

PROCESOS GEOQUÍMICOS NATURALES E INDUCIDOS POR EL HOMBRE EN ACUÍFEROS KÁRSTICOS COSTEROS. CASO DE ESTUDIO: SECTOR HIDROGEOLOGICO GÜIRA QUIVICÁN (CUENCA SUR DE LA HABANA)

J.R. FAGUNDO¹
P. GONZÁLEZ¹
S. JIMÉNEZ²
M. SUÁREZ¹,
J. FAGUNDO-SIERRA¹
A. GONZÁLEZ³
E. ROMERO³
D. ORIHUELA³

RESUMEN

Mediante un sistemático programa de muestreo y análisis químico de campo y de laboratorio, se identificaron los principales procesos geoquímicos que controlan la composición química de las aguas en las diferentes zonas hidrogeológicas del acuífero kárstico costero Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de la Habana. Entre estos procesos se destacan: oxidación de sulfuros y de la materia orgánica con generación de CO₂, fundamentalmente en la zona no saturada del acuífero; reducción anaeróbica de sulfatos, especialmente en las zonas media y profunda de los pozos cercanos a la zona cenagosa; disolución y precipitación de calcita y dolomita en la zona de mezcla; intercambio iónico, tanto de carácter directo como inverso, así como otros procesos inherentes a la mezcla. En la zona de difusión estos procesos modifican significativamente la composición química, lo cual se pone de manifiesto al comparar con la composición que debía esperarse de la simple mezcla conservativa. Además de los factores hidrogeológicos y climáticos, el fuerte impacto de la actividad humana (explotación, vertido de residuales, construcción de obras hidrotécnicas) influye de manera destacada en la calidad del agua que se utiliza en la región con fines agrícolas y de abasto a la población.

Palabras claves: procesos geoquímicos, acuíferos kársticos costeros, humedales, calidad de agua.

ABSTRACT

The geochemical processes which determine the chemical composition of water from different hydrogeological zones at the karstic aquifer of Güira-Quivicán (Havana Southern Basin) were identified by means of a systematic field and laboratory sampling program. Among them the main processes were: sulfide and organic matter oxidation at the unsaturated zone of the aquifer; sulfate anaerobic reduction, especially at the middle and deep level of the wells located near of the swamp; dissolution and precipitation of calcite and dolomite, direct and inverse ion exchange, as well as other processes connected with the fresh-sea water mixture, where significant modification processes of the chemical composition occurs, which are demonstrated comparing the data with the conservative mixture results. In addition to the hydrogeological and climatic factors, the human impact (aquifer overexploitation, hydrotechnical constructions, wastewater input) play a significant roll over the water quality used for agricultural and population supply purpose.

Keywords: geochemical processes, coastal karstic aquifers, swamp, water quality.

¹ Centro Nacional de Termalismo Víctor Santamarina

² GEOCUBA

³ Universidad de Huelva (España)

Introducción

El medio kárstico es el más vulnerable a la contaminación debido a la estructura particular del drenaje en el mismo. La rapidez del flujo en el interior del sistema favorece la trasmisión de los contaminantes y es escasa la capacidad de autodepuración debido al limitado intercambio iónico en comparación con los medios porosos. En las zonas costeras, donde existe un equilibrio dinámico con la interfaz marina, se puede producir un incremento de los cloruros en el agua debido a una disminución de las lluvias o una mayor explotación del acuífero. El aumento de los iones no comunes al equilibrio de los carbonatos origina un aumento de la karstificación por efecto salino o de fuerza iónica (Fagundo y González, 1999).

En las zonas costeras kársticas, los procesos geoquímicos que tienen lugar son muy complejos debido a que se producen mezclas entre el agua dulce procedente del acuífero y el agua de mar, cuyas propiedades químicas y físicas son muy diferentes y van acompañadas de procesos modificadores de la composición química que debía esperarse por la simple

mezcla (Plummer, 1976; Giménez, 1994; Fagundo, 1996; Morell *et al.*, 1997; Ferrera, 1999). En general, mediante mezcla de aguas de diferente naturaleza hidrogeológica, se producen reacciones químicas que pueden dar lugar a la disolución o precipitación de minerales. Estos procesos se producen porque dichas aguas presentan diferencias en sus presiones de CO₂, los potenciales de oxidación-reducción, el pH, etc.

En terrenos kársticos contiguos a un humedal, el suministro de materia orgánica produce procesos de tipo biogeoquímicos de reducción de sulfato acompañados de producción de dióxido de carbono lo cual intensifica aún más la disolución de las calizas (González y Fagundo, 1998).

En este trabajo se muestran los resultados de un estudio detallado de carácter geoquímico llevado a cabo entre 1997 y 1998 en el sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana (Fig. 1). El área fue seleccionada por ser representativa de un karst sometido a una intensa explotación debido a la demanda de agua para el consumo de la ciudad de La Habana y las

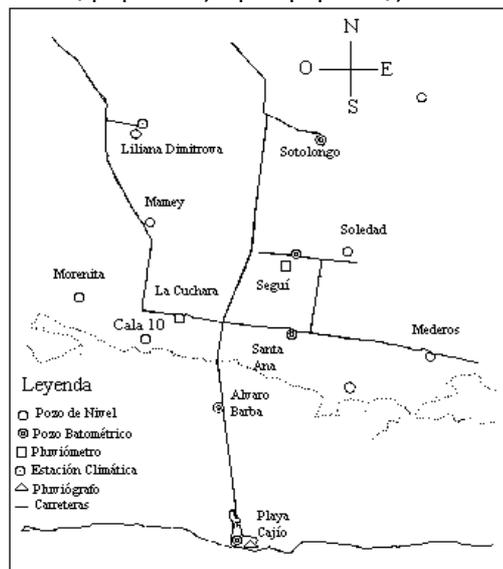


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio y de ubicación de los puntos de muestreo.

MARCO GEOGRAFICO, GEOLOGICO E HIDROGEOLOGICO

El área seleccionada pertenece al sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana, ubicado entre las coordenadas N 320-345 y E 340-370. Dicha área posee una superficie de unos 50 km² y sus cotas absolutas varían entre 1.00 y 2.00 m sobre el nivel de mar. La región está constituida por rocas carbonatadas muy karstificadas de edad Neógeno, pertenecientes a las formaciones

Jaruco, Husillo, Cojimar y Güines. Estas rocas son muy acuíferas, su trasmisividad varía entre 5000 y 50000 m²/d, mientras el coeficiente de almacenamiento alcanza valores desde 0.15 en condiciones de acuífero libre, hasta 0.005 en condiciones de semiconfinamiento (González, 1997).

Las precipitaciones medias anuales en esta área son de 1398 mm (Barros y León, 1997), algo menores que la media nacional. A pesar del volumen de lluvia, el buen drenaje de los suelos,

el alto grado de karstificación de las rocas; así como la gran transmisividad del acuífero, existe un déficit de recursos hídricos en este sector de la cuenca debido a varias razones. En la década del 70 se realizaron obras de canalización que incrementaron el drenaje de las aguas subterráneas de la zona cenagosa, lo cual provocó un desplazamiento de la interfaz agua dulce-agua de mar tierra adentro. Otro factor que ha contribuido a la salinización de las aguas subterráneas en la región es la intensa explotación a que ha sido sometido el acuífero para el abasto a la población habanera y para el riego de las plantaciones agrícolas. Los acueductos agrupados en un campo de pozos han llegado a extraer un caudal del orden de 3.2 m³/s y los sistemas de riego de 3.5 m³ (López, 1992, en: Jiménez et al., 1997.). Entre los años 1984 y 1987 se alcanzaron los valores máximos de explotación en este territorio. Esta situación, unida a una disminución en el régimen de lluvia por debajo de la media anual, incrementó aún más la intrusión marina en el acuífero, por lo cual se tomaron medidas correctoras tales como la regulación del régimen de explotación, la construcción del Conjunto Hidráulico Pedroso-Mompostón-Güira consistente en un sistema de presa y derivadora que conduce el agua superficial a través de un canal para uso agrícola en el área; así como la construcción del Dique Sur, consistente en una barrera impermeable que sobresale entre 1.0 y 1.5 m sobre el nivel del mar. Todo ello, junto al restablecimiento del régimen normal de precipitación, ha contribuido a aumentar el nivel del agua subterránea, desplazar la interfaz agua dulce-agua de mar hacia la costa y mejorar la calidad de las a (González y Felto, 1997).

Fecha: 14-07-97	Hora: 11:40
Prof. (m)	Temp. (°C)
1.5	2000
2	2000
5	2450
8	2580
10	2740
12	2740
15	2740
17	2740
18	2750
20	2750
20.5	5490
21	8700
21.5	13170
22	17620
22.4	21500
23	27900
24	37400
25	42800
26	45800
30	51600
34	52900
35	53000

MATERIALES Y METODOS

En el área de estudio se estableció una red de observaciones sistemáticas para el monitoreo de los niveles piezométricos y la calidad de las aguas. Fue seleccionado un perfil de pozos orientados en dirección N-S (Fig. 1). Las muestras fueron tomadas mensualmente a partir del mes de enero de 1997 hasta junio de 1998, en tres niveles de profundidad, representativos de las zonas de agua dulce, de mezcla y de contacto entre el agua dulce y el agua de mar. Los pozos seleccionados fueron: Playa Cajío (0.20 km de la costa, cota topográfica 0.91 m, muestreo a los niveles de 2, 17-18 y 19-23 m); Alvaro Barba (2.5 km de la costa, cota topográfica 1.87 m, muestreo a los niveles de 3, 23-25 y 34 m); Cala 10 (4.5 km de la costa, cota topográfica 1.97 m, muestreo a los niveles de 2-10, 20.5 y 25 m); Santa Ana (4.9 km de la costa, cota topográfica 4.73 m, muestreo a los niveles de 5 y 20-30 y 38 m); Seguí (6.6 km de la costa, cota topográfica 7.49 m, muestreo a los niveles de 10, 39.50 y 43 m); Liliana Dimitrova (8.6 km de la costa, cota topográfica 8.96 m, muestreo a los niveles de 4-44.5 y 46-50 m); Sotolongo Díaz (9.0 km de la costa, cota topográfica 10.86 m, muestreo a los niveles de 10-11, 40-43 y 50 m). Para la determinación del nivel del agua subterránea se utilizó un hidronivel H-70 de 100 m de cable y los registros de conductividad eléctrica a diferentes profundidades se realizaron con un equipo ORISON 524 con 100 m de cable (Fig. 2), tomándose las muestras mediante hidrocaptorees modelo SEBA de nacionalidad alemana.

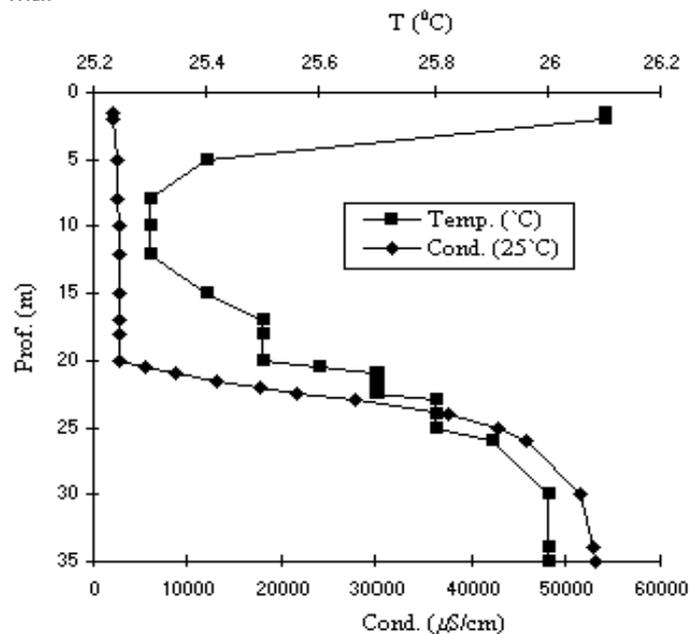


Figura 2. Variación de la conductividad eléctrica y la temperatura con la profundidad en el Pozo Alvaro Barba.

Las mediciones de los parámetros físico - químicos se realizaron "in situ" mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424 marca HANNA y oxímetro HANNA modelo HI 914. Los contenidos de CO₂ y H₂S, así como la alcalinidad total (HCO₃⁻ y CO₃²⁻) fueron también determinados en el campo, mientras que los restantes macroconstituyentes (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ y Mg²⁺) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomada la muestra. Las marchas analíticas se efectuaron mediante las técnicas analíticas estándar (APHA, AWWA, WPCF, 19789). Los iones Na⁺ y K⁺ fueron determinados por fotometría de llamas (fotómetro marca SOLAR 919 de la UNCAM. La calidad de los datos fue validada mediante el balance iónico y el cálculo de las conductividades eléctricas teóricas basado en el modelo de Miller et al. (1986), implementado en el sistema informático HIDROGEOWIN (Alvarez et al., 1998), con el cual se calcularon además los índices de saturación y otros indicadores geoquímico. Los procesos geoquímicos fueron determinados mediante un software basado en un modelo de balance de masas y mezcla de aguas (Fagundo-Sierra, 2001). El resto del procesamiento se efectuó mediante EXCEL.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

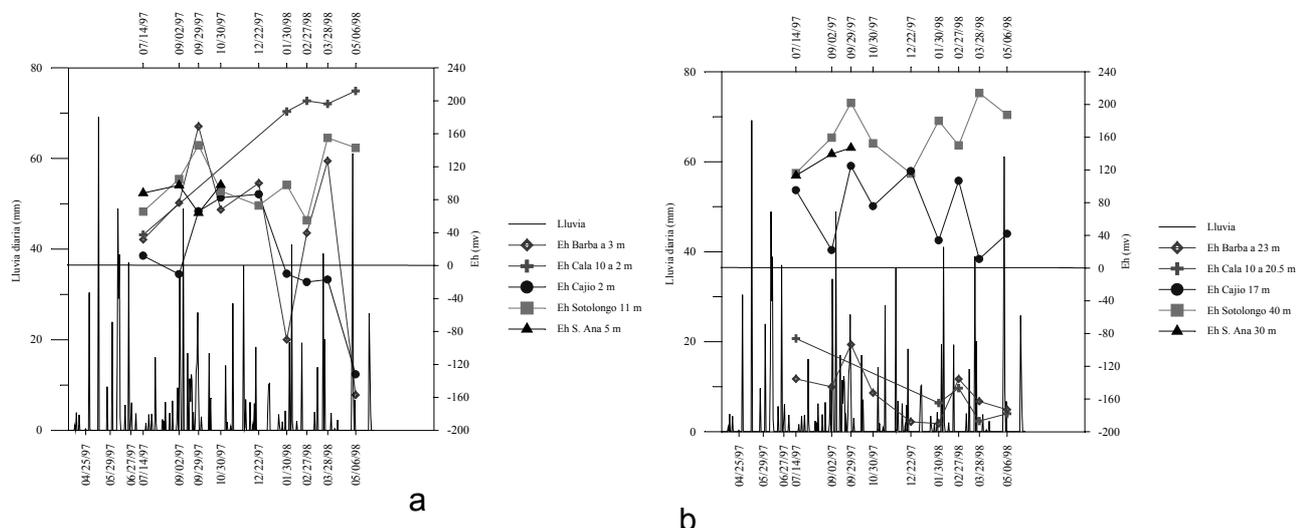
Mediciones de campo

En la figura 3 se presentan los resultados de algunas de las mediciones de potencial redox (Eh) efectuadas en los pozos: Sotolongo Díaz y Santa Ana, situados en la zona de alimentación del acuífero; Alvaro Barba y Cala 10, ubicados en el entorno de un humedal (zona de conducción del acuífero) y Playa Cajío, en la zona de descarga del acuífero al mar.

Como puede observarse, en la parte más somera del acuífero (Fig. 3a) priman condiciones oxidantes, aunque en la zona contigua al humedal los valores de Eh son negativos (condiciones reductoras), excepto en los períodos de grandes precipitaciones en que el acuífero se enriquece con el O₂ que acompaña a las lluvias.

En el sector intermedia del acuífero (Fig. 3b), correspondiente a la zona de mezcla agua dulce – agua de mar, la tendencia es similar a la primera, a diferencia de que las condiciones son siempre reductoras en los pozos Alvaro Barba y Cala 10.

Por último, en el sector más profundo (Fig. 3c), donde se produce el contacto con el mar, se establecen condiciones oxidantes en los pozos ubicados en la zona de alimentación y reductoras en los pozos situados cerca del humedal. En el pozo Cajío, cercano al mar, las condiciones oxido-reductoras varían de acuerdo al régimen de lluvia (oxidantes en períodos de lluvia y reductoras en períodos de seca)



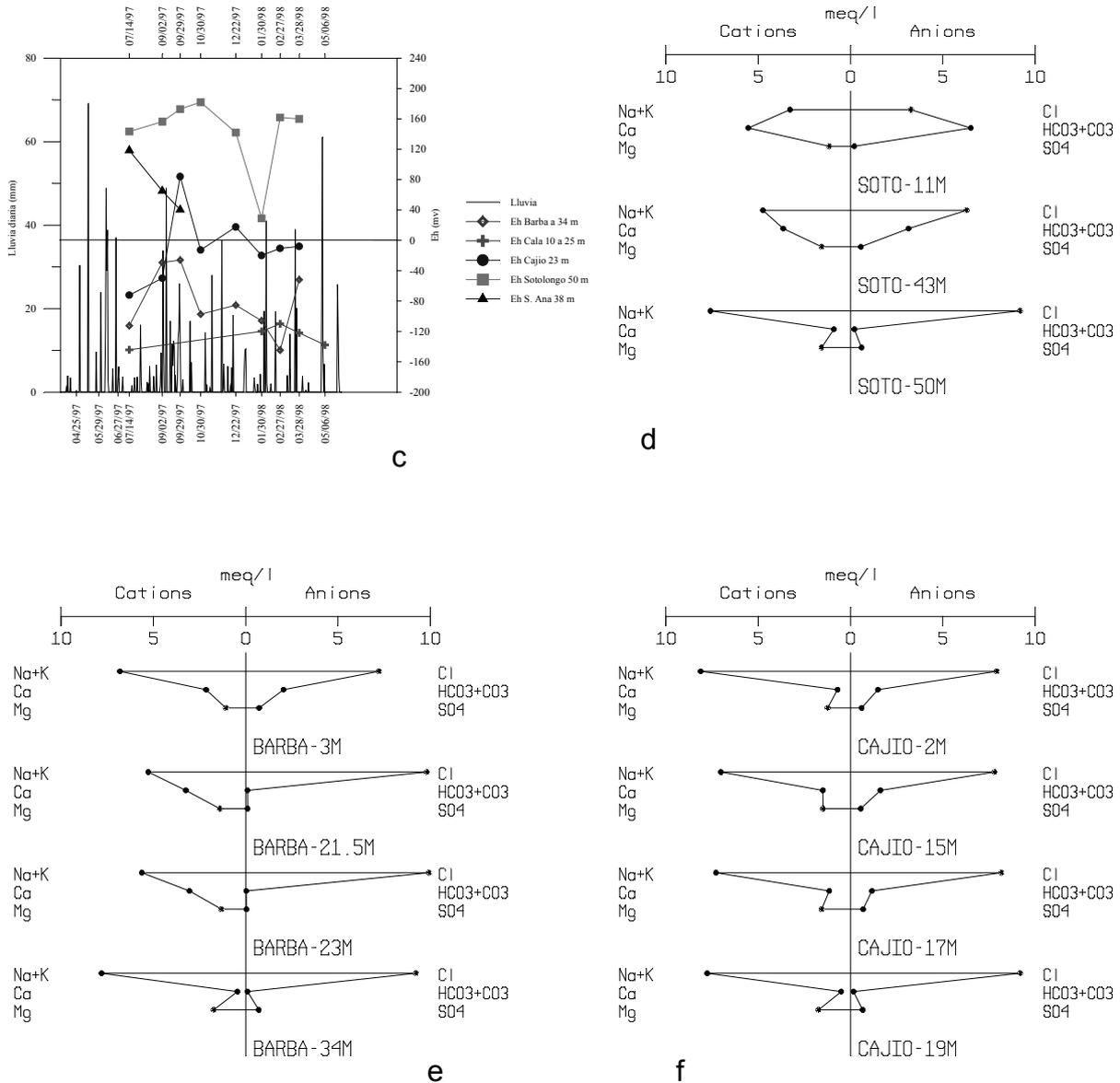


Figura 3. Variación temporal del potencial redox (Eh en mV) en los niveles de profundidad: Superficial (a), Medio (b) y Profundo (c) de los pozos muestreados y patrones hidrogeoquímicos a diferentes profundidades: Sotolongo Díaz (d), Alvaro Barba (e), Playa Cajío (f).

Análisis químico y patrones hidrogeoquímicos

En la figura 3d-3f se muestran los resultados de los análisis químicos expresados en porcentaje de meq/l mediante diagramas de Stiff (patrones hidrogeoquímicos). En general las aguas evolucionan hacia un mayor contenido de Cl⁻ y Na⁺, tanto en sentido vertical como horizontal de los perfiles. Llama la atención, sin embargo, el patrón hidrogeoquímico del pozo Alvaro Barba a

23 m, (Fig. 3e) el cual se caracteriza por la ausencia de HCO₃⁻ y un contenido alto de Ca²⁺, lo cual sugiere la ocurrencia de procesos modificadores de la composición química del agua.

Modificación de la composición química de las aguas como resultado de la mezcla

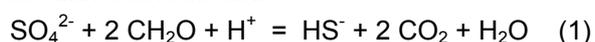
El método más recientemente utilizado para estudiar las modificaciones que experimentan las aguas en las zonas costeras ha sido el de

relacionar los iones susceptibles de cambios con el ion Cl^- (dado que este último se comporta como un ion conservativo en la mezcla). Esto se hace mediante el cálculo de los Δ iónicos, que representan la diferencia entre las concentraciones reales de los iones y las teóricas (resultante de una mezcla conservativa). Esta magnitud expresa los cambios cuantitativos en términos de ganancia o pérdida iónica en los procesos modificadores de la composición química, especialmente en la zona de difusión. La misma se puede representar mediante gráficos de tipo X-Y, donde Y representa el incremento o déficit del ion que se evalúa y X el contenido de ion Cl^- u otros Δ iónicos (Giménez, 1994). Se pueden medir también los cambios en función del porcentaje de agua de mar presente en la muestra (Boluda *et al.*, 1997).

Sobre la base de las concentraciones del agua dulce, representada en este estudio por el pozo Rancherita y el agua de mar, representado por la muestra tomada en Playa Cajío, fueron calculadas las ecuaciones de mezcla teórica.

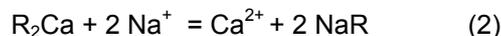
Con el objetivo de evaluar las modificaciones que sufrieron las aguas de esta región en función de su salinidad, entre julio de 1997 y julio de 1998, se relacionaron los incrementos o déficits iónicos con el porcentaje de mezcla de agua de mar que contenía cada muestra (figuras 4a-4d). En las mismas se puede apreciar que los cambios más acentuados se producen, para todos los iones, a partir del 20 % de mezcla, alcanzándose las máximas variaciones entre 40 y 60 %.

La figura 4a se observan procesos de oxidación de sulfuros en las aguas que ocupan la parte correspondiente a la zona de alimentación del acuífero (pozo Sotolongo Díaz), en los tres niveles muestreados (uno representativo de la zona de agua dulce y los otros dos de la zona de difusión o de mezcla). Resultados similares se obtienen en el pozo Liliana Dimitrova también ubicado lejos de la costa. En los pozos muestreados en las regiones cercanas a la zona lacustre (Alvaro Barba 23 y 34 m; Playa Cajío 2 m; Cala 10 entre 20.5 y 25 m y Santa Ana entre 5 y 25 m), se observan intensos procesos de reducción (ΔSO_4^{2-} , negativos). Este comportamiento es en general coherente, con los valores de Eh medidos en el campo y puede atribuirse a la acción de las bacterias anaeróbicas sobre los iones SO_4^{2-} procedentes del mar, las cuales disponen de un suministro elevado de materia orgánica brindada por la ciénaga. Este proceso de tipo biogeoquímico (Bitton, 1994) puede ser esquematizado mediante la reacción:



Donde CH_2O representa la materia orgánica. En este proceso, por cada meq/l reducido de SO_4^{2-} se producirán iguales cantidades en meq/l de HCO_3^- y de S^{2-} en el agua (Shoeller, 1962). Dicho proceso puede favorecer la disolución de la calcita en el acuífero y el sulfuro originado puede producir H_2S , confiriéndole malos olores al agua, o precipitar en forma de piritita por acción del Fe^{2+} presente en los sedimentos (Custodio y Llamas, 1976; Giménez, 1994). Según Ghazban *et al.* (en: Giménez, 1994), la correcta estequiometría de la reacción de reducción de sulfatos dependerá de la naturaleza de la materia orgánica.

En la figura 4b se muestran los correspondientes incrementos del ion Ca^{2+} en las aguas muestreadas en pozos y niveles asociados a los procesos de reducción de SO_4^{2-} discutidos anteriormente. En general, este incremento de calcio es extraordinariamente notable en el pozo Alvaro Barba entre 20 y 23 m de profundidad (donde las aguas alcanzan alrededor de un 20 % de mezcla con agua de mar) y sugiere la ocurrencia de un intenso proceso de corrosión química. Este aumento del Ca^{2+} se encuentra relacionado con la reducción de sulfatos, aunque otros procesos como la dolomitización y el intercambio iónico inverso pueden también originar valores positivos de ΔCa^{2+} , en este último caso mediante la reacción:

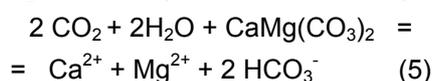
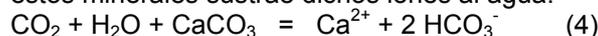


En la figura 4c se observa una tendencia a la disminución del ΔNa^+ con el porcentaje de agua de mar en el pozo Alvaro Barba, lo cual puede deberse al proceso de intercambio iónico inverso y guarda relación con el incremento de Ca^{2+} en los mismos niveles de profundidad. Un comportamiento similar ocurre en los pozos Liliana Dimitrova y Sotolongo Díaz a los niveles más profundos (46-50 m). Por el contrario, los procesos de intercambio iónico directo, que son los más comunes y se expresan mediante una ecuación química inversa a la anterior, se aprecian en los restantes pozos y niveles.

La dolomitización se produce generalmente por alteración de la calcita y la dolomita, aportando también iones calcio al agua subterránea. Este proceso que puede esquematizarse mediante la ecuación:



Finalmente, la disolución de la calcita y la dolomita aporta al medio acuoso tanto iones Ca^{2+} como Mg^{2+} , mientras que la precipitación de estos minerales sustrae dichos iones al agua:



En la figura 4d se muestran cómo varía la magnitud ΔMg^{2+} con el porcentaje de mezcla. Como se puede apreciar, en la zona de difusión del acuífero, por lo general, tendieron a primar los procesos de disolución de calcita con dolomitización, mientras que la disolución de dolomita con precipitación o no de calcita ocurre en el la zona más cercana al área de alimentación del acuífero. Resultados parecidos han sido reportados en Yucatán por Back *et al.* (1986), donde existen características hidrogeológicas similares.

En general, se puede establecer que en el intervalo estudiado, los procesos geoquímicos que han tenido lugar en el sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de la Habana, han estado controlados por el grado de salinidad de las aguas, el aporte de materia orgánica por parte de la zona de pantanos, las oscilaciones de las mareas, el régimen de precipitación y alimentación del acuífero, así como la explotación del mismo por el hombre. Sobre esas bases se pueden distinguir hasta 6 zonas hidrogeoquímicas o de procesos hidrogeoquímicos características:

1). Zona de agua dulce carente de Cl^- de origen marino, representado por el pozo Rancherita, donde no se producen procesos modificadores de la composición química del agua.

2). Zona de agua dulce muy poco salinizada (II) o ligeramente salinizada (III), con 0.3-6 % de agua de mar en la mezcla, correspondiente a los niveles someros y medios de los pozos situados más distantes de la costa (Sotolongo Díaz). Han tenido lugar, principalmente, procesos poco relevantes de oxidación de sulfuros, disolución o precipitación de calcita, disolución de dolomita e intercambio iónico directo.

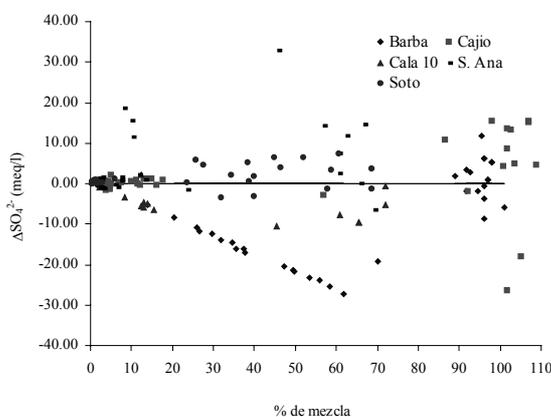
3). Zona de agua dulce ligeramente salinizada (III), con 2-6 % de mezcla con agua de mar, correspondiente a los niveles medio y profundo del área de recarga y niveles someros de la zona del acuífero cercana al pantano (Cala 10 y Alvaro Barba). Predominaron los procesos de oxidación de sulfuros, disolución de calcita y dolomita e intercambio iónico inverso.

4). Zona de mezcla (IV), con 10-74 % de agua de mar, correspondiente a los niveles del Area de recarga ubicados más distantes de la costa (Sotolongo Díaz). Prevalcieron los procesos de oxidación de sulfuros, disolución de calcita, dolomitización e intercambio iónico inverso.

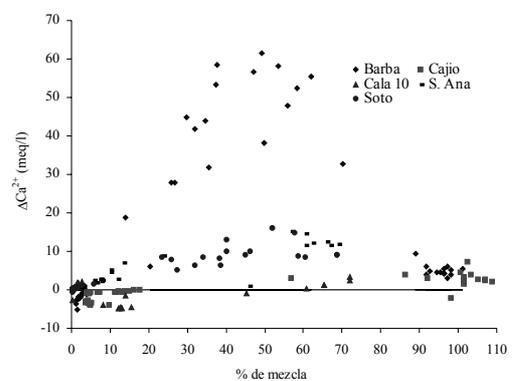
5). Zona de contacto agua dulce – agua de mar (V), con 98-100 % de mezcla, correspondiente a los niveles medio del pozo Playa Cajío y profundo de Alvaro Barba. Predominaron los procesos de oxidación de sulfuros, disolución de calcita, dolomitización e intercambio iónico directo.

6). Zona de agua dulce ligeramente salinizada (III), con 2 – 10 % de mezcla, correspondiente a los niveles someros y medios de los pozos ubicados cerca de la costa y del área de pantanos (Playa Cajío, Alvaro Barba y Cala 10). Ocurrieron procesos de reducción de sulfatos y reducción de sulfuros, precipitación de calcita, dolomitización e intercambio iónico directo.

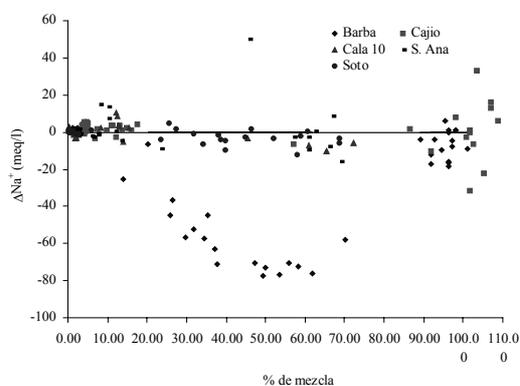
7). Zona de mezcla (IV), con 6 – 70 % de agua marina), correspondiente a los niveles medios y profundos de los pozos anteriores. Predominaron con gran intensidad procesos de reducción de sulfatos, disolución de calcita, dolomitización e intercambio iónico inverso.



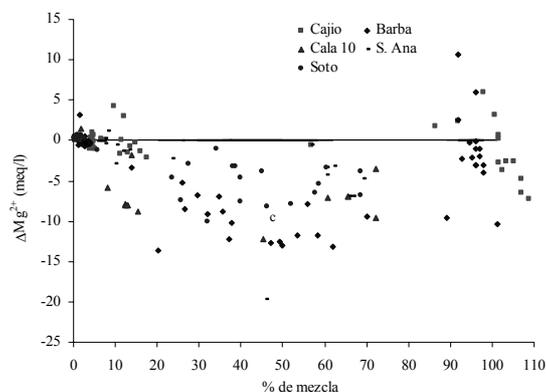
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4. Variación de los deltas iónicos con el porcentaje de agua de mar en la mezcla durante el período de enero 1997 a julio 1998 para los iones: SO_4^{2+} (a) Ca^{2+} (b), Na^+ (c) y Mg^{2+} (d).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que en la región objeto de estudio (tramo hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana), ocurren complejos procesos de mezcla, los cuales producen notables modificaciones en la composición química de las aguas y pueden ser evaluados cuantitativamente a partir de las relaciones iónicas con el Cl debido a su carácter conservativo en la mezcla agua dulce-agua de mar. De estos procesos, los más significativos son la reducción anaeróbica

de los sulfatos en la zona de mezcla y en la zona de contacto con el mar, los cuales tienden a producir a su vez, incrementos en los contenidos de calcio a expensas del material carbonatado del acuífero. Estos cambios pueden ser acelerados debido a la actividad del hombre y como resultado de todo ello, dar lugar a incrementos de la porosidad secundaria del acuífero kárstico por cavernamiento, así como producir un mayor deterioro de la calidad del agua.

BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, E, J.R. FAGUNDO e I. VINARDELL (1998). Automatización del control de los parámetros químicos físicos y la calidad de las aguas. En: Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. Hombre y Medio Ambiente. Editorial Academia, La Habana, 164-167.
- APHA, AWWA, WPCF, (1987). Standard methods for the examination of Water and Wastewater. Ed. American Public Health Association, Washington. Ed. 17, 1.5-3.12.
- BACK, W, B.B. HANSHAW, J.S. HERMAN and J.N. VAN DRIEL (1986). Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground-water mixing zone of coastal Yucatan, Mexico. *Geology*, 14 (2), 97-192.
- BARROS, O, y A. LEÓN. Recarga y acuosidad en cuencas de llanuras (1997). En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguada, Bilbao, 53-59.
- BITTON, G. (1994). Role of microorganisms in biogeochemical cycles. In: *Wastewater Microbiology*. Ed. Wiley-Liss, 51-73.

- BOLUDA, N., C. SEMPERE, y F. RUÍZ (1997). Hidrologeoquímica de la intrusión marina del acuífero Cuaternario de Jávea (Alicante). En: I Congreso Iberoamericano de Geoquímica. VII Congreso de Geoquímica de España. Soria 1997, Ed.: CEDEX, España, 465-470.
- CUSTODIO E. y R. LLAMAS (1976). 2ª Ed. Hidrología Subterránea, Ed.: Omega, Barcelona, 2350 pp.
- FAGUNDO, J.R. (1996). Química del Agua Kárstica. En: Hidroquímica del Karst. J.R. Fagundo, J.E. Rodríguez, J.J. Valdés, Universidad de Granada, 13-124.
- FAGUNDO, J.R. and P. GONZALEZ. Agricultural use and water quality at karstic west Cuban Southern plain. In: Karst and Agriculture in the World. International Journal of Speleology, (Italia)., 28 B (1/4): 175-185, 1999.
- FAGUNDO-SIERRA, J., J.R. FAGUNDO, P. GONZÁLEZ, M. SUÁREZ. Modelación de las aguas naturales. En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, La Habana. Soporte electrónico, 2001.
- FERRERA, V., J.R. FAGUNDO, P. GONZÁLEZ, I. MORRELL, A. PULIDO-BOCH, M.LÓPEZ-CHICANO y F. LÓPEZ-VERA. Caracterización Hidrogeoquímica de los acuíferos kársticos de la Cuenca y Zapata, Matanzas, Cuba. Voluntad Hidráulica, (91): 21-27, C. Habana, 1999.
- GIMÉNEZ, E. (1994). Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de salinización en el acuífero detrítico costero de la Plana de Castellón (España). Tesis Doctoral, 469 pp.
- GONZÁLEZ, P., J.R. FAGUNDO, G. BENÍTEZ, M. SUÁREZ y J. RAMÍREZ. Influencia de la reducción de sulfatos en los procesos de disolución y precipitación de carbonatos en un acuífero cársico costero. Ingeniería Hidráulica, 20 (3), 41-46, 1999.
- GONZÁLEZ, A. (1997). La recarga artificial contra la intrusión salina. ¿ Hasta dónde resulta eficaz en las formaciones cársicas?. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguiedad, Bilbao, 89-103.
- GONZÁLEZ, A. y R. FEITÓ (1997). Obras costeras contra la intrusión salina para el beneficio de los recursos explotables de una cuenca subterránea. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguiedad, Bilbao, 71-86.
- JIMÉNEZ, S., E.R. SANTIESTEBAN y J.A. ARENCIBIA (1997). Evolución de la intrusión marina en el acuífero de la costera Sur de La Habana. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguiedad, Bilbao, 115-123.
- MORELL I., E. GIMÉNEZ, J.R. FAGUNDO, A. PULIDO-BOSCH, M.L. LÓPEZ-CHICANO, M.L. CALVACHE y J.E. RODRÍGUEZ. Hydrogeochemistry and karstification in the Ciénaga de Zapata aquifer (Matanzas, Cuba). In: Karst Water and Environmental Impacts, Gunay and Johnson (Editors), Balkema, Rotterdam, Brookfield, 191-198, 1997.
- MILLER, R.L., W.L. BRAFORD and N.E. PETERS (1986). Specific conductance: theoretical considerations and application to analytical quality control. U.. Geological Survey Water-Supply. Paper 2311, 27 pp.
- SCHOELLER, H. (1962). Les eaux souterraines. Ed. Masson, Paris, 642 pp.
- WIGLEY, T.N.L. and L.N. PLUMMER (1976). Mixing of carbonate waters. Geochimica et Cosmochimica Acta.