

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO KÁRSTICO COSTERO DEL SECTOR GÜIRA-QUIVICÁN (CUENCA SUR HABANA). I: SALINIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE AGUA DE MAR

González, A.¹; J.R. Fagundo²; P. González²; E. Romero¹; S. Jiménez³; G. Benítez⁴
D. Orihuela¹; V. Ferrera³; J. Ramírez² & M. Suárez²

Resumen - evalúa la salinidad de las aguas subterráneas en el acuífero kárstico costero del sector Güira-Quivicán (Cuenca Sur de la Habana), en el período 1997-1998, en función de los porcentajes de agua de mar en la mezcla, con el objetivo de definir las zonas hidrogeoquímicas, evaluar las afecciones debidas a la recarga, a la intrusión marina o a la actividad del hombre, e interpretar los procesos geoquímicos que tienen lugar en el acuífero.

Palabras clave - acuífero costero, karst, mezcla agua dulce-agua salada, zonas hidrogeoquímicas, intrusión marina.

INTRODUCCIÓN

El acuífero Güira-Quivicán se sitúa en la Cuenca Sur de la Habana entre las coordenadas N320-345 y E340-370 (Figura 1) y su superficie es de 50 km² con cotas absolutas que varían entre 1 y 2 m sobre el nivel de mar. La región está constituida por rocas carbonatadas muy permeables de edad Neógeno, pertenecientes a las formaciones Jaruco, Husillo, Cojimar y Güines. Es un acuífero kárstico cuya trasmisividad varía entre 5.000 y 50.000 m²/día, mientras el coeficiente de almacenamiento alcanza valores entre 0.15 en condiciones de acuífero libre hasta 0.005 en condiciones de semiconfinamiento (González, 1997).

En esta región se desarrolla un relieve típico de llanura erosiva denudativa, caracterizada por la presencia de diversas formas de tipo exo y endokársticas, tales como

¹ Escuela Politécnica Superior. Campus de La Rábida. 21819-Palos de la Frontera. Huelva. España. E-mail: arsenio@uhu.es, Grupo de Hidrogeología y Medio Ambiente. Universidad de Huelva. España.

² Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina". La Habana. Cuba.

³ Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). La Habana. Cuba.

lapiaz o “diente de perro”, ponors, dolinas, uvalas, simas, cuevas, casimbas o cenotes, caletas, etc. El drenaje superficial es muy pobre y predomina el flujo subterráneo.

Los sedimentos de cobertura son de tres tipos: aluvial-preluvial, constituido por suelos con gravas, arenas y arcillas, que alcanzan entre 1 y 3 m de espesor; eluvial, el más abundante, constituido por arcillas con espesores entre 3 y 10 m; palustre, compuesto por arcillas lacustres, arenas y turbas de espesores entre 3 y 4 m (López, 1992, in Jiménez et al., 1997).

Desde el punto de vista estructural destaca un grupo de fracturas principales orientadas N60° y 150° y otro grupo con menor desarrollo entre N30° y 40°. Estas fracturas regulan el drenaje, que se produce con flujos preferentes a través de conductos muy permeables (Rocamora et al., 1997). En sentido vertical, existe un desarrollo de cavernas asociado a las fluctuaciones glacioeustáticas ocurridas durante el Pleistoceno, que se agrupan principalmente entre las cotas +100 y -70 m (Molerio y Flores, 1997). Los trabajos geofísicos ejecutados en pozos en zonas kársticas costeras de Cuba indican que la velocidad de circulación de las aguas subterráneas es mayor en los primeros 15 a 40 m de profundidad en el acuífero, pudiendo alcanzar valores de hasta 20 m/día y aún mayores (González y Feitó, 1997).

Las precipitaciones medias anuales en el área son de 1398 mm, algo menores que la media nacional (1375 mm). Esa cifra es también menor que la registrada en otras regiones del Caribe: 1930 mm en Trinidad (Granger, 1982) y entre 2000 mm en el período seco hasta cerca de 5000 mm en el período húmedo en las regiones montañosas de Guadalupe (Jeremie, 1982). La mayor parte de las lluvias de la Cuenca Sur de la Habana corresponden a eventos de tipo convectivo y ciclones tropicales que se producen en el período húmedo (mayo-octubre). También se producen eventos lluviosos en el período seco o menos húmedo (noviembre-abril), en ocasiones notables, asociados principalmente a los frentes fríos.

El buen drenaje de los suelos, el alto grado de karstificación de las rocas y la gran transmisividad del acuífero, hacen que exista un déficit de recursos hídricos en este sector de la cuenca, a pesar del volumen de lluvia. Las razones son varias. 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 es la salinización de las aguas subterráneas en la región por la intensa explotación a que ha sido sometido el acuífero para el abasto a la población habanera y para el riego de las plantaciones

⁴ Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC). La Habana. Cuba.

agrícolas. Los acueductos agrupados en un campo de pozos han llegado a extraer un caudal del orden de $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ y los sistemas de riego de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (López, 1992, in 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, y la construcción del Dique Sur, consistente en una barrera impermeable con una altura entre 1 y 1.5 m sobre el nivel del mar. Todo esto, 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 aguas (González, 1997).

Este trabajo, primero de una serie de tres artículos sobre la problemática hidrogeológica del sector, tiene como objetivo mostrar el comportamiento de la salinidad de las aguas en la región en función del porcentaje de agua de mar en la mezcla, lo que permitirá conocer la evolución espacial y temporal de la calidad de las aguas subterráneas kársticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se ha realizado en una red de observación para el monitoreo de los niveles piezométricos y la calidad de las aguas subterráneas. Se seleccionó un perfil de pozos orientado en dirección N-S (Figura 2). El muestreo de agua se realizó con periodicidad mensual a partir del mes de enero de 1997, a tres profundidades diferentes representativas de las zonas de agua dulce, agua de mezcla (interfaz) y agua salada. Se seleccionaron 7 pozos (Figura 2): Playa Cajío (a 200 m de la línea de costa, cota topográfica 0.91 m, muestreo a 2, 17-18 y 19-23 m de profundidad), Álvaro Barba (a 2500 m de la costa, cota topográfica 1.87 m, muestreo a 3, 23 y 25-34 m), Cala 10 (a 4500 m de la costa, cota topográfica 1.97 m, muestreo a 2-10, 20.5 y 25 m), Santa Ana (a 4900 m de la costa, cota topográfica 4.73 m, muestreo a 5, 20-30 y 38 m), Liliana Dimitrova (a 8600 m de la costa, cota topográfica 8.96 m, muestreo a 8, 44.5, 46 y 50 m), Sotolongo Díaz (a 9000 m de la costa, cota topográfica 10.86 m, muestreo a 10-11, 40, 43 y 50 m) y Rancherita (a 13500 m de la costa, cota topográfica 16 m, muestreo a 20 m de profundidad).

Los registros de conductividad eléctrica in situ a diferentes profundidades se realizaron con un equipo ORION 524 con 100 m de cable, tomándose las muestras mediante hidrocaptos modelo SEBA de nacionalidad alemana.

Los cálculos del porcentaje de agua de mar en las muestras se realizaron tomando al ión cloruro como conservativo mediante la fórmula siguiente:

$$\text{Porcentaje de mezcla} = \frac{[\text{Cl}^-]_{\text{muestra}} - [\text{Cl}^-]_{\text{agua dulce}}}{[\text{Cl}^-]_{\text{agua de mar}}} \times 100$$

Como representativo del agua dulce se tomó el pozo Rancherita (Figura 2), donde las concentraciones de Cl^- (del orden de 1 meq/l) son controladas únicamente por las lluvias y los procesos de evapotranspiración que se producen en la zona no saturada del acuífero. La muestra representativa de agua de mar se tomó en la Playa Cajío (Figura 2), el punto más meridional de la zona de estudio.

Para el cálculo de los porcentajes de agua de mar en la mezcla, en aquellos tramos de profundidad donde no fueron tomadas muestras, se utilizó la conductividad eléctrica obtenida a través de los registros verticales (Figura 3). Para ello, y en cada pozo, se utilizó la correlación estadística entre la conductividad eléctrica y el porcentaje de mezcla a las profundidades en que se tomaron muestras (Tabla 1). El procesamiento de los datos se ha realizado con EXCEL, ACCESS y GRAPHERWIN.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. SALINIDAD DE LAS AGUAS EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE AGUA DE MAR EN LA MEZCLA

De acuerdo con los porcentajes de agua de mar en la mezcla, calculados en las diferentes muestras, se procedió a hacer una clasificación de las distintas zonas hidrogeoquímicas que conforman el acuífero (Tabla 2).

Estos resultados indican que existen cinco zonas hidrogeoquímicas diferentes en el acuífero:

- zona I (agua dulce),
- zonas II y III (agua de baja salinidad): frente de avance de la intrusión marina,
- zona IV (agua salobre): cuña salina, interfaz o zona de mezcla con intrusión marina consolidada,
- zona V (agua salada de mar).

Los resultados muestran también que en la parte alta de la zona de mezcla (IVa) es donde se presentan las mayores variaciones en los valores del porcentaje de mezcla, encontrándose rangos que van desde un 2 hasta un 24 %, lo que confiere gran variabilidad a esta zona y mayor reactividad desde el punto de vista hidroquímico.

2. VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL CONTENIDO DE CLORURO EN LAS AGUAS

Como el contenido de Cl^- en los acuíferos kársticos costeros está asociado fundamentalmente al fenómeno de intrusión marina, la concentración de este ion a las diferentes profundidades en que se tomaron las muestras en los pozos brinda una valiosa información acerca del grado de desarrollo de este fenómeno.

El empleo de métodos geoestadísticos permite apreciar la distribución espacial de la concentración de Cl^- e interpretar el efecto del fenómeno de intrusión marina y de la ocurrencia de heterogeneidades hidrogeoquímicas en el acuífero. Para ello se han realizado mapas de isocontenido en Cl^- (g/l) tomando el valor medio de la concentración de este ion en cada zona hidrogeoquímica identificada en el acuífero (Tabla 2). Hemos pretendido así observar en un mismo gráfico la evolución de la calidad de las aguas en el acuífero desde las áreas de alimentación hasta las de descarga y conocer la geometría de las diferentes zonas hidrogeoquímicas detectadas (Figura 4).

Se observa que en el nivel superficial (aguas con baja salinidad) la concentración de Cl^- aumenta con la proximidad a la costa (Playa Cajío), efecto típico de la zona de avance de la cuña salina. No ocurre así en la zona de mezcla consolidada, tanto en su parte alta como en la baja, donde las concentraciones de Cl^- aumentan en los alrededores de los pozos Álvaro Barba y Sotolongo Díaz, apreciándose una disminución en las proximidades del pozo Santa Ana que se encuentra ubicado entre los dos pozos anteriores. Esta anomalía es típica de la presencia de un cono de descenso producto de la sobreexplotación del acuífero en esos dos pozos, y controla la distribución del ión Cl^- en este nivel intermedio del acuífero, muy sensible a los cambios del porcentaje de mezcla como se ha visto en la Tabla 2. En el caso de la zona inferior (agua salada de mar), se observa que disminuye la concentración de Cl^- en dirección sur-norte a medida que nos alejamos de la costa, aunque esta disminución es mayor en dirección sureste y noreste en la diagonal donde se encuentran situados los pozos Santa Ana y Liliana Dimitrova.

Estos fenómenos también se pueden observar en la Figura 5, en la que se presenta la evolución de los porcentajes de mezcla con la profundidad en que fueron tomadas las muestras en cada uno de los puntos de la red de control y con la distancia de cada uno al

mar. En este perfil se han delimitado las zonas hidrogeoquímicas determinadas con anterioridad, para observar la geometría de la zona de mezcla y de la cuña salina. Se observa que la morfología de la superficie que separa las diferentes zonas hidrogeoquímicas está distorsionada por los efectos ya comentados de sobreexplotación del acuífero en los pozos Álvaro Barba y Sotolongo Díaz, lo que da origen, además, a la presencia de un “umbral de mezcla” entre ambos que hace que los porcentajes de mezcla en el pozo Santa Ana sean menores que los que se observan en el resto, hecho que confirma lo observado en la figura 4.

Tal como señala Aminot (1974), una variable hidroquímica tiene validez limitada para fines de caracterización, y una mayor información se obtiene de la evolución temporal del quimismo de las aguas en las emergencias o en pozos a lo largo de un perfil. Como la composición química del agua evoluciona en su movimiento a través de los sistemas carbonatados, la información hidroquímica obtenida en determinados sitios de control ofrece una información adicional acerca del tiempo de residencia y de las condiciones en que se mueve el agua.

En la Figura 6 se muestran los resultados de la variación en el tiempo (período enero 1997 a mayo 1998) del contenido en Cl^- (meq/l) y su relación con las precipitaciones para las tres profundidades de muestreo, correspondientes a las zonas hidrogeoquímicas definidas con anterioridad, en tres de los pozos más representativos de la red de control: Sotolongo Díaz (a), Alvaro Barba (b) y Playa Cajío (c).

Del análisis de estas series cronológicas se deduce la existencia de dos patrones de fluctuación diferentes: uno que no responde al régimen de precipitación, representado por el pozo Playa Cajío a 3 m (Figura 6 c), lo que puede deberse a la influencia de las mareas ya que este pozo se encuentra apenas unos 200 metros de distancia del mar, y otro, que presenta una respuesta más o menos desplazada en tiempo, que incluye a los pozos Sotolongo Díaz y Álvaro Barba (en los tres niveles de profundidad, Figura 6 a y b) y al propio pozo Playa Cajío a las restantes profundidades (Figura 6 c), con tiempos de memoria del acuífero entre 1 y 3 meses, lo cual es propio de un acuífero carbonatado con gran desarrollo kárstico.

CONCLUSIONES

El acuífero kárstico costero del sector Güira-Quivicán (Cuenca Sur de La Habana) presenta zonas hidrogeoquímicas bien diferenciadas con relación al porcentaje de agua de mar en la mezcla como resultado del efecto combinado de la recarga por lluvia, el aporte de una zona de marismas cercano a la costa, el efecto de la intrusión marina -

principal responsable de la salinización del acuífero- y la actividad del hombre que sobreexplota el acuífero para el abasto a la población y riego agrícola.

La variación espacial del contenido en Cl⁻ de las aguas refleja el efecto de la heterogeneidad y la sobreexplotación local en el acuífero, y la variación temporal del mismo pone de manifiesto patrones de evolución controlados por el régimen de precipitación y de marea.

El efecto combinado de estos factores es un complejo desarrollo kárstico, consecuencia de los procesos geoquímicos que han tenido lugar durante el Cuaternario, en condiciones de cambio de nivel oceánico y movimientos neotectónicos -ascenso y descenso regional-.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de los resultados obtenidos en las actividades hispano-cubanas desarrolladas durante los años 1997 a 1999 en el proyecto conjunto Evaluación Automatizada de los Acuíferos Cársicos Costeros ante el Impacto del Hombre y los Cambios Globales, en el marco del convenio entre la Dirección General de Universidades de la Junta de Andalucía y la Agencia Española de Cooperación Internacional para ayudas en materia de Cooperación Universitaria Andaluza con los Países de Lengua Hispana de Centroamérica y Caribe Insular, y se ha llevado a cabo a través de la Universidad Internacional de Andalucía (Sede Iberoamericana de La Rábida, Huelva, España).

REFERENCIAS

- Aminot, A. (1974). *Geochimie des eaux d'aquiferes karstiques. 2- Les analyses chimiques en Hydrologie Karstique*. Ann. Speleol., 29 (4): 462-486.
- González, A. (1997). La recarga artificial contra la intrusión salina. ¿Hasta dónde resulta eficaz en las formaciones cársicas?. *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*, 89-103. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguada, Eds. Bilbao.
- González, A. y R. Feitó (1997). Obras costeras contra la intrusión salina para el beneficio de los recursos explotables de una cuenca subterránea. *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*, 71-86. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguada, Eds. Bilbao.
- Granger, O.E. (1982). Climatic fluctuations in Trinidad, West Indies and their implications for water resources planning. *Caribbean Journal of Science*, Univ. Puerto Rico, 17 (1-4), 173-201.

- Jeremie, J.J. (1982). Contribution a l'étude géochimique des eaux souterraines froides de la basse-terre (Guadeloupe, Petites Antilles). *Caribbean Journal of Science*, Univ. Puerto Rico, 17 (1-4), 133-150.
- Jiménez, S., E.R. Santiesteban, J.A. Arencibia (1997). Evolución de la intrusión marina en el acuífero de la costera Sur de La Habana. *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*, 115-123. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguada, Eds. Bilbao.
- Molerio, L.F., E. Flores (1997). Paleoclimas y paleocarsos: los niveles de cavernamiento y la variabilidad del clima tropical en el golfo de México y el Caribe. *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*, 225-223. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguada, Eds. Bilbao.
- Rocamora, E., M.G. Guerra, E. Flores (1997). Factores morfoestructurales e intrusión marina en acuíferos carbonatados. Caso de estudio, Cuenca Sur de La Habana. *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*, 175-185. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguada, Eds. Bilbao.



Figura 1. Localización geográfica del sector de estudio

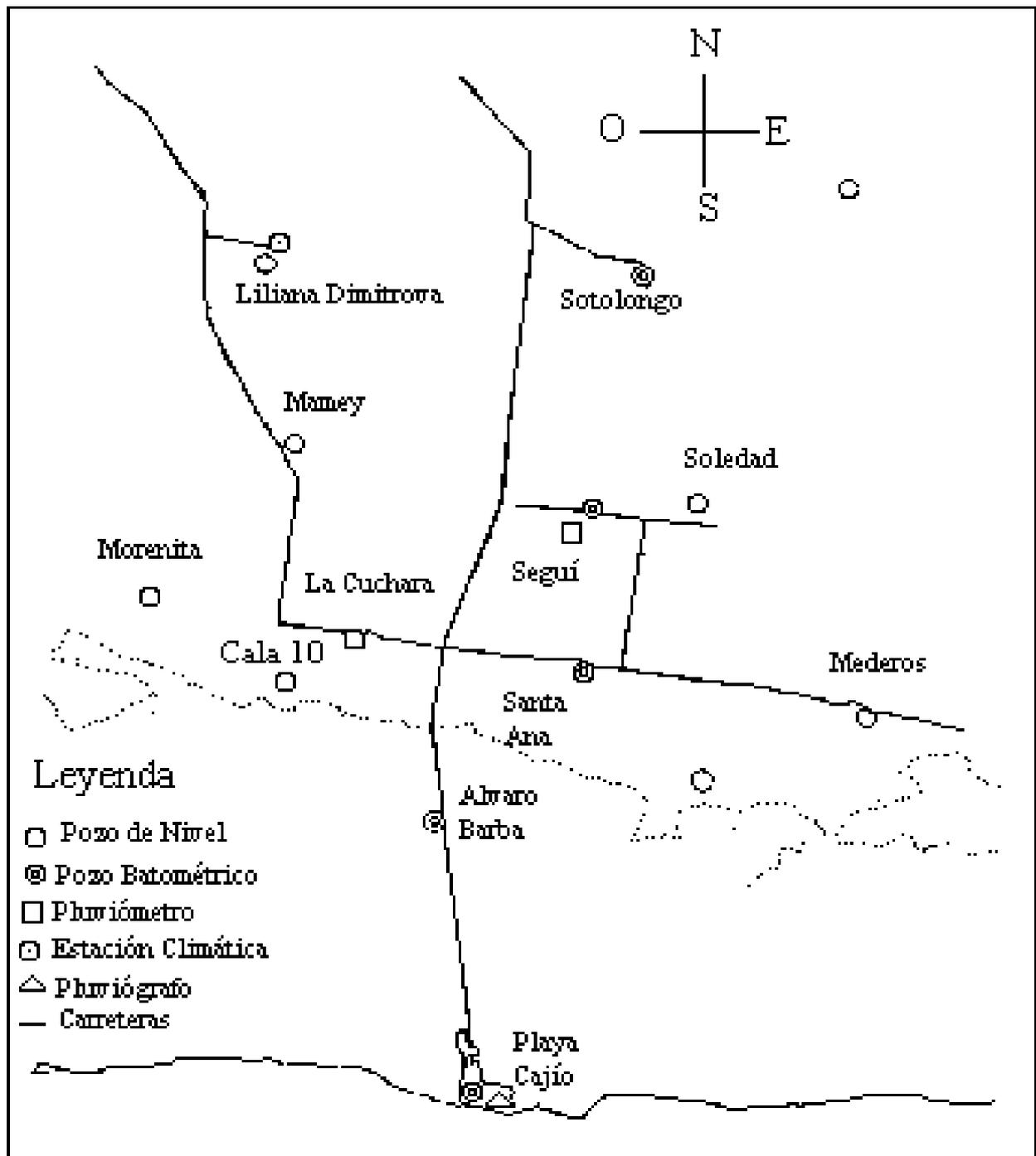


Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo

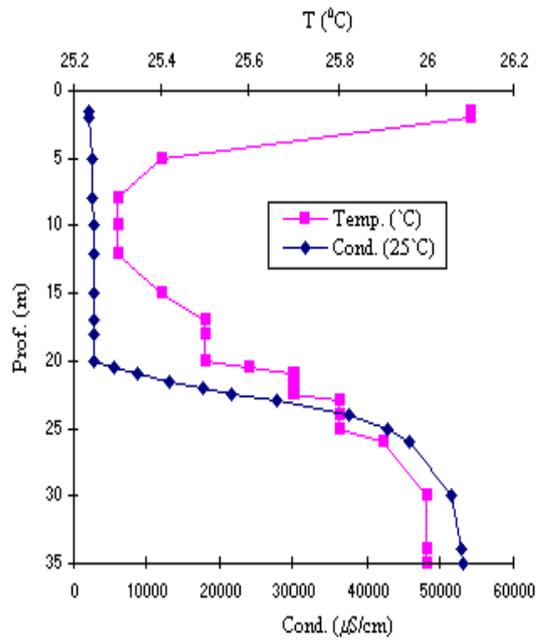


Figura 3. Registro vertical de conductividad eléctrica y temperatura (pozo Álvaro Barba, 14 julio 1997)

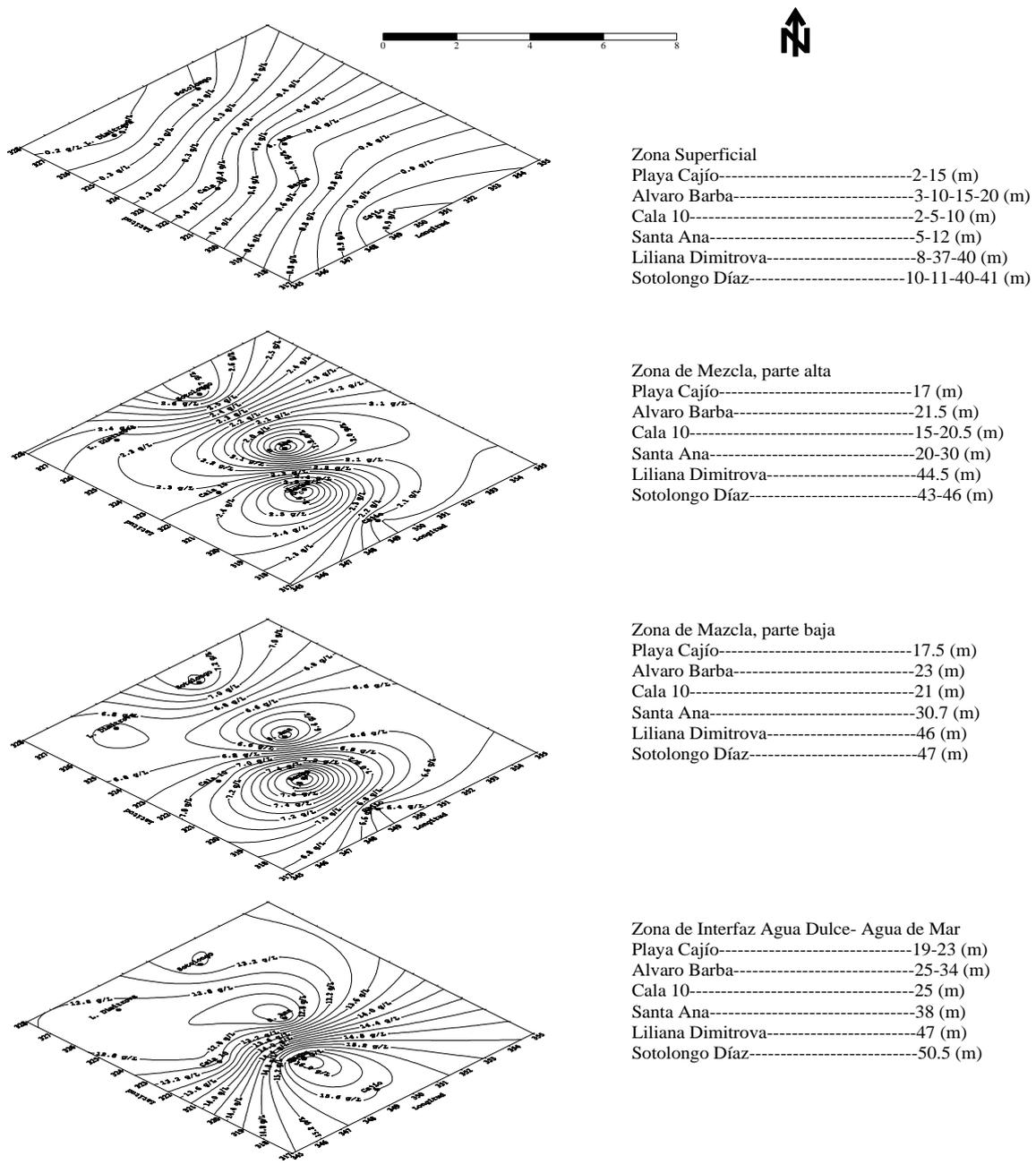


Figura 4. Mapas de isocontenido en Cl⁻ (g/l) para las principales zonas hidrogeoquímicas identificadas en el acuífero Güira-Quivicán (Cuenca Sur de La Habana)

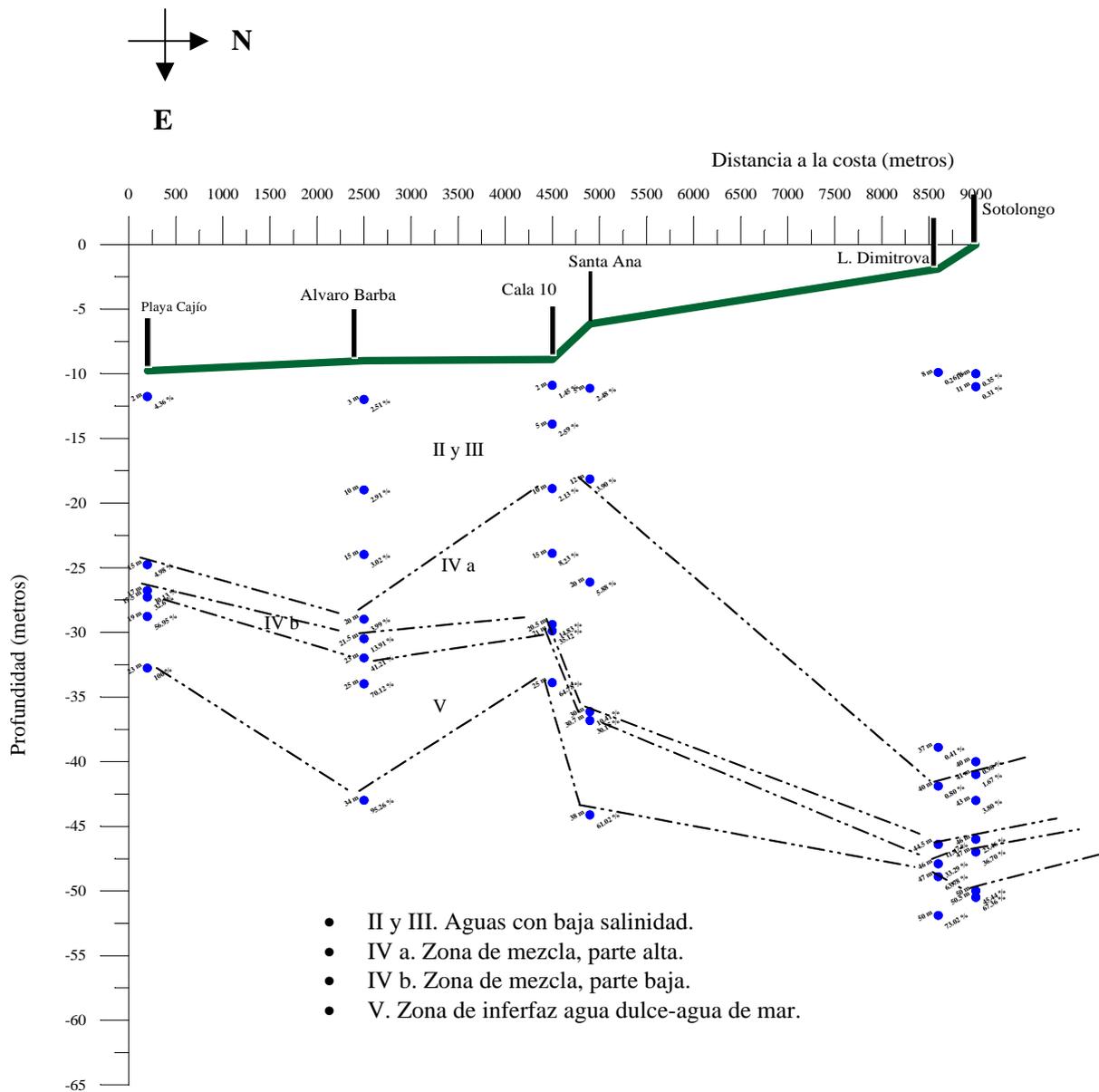
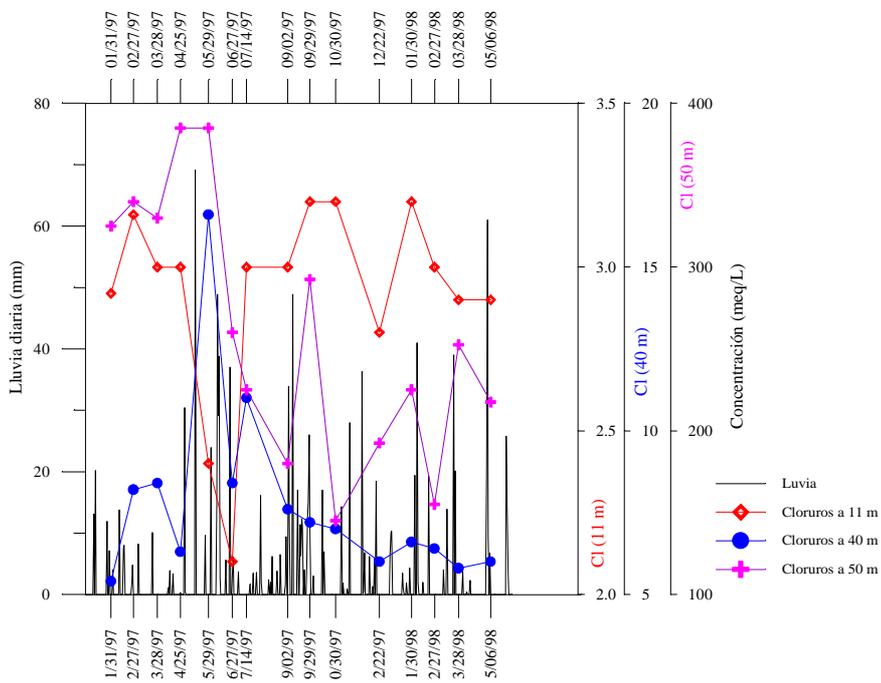


Figura 5. Perfil de porcentaje de mezcla en función de la profundidad y la distancia a la costa, en los principales pozos de la red de control (acuífero Güira-Quivicán, Cuenca Sur de La Habana)

(a)



(b)

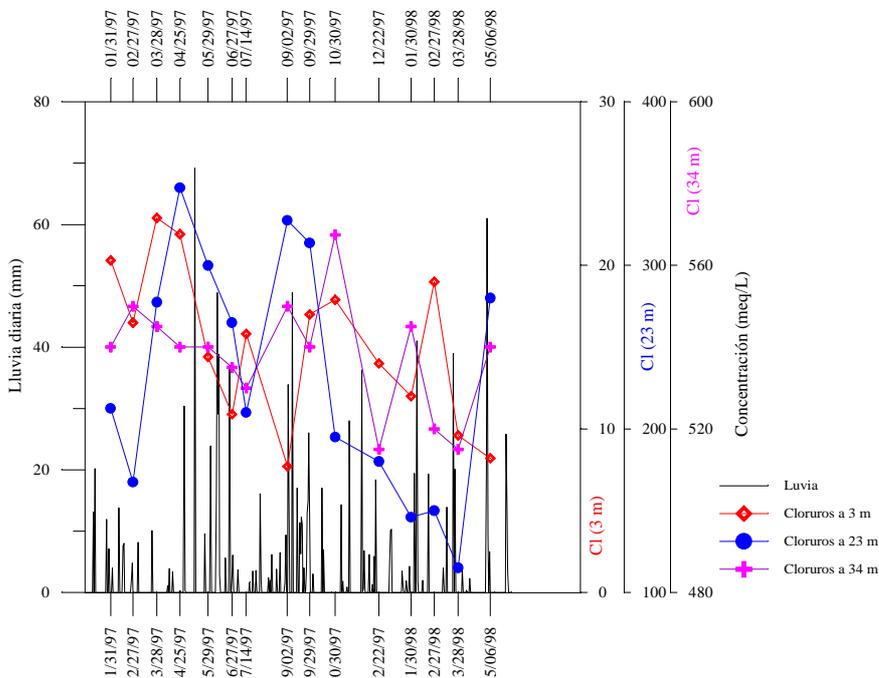


Figura 6. Variación temporal de Cl⁻ (meq/l) con las precipitaciones en pozos representativos del acuífero Güira-Quivicán (Cuenca Sur de La Habana) en el período enero 1997–mayo 1998. (a) Sotolongo Díaz, (b) Álvaro Barba, (c) Playa Cajío

(c)

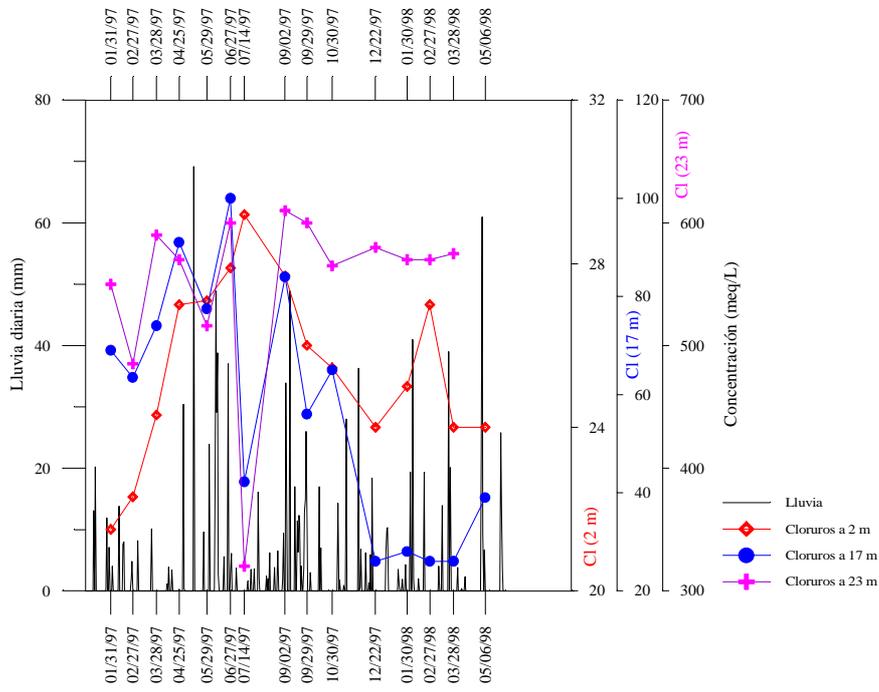


Figura 6 (continuación)

Pozo	Ecuación	Coefficiente de correlación (r)
Sotolongo Díaz	% mez.=0.0101-5.4645*CE	0.9959
Liliana Dimitrova	% mez.=0.0102-9.0374*CE	0.9992
Santa Ana	% mez.=0.0105-8.5369*CE	0.9993
Cala 10	% mez.=0.0106-10.313*CE	0.9990
Álvaro Barba	% mez.=0.0111-8.3954*CE	0.9976
Playa Cajío	% mez.=0.0113-11.942*CE	0.9972

Tabla 1. Correlación estadística porcentaje de mezcla-conductividad eléctrica en los pozos con muestra de agua subterránea (5 % de error)

Pozo	Profundidad (m)	% mezcla	TSD (g/l)	CE (:S/cm)	Nº	Zona Hidrogeoquímica Tipo de agua presente
Rancherita	20	0	0.5	655-765	I	Agua dulce
L. Dimitrova	8-37-40	0.3-0.8	0.6-0.8	948-1300	II	Agua dulce muy poco salinizada
Sotolongo Díaz	10-11	0.2-0.4	0.6-0.7	598-1000	II	Agua dulce muy poco salinizada
Cala 10	2-10	0.4-2.1	0.6-1.2	887-1831	II	Agua dulce muy poco salinizada
Playa Cajío	2-15	3.6-5.0	1.8-2.3	2600-4000	III	Agua dulce ligeramente salinizada
Álvaro Barba	3-10-15-20	1.2-4.0	0.7-1.9	999-3000	III	Agua dulce ligeramente salinizada
Cala 10	5	2.6	1.4	2600	III	Agua dulce ligeramente salinizada
Santa Ana	5-12	2.1-3.9	1.2-1.9	1730-3000	III	Agua dulce ligeramente salinizada
Sotolongo Díaz	40-41	0.8-2.7	0.7-1.5	1000-2520	III	Agua dulce ligeramente salinizada
Playa Cajío	17	4.5-18	2-6.8	3340-10080	IV a	Agua salobre (zona de mezcla, parte alta)
Álvaro Barba	21.5	14.0	4.5	8070	IV a	Agua salobre (zona de mezcla, parte alta)
Cala 10	15-20.5	8.2-23.7	2.8-5.2	5400-9680	IV a	Agua salobre (zona de mezcla, parte alta)
Santa Ana	20-30	5.9-23.6	2.5-8.6	4290-13000	IV a	Agua salobre (zona de mezcla, parte alta)
L. Dimitrova	44.5	11.4	4.7	7280	IV a	Agua salobre (zona de mezcla, parte alta)
Sotolongo Díaz	43-46	2-23.5	1.1-8.7	1823-13690	IV a	Agua salobre (zona de mezcla, parte alta)
Playa Cajío	17.5	32.6	10.9	17000	IV b	Agua salobre (zona de mezcla, parte baja)
Álvaro Barba	23	20.3-61.8	6.7-19.7	11800-32000	IV b	Agua salobre (zona de mezcla, parte baja)
Cala 10	21	35.12	12.5	19630	IV b	Agua salobre (zona de mezcla, parte baja)
Santa Ana	30.7	30.15	10.9	17000	IV b	Agua salobre (zona de mezcla, parte baja)
L. Dimitrova	46	33.3	12.3	20600	IV b	Agua salobre (zona de mezcla, parte baja)
Sotolongo Díaz	47	36.70	13.4	21000	IV b	Agua salobre (zona de mezcla, parte baja)
Playa Cajío	19-23	57-100	20.1-38.9	31000-54000	V	Agua salada
Álvaro Barba	25-34	70.1-100	22.9-35.2	35700-52000	V	Agua salada
Cala 10	25	45.3-72.1	15.3-25.2	26500-38800	V	Agua salada
Santa Ana	38	45.8-69.4	18.9-24.8	32100-38000	V	Agua salada
L. Dimitrova	47	63.7	23	36000	V	Agua salada
Sotolongo Díaz	50.5	67.36	24.3	38000	V	Agua salada
Agua de Mar	2	100	34.2-35.4	46300-50900		Agua salada

Tabla 2. Zonas hidrogeoquímicas del acuífero Güira-Quivicán (Cuenca Sur de la Habana) en función del porcentaje de mezcla agua dulce-agua de mar, total de sólidos disueltos (TSD) y conductividad eléctrica (CE) de las muestras de agua