

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO CÁRSICO EN LA ZONA AL OESTE DE CABO ENGAÑO, EN LA PLANICIE ORIENTAL, REPÚBLICA DOMINICANA

Ernesto Rocamora Álvarez⁽¹⁾ y Leslie Molerio León⁽²⁾

(1) Instituto de Geofísica y Astronomía, Calle 212 No. 2906 e/ 29 y 31, La Lisa, Ciudad de La Habana, Cuba, ZIP 11600, E-mail: rocamora@iga.cu

(2) Inversiones GAMMA S.A., Cuba, Calle 2 e/ 1ra y 3ra, Playa Ciudad de La Habana.

RESUMEN

Dentro de los límites de la extensa región geomorfológica de la Planicie Oriental al Este de La República Dominicana, se distribuye una zona donde se emplazará un proyecto de urbanización y donde la dinámica de las aguas subterráneas es un factor que condiciona su desarrollo y ocupación territorial.

La yacencia de las aguas subterráneas corresponde con un sistema de flujo hacia el Este, que a escala local adquiere particularidades establecidas por el campo de propiedades físicas del macizo y por acciones antrópicas de explotación.

Los flujos en el acuífero local están representados por la componente principal hacia el Sureste y Este, con vías preferenciales de conducción establecidas por la fracturación del macizo y la carsificación.

La diferencia entre la estructura del acuífero en marea baja y marea alta es muy poca, lo cual es un indicador de la influencia del desarrollo de la carsificación en el macizo.

Se presenta un mapa de isolíneas de mineralización de las aguas subterráneas, con configuración similar a las hidroisohipsas.

La caracterización de la hidrodinámica y la hidroquímica en este sector del acuífero, permitió el reordenamiento de la urbanización propuesta, incrementando los porcentos de áreas libres de cobertura impermeable, la inserción dentro del proyecto de los acuatorios interiores existentes, el ajuste de los criterios de explotación de aguas subterráneas en el territorio y estableció recomendaciones sobre las modificaciones en la franja costera.

ABSTRACT

Inside the limits of geomorphologic region of the Planicie Oriental to the East of Dominican Republic, is an area where will be distribute the urbanization project and where the dynamics of groundwater is a factor that conditions its development.

The groundwater corresponds with a system of flow to the East that it acquires particularities by the physical properties of the massif and for antropics actions of water supplies.

The flows in the aquifer are represented by the main component toward the Southeast and East, with preferential direction those established by the massif breakage and karstification.

The difference among the aquifer structure of the low tide and high tide is very little, which is an indicator of the influence of the massif karstification.

They are present a map of groundwater mineralization, with similar configuration that the hidroisohyps.

The characterization of the hydrodynamics and the hydrochemistry of the aquifer, allowed the orientation of urbanization, increasing the percent of areas without impermeable cover, the insert into the project of the existing lagoon, the adjustment of the groundwater exploitations for Hotel supplies and it established recommendations about the coastal border modifications.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo a los interés de urbanización de una zona al Oeste de Cabo Engaño en la región Este de la República Dominicana, se realizaron las investigaciones hidrogeológicas correspondientes, por cuanto estos aspectos relacionados con las aguas subterráneas locales serían los que determinarían en gran medida el emplazamiento de los objetos de obra del proyecto y de las modificaciones de la llanura costera.

La zona de estudio abarcó un área de 8200000 m² desde la línea de costa hasta las terrazas marinas emergidas en el interior de la llanura costera regional y limitada por el Oeste por la franja de amortiguamiento de la Laguna Bávaro (Figura 1).



Figura 1.- Ubicación del territorio del proyecto.

Volúmenes de trabajo

Previo al comienzo de los trabajos de perforación de calas y pozos, se realizaron marcharrutas donde fueron establecidos más de 150 puntos de referencia, con descripción de litologías en afloramientos de rocas, se midieron los elementos de su buzamiento, la distribución del agrietamiento y sus propiedades geomecánicas y los espesores de sedimentos de cobertura. En ocho de estos puntos, se excavaron calicatas de 0.30-0.50 m de profundidad, donde aleatoriamente se realizaron pruebas de vertimiento expreso para el cálculo del coeficiente de filtración.

Como parte del levantamiento hidrogeológico, se midieron 38 puntos donde la presencia de agua podría estar relacionada con el acuífero local, y en 10 de estos se pudo caracterizar la distribución espacial del agrietamiento que condiciona la hidrodinámica de infiltración local. Otros puntos de interés hidrogeológico, que fueron estudiados "in situ", estuvieron representados por oquedades cársticas, superficiales y ampliadas por acciones antrópicas, pero con yacencia de aguas subterráneas, y por dos sumideros cársticos, distribuidos en la zona central del territorio, los cuales se caracterizaron en cuanto a parámetros de capacidad hidráulica de conducción.

Se localizaron 6 pozos artesanos, construidos años atrás, y otros dos pozos con diámetro de 8" y emboquillados con tubería de PVC, perforados con fines de investigación. En todos estos puntos fueron medidos los parámetros físicos de las aguas e incorporados a las bases de datos, con sus respectivas limitaciones por el deterioro y abandono de estas obras.

Se perforaron 15 calas por método a rotación con recuperación continua de testigos, en sondeos de espesor de 1.00 m. Se utilizó el sistema de doble tubo y la extracción de las muestras fue con portatestigos de diámetro de 40 mm. La recuperación promedio fue del 90% lo cual posibilitó una elevada efectividad en la determinación del RQD de las rocas.

Para la ejecución de las pruebas hidrogeológicas se perforaron cuatro pozos de diámetro 8" y profundidad de hasta 20 m, por método de percusión, donde se instalaron bombas de agua sumergibles con capacidad de bombeo de hasta 100 l/s. Los pozos fueron encamisados con PVC ranurados.

Durante el periodo de las investigaciones de campo, se desarrollaron una serie de ensayos "in situ", para obtener los parámetros hidrodinámicos del acuífero, obtener datos sobre el coeficiente de filtración en las rocas de la zona no saturada y comprobar las alteraciones de la hidroquímica local en régimen dinámico de bombeo. Los ensayos realizados fueron: ocho pruebas de vertimiento no estabilizado en calicatas, tres pruebas de vertimiento en calas con caudales continuos de 4 l/s y mediciones hasta la recuperación a los niveles estáticos, siete aforos de caudal constante de 10 l/s durante 24 horas con mediciones continuas de conductividad eléctrica (SPC), temperatura (tm), salinidad (S) y sólidos disueltos totales (TDS); cuatro aforos de caudal constante de 25 l/s durante 48 horas con igual medición de parámetros físicos "in situ". Antes durante y después de los aforos se tomaron 25 muestras de aguas subterráneas.

Para el muestreo se tuvieron en cuenta criterios sobre la profundidad de las aguas subterráneas, la ocurrencia de precipitaciones y su intensidad y duración, el régimen de mareas, la localización de los puntos de muestreo con respecto a lagunas y a la línea de costa, y a las condiciones de las obras de captación. Este último aspecto se relacionó con los pozos antiguos donde antes de los muestreos se comprobó su relación efectiva con las aguas subterráneas ejecutando cubeteos de más de 2 veces el volumen del pozo.

Los ensayos de laboratorio a las aguas subterráneas fueron de macroconstituyentes (Ca, Na, Mg, K, HCO₃, SO₄, Cl), nutrientes (NH₄, NO₂, NO₃, P), metales (Cd, Ni, Cu, Fe, Mg, Pb, Co, Zn, Se, Sr), grasas y aceites e hidrocarburos totales.

Principales características geológicas y geomorfológicas

El territorio del proyecto se encuentra ubicado en la Planicie Costera Oriental, dominada por rocas de facies calcáreas y calcáreo-terrágenas de edad cuaternaria, que formaron parte de una extensa cuenca somera de deposición carbonatada limitada por arrecifes coralinos (Figura 2).

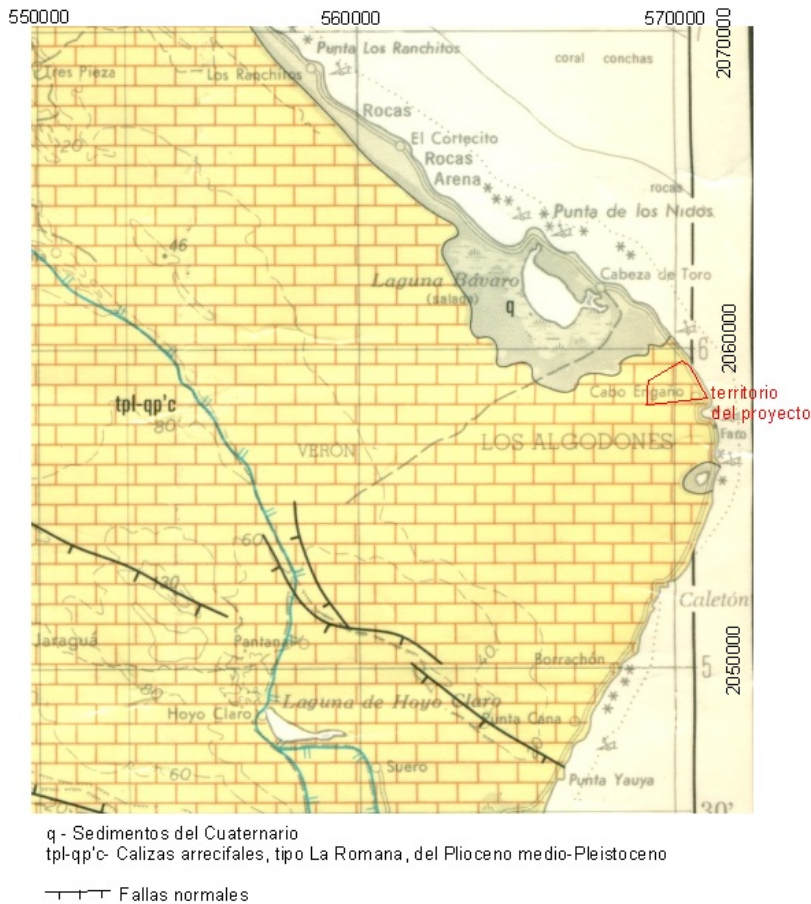


Figura 2.- Mapa geológico regional con ubicación del territorio del proyecto

Las rocas predominantes están representadas por calizas arrecifales (tpl-qp'c) de edad Plioceno medio – Pleistoceno, observándose diferentes facies que reflejan las diferentes unidades morfológicas que constituían la cuenca arrecifal en el momento de su formación. Estos depósitos arrecifales no son continuos y su ubicación en el corte no se corresponde con una secuencia cronológica, observándose indistintamente transiciones laterales y verticales de uno a otro

Facies altamente fosilíferas, con abundantes restos de gasterópodos, braquiópodos y lamelibranchios, relativamente más compactas y de mayor dureza. Tienen escasa potencia, son muy continuas y tienen una gran extensión superficial en la zona próxima a la costa, donde han sufrido un proceso de recristalización debido a la acción del intemperismo, que ha llevado a la formación de una capa más dura y con abundante carso superficial en forma de diente de perro.

Facies de calcarenitas de color crema, poco cementadas y de escasa dureza fácilmente deleznable, generalmente en estratos homogéneos, tienen una distribución abundante, llegando a observar en casi la totalidad de las columnas de perforación. La naturaleza y aspecto de estos depósitos son indicativos de una facies distal de ante arrecife, con abundante material terrígeno de granulometría media a gruesa.

Facies bioconstruidas, (arrecifales) constituían el núcleo del arrecife, frecuentes en la proximidad de la zona costera aunque no son raras en el resto del área. Se presentan como biolititas masivas (framestone), con abundantes fragmentos de corales duros y resistentes en una matriz variable, ligeramente menos consolidada, y biolititas rosado-naranja (bindstone) de aspecto brechoide, los fragmentos son duros y resistentes, la matriz es menos abundante.

Desde el punto de vista geomorfológico, la Planicie Costera Oriental representa una región de morfología plano-ondulada afectada hacia el mar por una serie de escarpaduras de erosión de distintos órdenes, con desniveles variables en el orden de la decena de metros, consecuentes con varias fases de descenso del nivel eustático del mar.

En el territorio de estudio se distinguen tres superficies de abrasión de origen marino:

1. La superficie central con alturas entre ocho y nueve metros sobre el nivel del mar. La dirección general de sus bordes no coinciden con la línea de costa actual y están bien marcados en el terreno por cambios de nivel de seis a siete metros, con pendientes entre 6° y 10°. En la interpretación de los morfoalineamientos, esta estructura mantiene una dirección espacial 40°, semejante a la dirección predominante en la zona. Su relieve es casi plano, con muy aisladas formas negativas del relieve, de escasa profundidad y sin acumulaciones de aguas superficiales. Hacia el sector SW de esta área se observaron dos sumideros cársicos, con indicios de actividad ocasional. La capa vegetal presenta escasa cobertura.
2. A partir de la superficie más elevada, hacia el SE, en dirección a la costa, y al NW en dirección a laguna Bávaro, se observan escalones intermedios con alturas entre dos y tres metros snm, con las mismas características de la zona central en cuanto al relieve plano, escasa cobertura vegetal, pero donde se distribuye el mayor número de lagunas y acuatorios. De estas lagunas, el 90% son permanentes y tienen relación con las aguas subterráneas locales. Hacia el sector sur se han observado la presencia de varias formas cársicas absorbentes, pero con una limitada distribución areal. La transición de esta superficie hacia la terraza costera es suave, con desniveles menores de dos metros, y su borde tiene dirección paralela a la costa actual y está marcada por varias lagunas alineadas siguiendo este patrón morfológico y con una mineralización de las aguas entre dulce y salobres.
3. La terraza litoral se extiende a lo largo de la costa, escasamente diseccionada, con alturas entre cero y dos metros snm. En la franja costera son frecuentes las formas de relieve cársico superficial conocidas por diente de perro, que en las partes relativamente bajas están reelaboradas con los bordes suavizados. La capa vegetal es más frecuente aunque de escasa potencia. En esta zona abundan pequeñas cavidades cársicas abiertas donde el nivel freático se observa a poca profundidad. No se reportan depresiones, ni lagunas, sin descartar las acumulaciones de aguas superficiales que pudieran formarse durante las precipitaciones, por el deficiente drenaje local.

Caracterización hidrogeológica

Consultado el estudio hidrogeológico desarrollado por el INDRHI en el año 2000, la zona de estudio se enclava dentro de los límites de un acuífero regional de alta importancia hidrogeológica, formado por rocas calcáreas con intenso desarrollo de la carsificación.

En términos regionales, la alta transmisividad de este acuífero está provocada por la porosidad del macizo, lo que establece bajos gradientes hidráulicos, con una carga activa relativamente pequeña, que provoca la rápida descarga de las aguas subterráneas al mar. Sin embargo, el fenómeno de intrusión marina, es un proceso natural, presente a lo largo de toda la llanura costera oriental, y cuyo avance tierra adentro es muy variable en dependencia de varios factores naturales y antrópicos.

En cuanto a la estructura del acuífero, en la figuras 3 y 4 se muestran los mapas de niveles piezométricos de las aguas subterráneas en la zona de estudio, considerando la marea alta y la marea baja.

La interpretación general, se resume en un acuífero con una configuración cónica, elevada en su sector central y descarga radial, con particularidades propias establecidas por el campo de

propiedades físicas del macizo y por acciones antrópicas de explotación. Esta parte central representa a una zona de alimentación natural, aparentemente débil, aunque bien marcada, que coloca al domo de intrusión marina a una profundidad de 32 m bajo ella.

El campo de flujo aparece bien estructurado y desarrollado, tanto en marea alta como en baja (Figura 3 y 4), lo cual confirma el dominio de la estructura geológica sobre los patrones de organización de la circulación de las aguas subterráneas. La morfología de esta red muestra cuatro sistemas de flujo bien estructurados en términos de su forma, extensión y límites, con un régimen permanente, y una evidente zona de descarga que representa una frontera de carga constante.

Estos flujos se han denominado por la dirección de drenaje, y son:

Este (E)- es la componente principal de descarga del acuífero hacia el mar con una pendiente suave e irregularidades asociadas a las vías preferenciales de conducción que establece la fracturación del macizo y el desarrollo de la carsificación.

Sur-sureste (SSE)- tiene un comportamiento similar al anterior, donde la carsificación establece vías preferenciales de conducción desde las capas más superficiales. Aunque no se tiene mayor información de distribución espacial hacia el Sur, se ha considerado una relación directa con lagunas y un paleocauce, que se alinean WNW-ESE y descargan en la ensenada costera del Sur del territorio de estudio.

Norte (N)- es la componente de descarga hacia la zona de la Laguna Bávaro, como acuatorio que por su morfología y nivel, recibe una carga de agua desde los acuíferos en tierra.

Oeste (W)- es un flujo inducido por el cono de depresión que forman las estaciones de bombeo de los campos de pozos de abasto de los hoteles de la región.

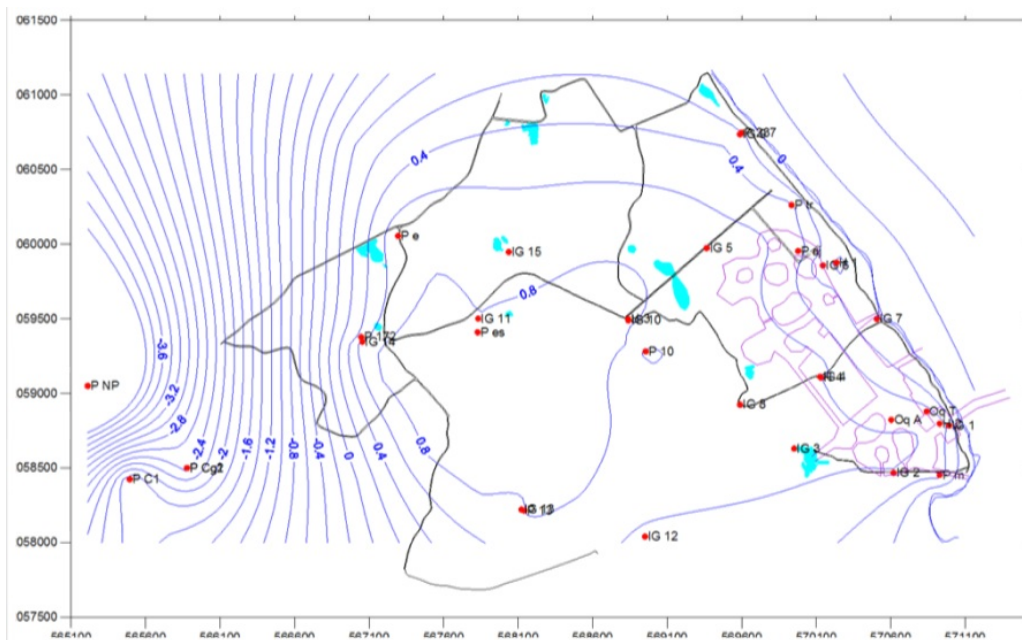


Figura 3.- Mapa de niveles piezométricos de las aguas subterráneas durante la marea baja

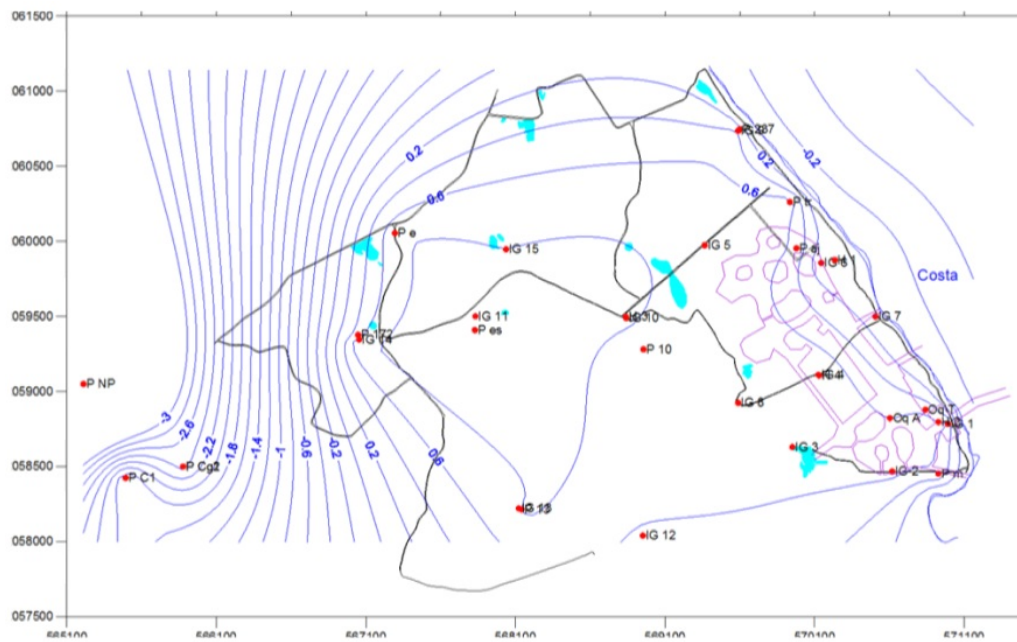


Figura 4.- Mapa de niveles piezométricos de las aguas subterráneas durante la marea alta

El régimen de bombeo se ha mantenido por varios sin haberse reportado alteraciones de la calidad de las aguas. Estas observaciones sugieren, que hacia este sector debe existir una afluencia de aguas subterráneas desde tierra (Oeste), con caudales suficientes para equilibrar los volúmenes de extracción, mientras que el acuífero local y su zona de alimentación central, representan una condición de frontera, muy frágil, que en gran medida regula la cuña de intrusión marina hacia tierra adentro.

El flujo del Este es difuso y menos potente, condicionado por la estructura geológica y la franja litoral, con un carso bien desarrollado. En conjunto esta estructura contribuye de manera aislada y diferenciada con el aporte de agua salada al acuífero local, donde también favorece al proceso de infiltración de aerosoles.

Como se puede observar, la diferencia entre la estructura del acuífero en marea baja y marea alta es muy poca, lo cual es un indicador de la influencia del desarrollo de la carsificación en el macizo, como se plantea anteriormente. Sin embargo, la presencia de niveles de cavernamiento y la distribución diferencial de la transmisividad, hacen que muy localmente sean apreciables los cambios por mareas.

En un perfil perpendicular a la línea de costa por las calas IG 8, IG 4 e IG 7 (Figura 5), podemos observar la dinámica de las oscilaciones de la marea tierra adentro y como los factores que caracterizan al macizo amortiguan su efecto y condicionan su alcance. Así, una amplitud de marea de casi 0.40 m para el tiempo de observación en la zona, se reflejó en la cala IG 7 ubicada a 40 m de la línea de costa, con solo una amplitud de 0.10 m, mientras que en las calas IG 4 e IG 8, a 580 y 1125 m de la costa respectivamente, la amplitud no excede los 0.04 m.

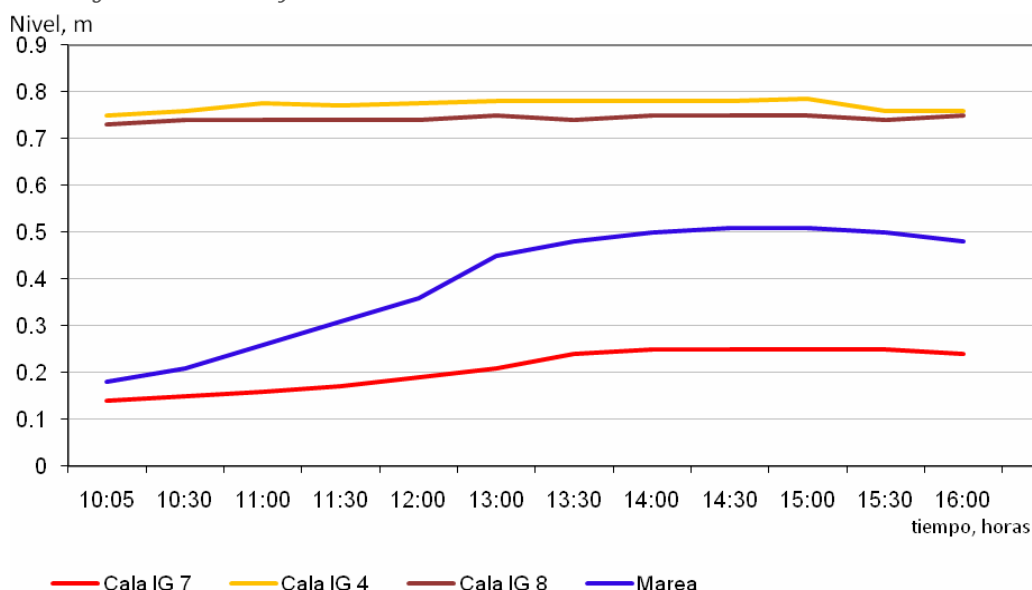


Figura 5.- Perfil perpendicular a la costa con oscilaciones de mareas medidas en las calas

A partir de los cuatro ensayos de aforos se pudo establecer que los valores de la transmisividad (T), tienen una alta variabilidad muy en dependencia de la capacidad hidráulica de la estructura del acuífero. En la parte NW de la franja litoral, la T está en el orden de los 3000 m²/d alcanzando valores de 10000 m²/d hacia el sector SE. En los sectores donde la estructura geológica reporta capas de rocas margosas intercaladas, con una carsificación más limitada, los valores de T no sobrepasan los 3000 m²/d, mientras que hacia la zona de alimentación del acuífero la T alcanza los 5000 m²/d.

Otro elemento lo constituye la mineralización de las aguas subterráneas, que para esta interpretación se calculó a partir de los valores de SPC obtenidos de las mediciones de campo. En la figura 6 se presenta el mapa de isolíneas de mineralización, las cuales tienen un comportamiento espacial algo similar a la estructura de las isolíneas de los sistemas de flujos. La mineralización tiene valores desde 0.3 a 0.7 g/l en el sector central y Oeste del territorio, que va en aumento, proporcional hacia la zona de descarga en la línea de costa, donde alcanza valores máximos de 6 g/l.

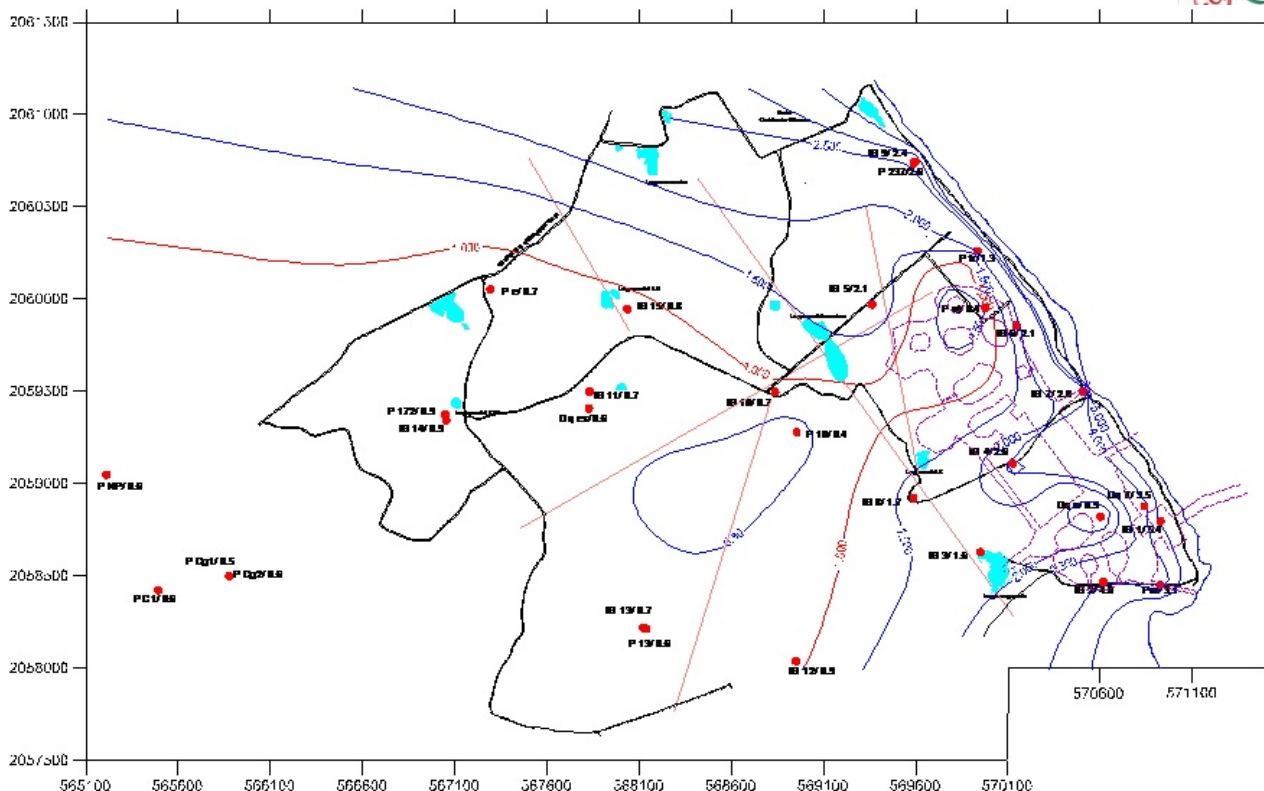


Figura 6.- Mapa de isótopos de mineralización de las aguas subterráneas

Los tipos de aguas que dominan en la franja litoral son cloruradas cálcicas, llegando localmente a cloruradas cálcicas sódicas, y pasan a bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas, hacia la zona de alimentación del acuífero. El balance hidroquímico de las muestras ensayadas está influenciado por los intercambios catiónicos diferenciales por efecto de la carsificación y la estratificación litológica, y la influencia de las aguas saladas.

En cuanto a las relaciones que se puedan establecer entre Na/Cl y $(Ca+Mg)/Cl$, con vistas a valorar el alcance de la intrusión marina en la zona de estudio, el aporte es pobre, teniendo en cuenta las características del acuífero y el desarrollo de la carsificación traducido en trasmisividad. No obstante, estos índices sugieren un efecto bastante regulado y limitado a la franja litoral, debido por la carga hidráulica de los flujos desde tierra.

Partiendo de todos estos indicadores, se ha considerado favorable aplicar la relación de Ghyben y Herzberg (formulación de Izuka y Gingerich, 1998), estimando que la profundidad teórica de la interfaz entre el agua dulce y el agua salada, para el sector central de la zona de estudio y en condiciones naturales, está en el orden de los 25-30 m de profundidad.

Si bien las condiciones de yacencia de las aguas subterráneas tienen una alta variabilidad y vulnerabilidad, debido a los factores enunciados, es importante caracterizar el comportamiento de este acuífero ante variaciones de las condiciones de flujo y/o acciones antrópicas de bombeo.

Detallando en esta dinámica inducida al acuífero, podemos agrupar los aforos realizados en los pozos ubicados en la franja litoral a 130 m de la línea de costa. En ellos las características son semejantes y resalta los altos valores de trasmisividad (T) entre 4000 y 8000 m^2/d en dependencia de los caudales (Q) de bombeo (300 y 400 gal/min respectivamente) y los St alcanzados. En estos pozos, a la profundidad de bombeo (cota de -10.00 m), las aguas tuvieron una variación muy significativa de SPC , desde valores de 13000 a 28000 $\mu S/cm$. Estos valores se mantienen o presentan una ligera

tendencia a aumentar durante el ensayo, y donde una vez detenido el bombeo y recuperado el nivel de aguas subterráneas, también se observa una recuperación en los valores de SPC hasta los valores iniciales.

En los aforos realizados en pozos alejados a más de 500 m de la costa, se obtuvieron las curvas de tiempo vs St con una configuración peculiar, donde la pendiente del tramo de abatimiento inicial es más suave, lo que sugiere un St menos instantáneo y una transmisividad que más que indicar menor capacidad, refleja una relativa homogeneidad litológica en cuanto a porosidad de las rocas. Los valores de T oscilan entre 5500 m²/d en el inicio hasta 15000 m²/d en su nivel de estabilización. El abatimiento máximo fue de 4.80 m.

Este comportamiento sugiere rocas menos carsificadas, con una componente terrígena, que tienen una menor porosidad, confirmado por los reportes de las calas perforadas en esta zona.

El comportamiento de la SPC tiene una tendencia a incrementarse, donde con caudales bajos y un menor tiempo de bombeo la oscilación es entre 5.4 y 7.1 mS/cm, mientras que con mayor Q y una hora más de bombeo el valor máximo de SPC llega hasta 7.8 mS/cm.

Es evidente, que estas condiciones de bombeo establecen el flujo de aguas saladas y alteran el equilibrio de la interface, pero en mucha menor medida que en la franja litoral, sugiriendo no solo un mayor espesor de aguas de menor mineralización, sino también una mayor profundidad de la interface.

El otro sector aforado fue en la parte central de la zona, donde la T para el primer tramo de la curva de Tiempo vs St alcanza valores bajos de 3400 m²/d, en relación con las capas de meteorización de las rocas calizas semiduras que yacen en el macizo, incrementándose en profundidad, hacia zonas más carsificadas, donde se reportaron fugas parciales de agua durante la perforación. La T máxima alcanza un valor superior a 20000 m²/d.

La poca variación de la SPC desde 1.7-1.8 mS/cm, en condiciones iniciales, hasta 2.1-2.2 mS/cm al final del bombeo, sugiere una muy ligera variación en la estructura local del acuífero. Los valores de St no fueron mayores de 0.2 m.

CONCLUSIONES

El modelo conceptual del acuífero se caracteriza por una zona de alimentación central, donde los procesos de infiltración superan significativamente a los del escurrimiento superficial, un sistema de flujo bien definido, con dos direcciones principales, hacia el Oeste provocada por el cono de depresión que establece el bombeo de los pozos de abasto, y hacia el Este, como flujo de descarga del acuífero hacia el mar.

En el flujo Este, un sector intermedio donde las rocas margosas funcionan regulando la relación infiltración-escurrimiento. Se forman lagunas que establecen una carga hidráulica de agua dulce sobre el acuífero, aunque algunos acuatorios constituyen *blue holes* estrechamente relacionados con las aguas subterráneas. Una franja litoral de superficie llana, de rocas muy carsificadas, que regula de manera significativa el equilibrio entre las aguas dulces del acuífero y las aguas saladas. En este sector la infiltración alcanza hasta un 90%, incrementada por los flujos desde áreas aguas arriba.

En términos regionales, la alta transmisividad del acuífero está provocada por la porosidad del macizo, lo que establece bajos gradientes hidráulicos, con una carga activa relativamente pequeña, que provoca la rápida descarga de las aguas subterráneas al mar.

El proceso de intrusión marina, es un proceso natural, presente a lo largo de toda la llanura costera oriental, y cuyo avance tierra adentro es muy variable en dependencia de varios factores naturales y antrópicos.

El flujo Este es difuso y menos potente, condicionado por la estructura geológica y la franja litoral, con un carso bien desarrollado. En conjunto esta estructura contribuye de manera aislada y diferenciada con el aporte de agua salada al acuífero local, donde también favorece al proceso de infiltración de aerosoles.

Las variaciones de la mineralización y la salinidad de las aguas subterráneas están asociadas a varios aspectos principales:

- El papel regulador del karst, principalmente en la franja litoral
- La presencia de niveles de cavernamiento
- La distribución diferenciada del campo local de trasmisividad
- La propagación de la marea terrestre tierra adentro

A partir de los ensayos de aforos se estableció que los valores de la trasmisividad (T), tienen una alta variabilidad muy en dependencia de la capacidad hidráulica de la estructura del acuífero. En general para todo el territorio de la zona de estudio se pueden estimar valores por encima de los 8000 m²/d.

Los tipos de aguas que dominan en la franja litoral son cloruradas cálcicas, llegando localmente a cloruradas cálcicas sódicas, y pasan a bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas, hacia la zona de alimentación del acuífero.

BIBLIOGRAFÍA

- INDRHI, 2000, Estudio Hidrogeológico de la Republica Dominicana. Archivo técnico del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, 210 p.
- Izuka, S.K. y S.B. Gingerich, 1998. Estimation of the depth to the freshwater/saltwater interface from vertical head gradients in wells in coastal and island aquifers. *Hydrogeology J* 6:367-373
- Molerio León, L.F., 2002. Desviaciones en la estimación de la profundidad de la interfase agua dulce/agua salada en acuíferos cársicos costeros. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, La Habana, XXIII, 3, :29-35
- Molerio, L.F. y Herrera, N., 2005. Recuperación de un campo de pozos para suministro de agua salada en un acuífero cársico litoral. *Mapping Interactivo*.