrogeoquímica inversa.

El sistema automatizado BATOMET se elaboró sobre la base de las relaciones matemáticas entre las concentraciones iónicas y la conductividad eléctrica. Este programa ha sido muy utilizado en la caracterización y control de los acuíferos cársicos afectados por los procesos de intrusión salina. Es un sistema que agrupa los datos en patrones hidrogeoquímicos (mediante relaciones iónicas) y luego, para cada patrón, determina la relación entre la concentración de cada ión y la conductividad eléctrica; programa los rangos de conductividad eléctrica correspondientes a los diferentes patrones. Con toda esta información se estiman entonces las concentraciones.

HIDROGEOQUIM es un sistema implementado por *Windows*, su objetivo es procesar datos hidroquímicos con vistas a encontrar las propiedades químico-físicas del agua que permitan su caracterización desde el punto de vista hidroquímico y obtener relaciones o índices hidrogeoquímicos que faciliten la interpretación de los procesos de interacción del agua con el medio físico-geográfico y geológico por donde se mueven; conseguir información de carácter hidrológico e hidrogeológico y evaluar la variación temporal de diferentes variables; además, brinda información sobre el drenaje en la cuenca.

El software MODELAGUA, desarrollado en *Borland Delphi 4* sobre *Windows*, permite determinar el origen de la composición química del agua mediante modelos de balance de masa y mezcla de agua, así como precisar los procesos geoquímicos que originan dicha composición. Este programa permite graficar tanto los datos reales como los patrones mediante diagramas de Stiff (1951) y calcular el porcentaje de agua de mar en la mezcla agua dulce-agua de mar, a partir de dos muestras referencias: agua de mar y agua propia de la cuenca. El primer paso en el cálculo es la determinación del factor de concentración o el factor de mezcla según el caso, para lo cual es necesario

seleccionar un ión conservativo. Posteriormente se calcula el delta iónico y finalmente se determinan los procesos geoquímicos que explican la composición química del agua y su cuantía.

Como resultado de la modelación hidrogeoquímica inversa se pueden determinar las características de calidad del agua subterránea en la superficie del pozo y en profundidad, en diferentes áreas de la cuenca, así como las reacciones químicas que dan origen al agua y la proporción de agua de mar en la mezcla agua dulce-agua salada.

CONCLUSIONES

La nueva metodología para el estudio de los resultados del monitoreo hidrogeoquímico de acuíferos cársicos costeros afectados por los procesos de intrusión salina que propone analizar la información hidroquímica disponible y su precisión, analizar el comportamiento de los niveles hidrostáticos, caracterizar el comportamiento de las variables hidrogeoquímicas y de potabilidad en el tiempo y el espacio, determinar los factores que condicionan la hidrogeoquímica en la cuenca y valorar el proceso de mezcla agua dulce-agua salada, haciendo uso de métodos estadístico y software de probada eficacia, permite realizar un adecuado diagnóstico de las características de calidad de las aguas subterráneas y trazar políticas de explotación del agua subterránea que eviten el deterioro del patrimonio construido y permita el diseño acertado de nuevas obras constructivas en casos de ciudades como Nuevita y Santa Cruz del Sur, en la provincia de Camagüey, y en otras ciudades del país.

REFERENCIAS

- APHA; AWWA; WPCF. (1989). *Standards methods for the examination of water and wastewater*. Washington: American Public Health Association.
- Fagundo, J. R., Valdés, J. y Rodríguez, J. (1996). *Hidroquímica del Karst*. Granada, España: Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental.
- Houlihan, M. y Botek, P. J. (2007). Groundwater monitoring. En J. W. Delleur (Ed.), *The handbook of groundwater engineering* (2ª ed.). Boca Ratón: Taylor & Francis Group, CRC Press.
- Miller, I. R., Freund, J. E. y Johnson, R. (2007). *Probabilidades y Estadística para Ingenieros* (4ª ed., Parte I). La Habana, Cuba: Ed. Félix Varela.
- Oficina Nacional de Normalización. (1985). *NC-93-02. Norma Cubana de Agua Potable*. La Habana, Cuba: Autor.
- Stiff, H. A. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of pattern. *Jour. Petroleum Technology*, 3(10), 15-17.
- Walpole, R. E., Mayers, R. H. y Myers, S. L. (2008). *Probabilidades y estadística para ingenieros* (2ª ed., Vol. 2). La Habana, Cuba: Ed. Félix Varela.
- Yera, G. (2012). Hidrogeoquímica de la cuenca Costera Sur de Camagüey, Cuba. Tesis doctoral no publicada, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.