

## **Contribución al conocimiento de los acuíferos cársicos costeros en la región noreste de la provincia de La Habana. Sector norte de Boca de Jaruco.**

Ernesto Rocamora Álvarez <sup>(1)</sup>, Jesús M. López Kramer <sup>(1)</sup>, Katia del Rosario <sup>(2)</sup> y Luís Leandro Peñalver <sup>(3)</sup>.

<sup>(1)</sup> Instituto de Geofísica y Astronomía. Calle 212 No.2906, La Lisa, C. Habana, CP 11600, Cuba.

<sup>(2)</sup> Centro Provincial de Meteorología de Matanzas, Ciudad de Matanzas.

<sup>(3)</sup> Instituto de Geología y Paleontología, Vía Blanca y Línea Ferrocarril, San Miguel del Padrón.

Recibido: enero-octubre, 2009	Aceptado: noviembre, 2009
-------------------------------	---------------------------

### **Resumen**

El conocimiento sobre la hidrodinámica y la estructura de los acuíferos cársicos en la región noreste costera de la provincia de La Habana ha tomado un carácter muy importante ante el creciente desarrollo de la industria local del petróleo.

Recientes estudios ingeniero-geológicos e hidrogeológicos, a escala de proyecto en la zona de Boca de Jaruco, han permitido conformar un nuevo modelo conceptual del acuífero, donde se han identificado flujos preferenciales de aguas subterráneas con una dirección perpendicular hacia la franja costera, que influyen en la hidrodinámica local, la migración de elementos contaminantes y en la posición de la interface agua dulce-agua salada.

Completado con ensayos en pozos y el monitoreo se ha caracterizado la estructura del acuífero cársico y la calidad de sus aguas, tanto en régimen estático como dinámico, así como el alcance de la influencia de las mareas tierra adentro. Otro elemento comprobado se relaciona con los criterios de aprovechamiento de los recursos hídricos locales, los cuales van en aumento por la demanda local de agua dulce para usos domésticos e industriales, y los peligros de contaminación por la propia actividad petrolera local en incremento.

Estos resultados a escalas de detalle, constituyen la base fundamental para el reordenamiento territorial encaminado al emplazamiento seguro de los sitios de disposición de los residuales sólidos y líquidos del petróleo y de las nuevas obras de la industria local.

**Palabras clave:** Acuíferos costeros

### **Abstract**

The knowledge on the hydrodynamic and the structure of the karstic aquifer in the coastal northeast region of Province La Habana has taken a very important character before the growing development of the local industry of the petroleum.

Recent engineer-geologic and hydrogeologic studies in the area of Boca de Jaruco, they have allowed to conform a new conceptual model of the aquifer, where preferential flows of groundwaters have been identified with a perpendicular direction toward the coastal border that they influence in the hydrodynamic, the migration of polluting elements and in the position of the interface salted water-sweet water.

Completed with work in wells and monitoring, it has been characterized the structure of the karstic aquifer and its water quality, so much in static condition as dynamic, as well as the influence of the tides inland. Another proven element is related with the approaches of use of the hydraulic resources, which go in increase for the demand of fresh water for domestic and industrial uses, and the dangers of contamination for the oil activity in increment.

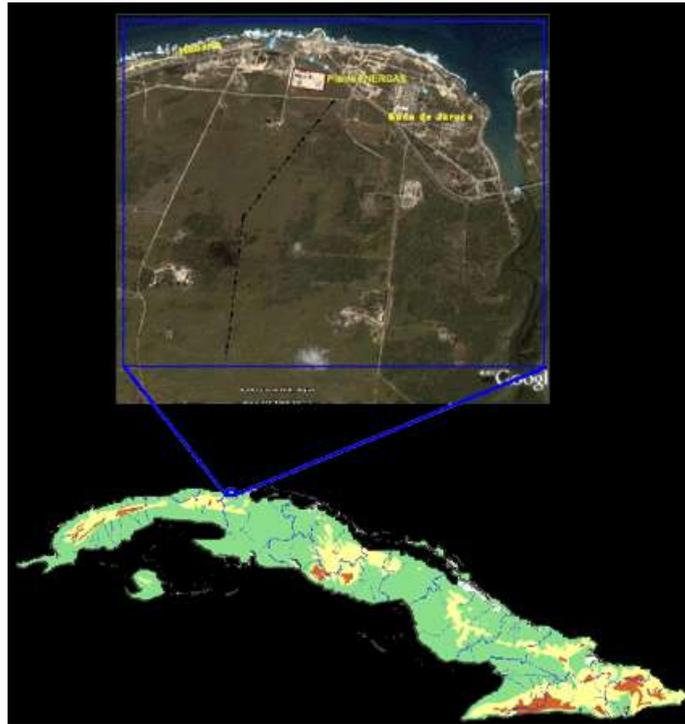
These results, constitute the fundamental base for the territorial guided to the sure location of the places of final disposition of the residual solids and liquids of the petroleum and of the new works of the local industry.

**Key words:** Coastal karstic aquifers.

## **Introducción**

El estudio de los acuíferos cársicos costeros del noreste de la Provincia de La Habana ha tomado una importancia relevante ante el creciente desarrollo de la industria del petróleo local, el emplazamiento de nuevas obras y la necesaria disposición de sus residuales.

Esta región está representada por una secuencia de interfluvios, con una marcada configuración areal, que se distribuyen desde el Este de la provincia de Ciudad de La Habana hasta la ciudad de Matanzas. Territorialmente los elementos de la geología y geomorfología de las formas superficiales y subterráneas de los relieves cársicos y no cársicos y las particularidades de la dinámica de las aguas subterráneas, caracterizan a esta región como muy compleja desde el punto de vista de su heterogeneidad y anisotropía, lo cual resulta altamente vulnerable, frágil y sensible, ante las acciones de gestión petrolera que tienen lugar en el territorio y que derivan en numerosos escenarios de peligro para la calidad de las aguas subterráneas.



**Esquema 1:** Ubicación de la zona de estudio.

La zona de interés que se presenta como caso de estudio dentro de la región, está representada por el territorio al Oeste del poblado de Boca de Jaruco y hacia el Este del antiguo centro turístico “El Cayuelo”, alcanzando una franja de 3 km desde la costa hacia tierra adentro.

## **Materiales y métodos**

Para el desarrollo de estas investigaciones fueron trazados cinco perfiles geoelectricos encaminados a tratar de identificar la yacencia de las estructuras geológicas y la existencia potencial de discontinuidades subterráneas que pudieran condicionar vías preferenciales de la dinámica del acuífero.

Partiendo de la interpretación de los resultados de los trabajos de campo y de la perforación de 9 calas ingeniero-geológicas y 3 calas hidrogeológicas, las investigaciones geofísicas y del procesamiento de los valores de los parámetros físicos y mecánicos de las muestras ensayadas, se delimitaron 6 elementos ingeniero-geológicos.

## **Resultados y discusión**

### **CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA GEOLOGÍA REGIONAL Y LA GEOMORFOLOGÍA**

Las investigaciones geológicas que se acometieron estuvieron direccionadas fundamentalmente a la caracterización de las rocas en su relación con la ingeniería geológica y la hidrogeología.

La Fm. Jaimanitas, de edad Pleistoceno Superior parte baja, está constituida por calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas, con oquedades cársicas a veces rellenas por una mezcla carbonático-arcillosa ferruginosa de color rojo ladrillo. En la zona de estudio estas rocas afloraban en casi toda la franja litoral debido a la escasa potencia de los sedimentos de cobertura, sin embargo actualmente los trabajos antrópicos de relleno han limitado los afloramientos al borde costero norte.

La Fm. Vedado está constituida por calcareníticas margosa, por lo general muy cementadas. Las calciruditas pueden pasar a calcarenitas margosas y margas arenáceas. El desarrollo de la actividad cársica es notable en estos depósitos, lo que contribuye a la infiltración de las aguas cuando no existe cobertura arcillosa.

La Formación Cojímar está constituida por margas calcáreas, arcillosas, arenáceas y a veces nodulares, cretas, calizas biodetríticas arcillosas, calcarenitas de matriz margosa y arcillas. En la región predominan las margas calcáreas con intercalaciones de calizas arcillosas. En general son masivas o localmente laminares, apareciendo algunos paquetes con interstratificación de calizas y margas.

La Formación Güines está constituida por calizas biodetríticas de grano fino a medio, fosilíferas, masivas. En la región esta formación aflora ampliamente, y no solamente se distribuye en las partes más elevadas del relieve, donde constituye colinas altas, sino también en la base de esas colinas. El desarrollo del carso, si bien exteriormente no señala la existencia de cuevas y cavernas, es visible en las rocas de esta unidad, particularmente en las perforaciones realizadas, donde en ocasiones se observó caída libre de barrenas.

El tipo de relieve morfoestructural es de llanuras marinas abrasivas, en series escalonadas con tres niveles de terrazas bien definidos en la región.

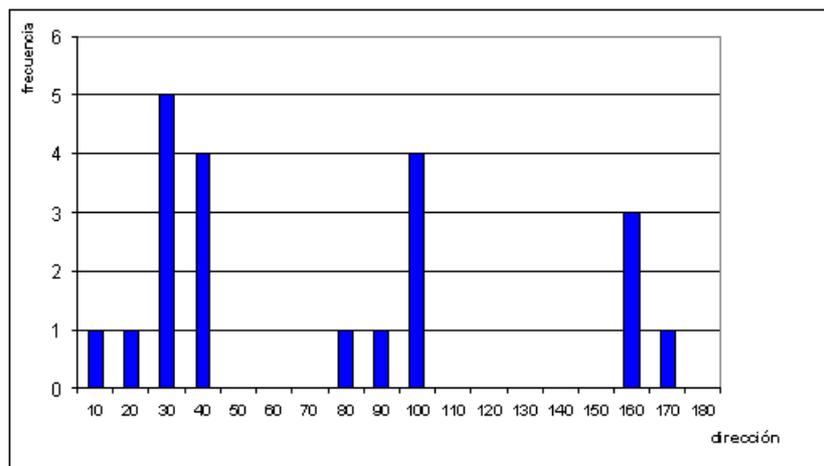
Un detallado modelo de relieve para la zona de estudio, permite limitar estas características morfológicas a la primera terraza, emergida, cuya altitud alcanza los 6.00-8.00 m. La base de estos depósitos es muy irregular, mientras que su parte superior forma un plano ligeramente inclinado hacia el mar con un intenso desarrollo de formas de "diente de perro". Sus rocas corresponden a la Formación Jaimanitas, anteriormente descrita, y forman una estrecha franja costera, cuyo ancho en la zona de estudio varía entre 400 y 500 m.

El borde interno de la terraza está marcado por el acantilado (escarpa) de la Terraza II, que tiene una altura de 9,0-10,0 m y cuya base está en algunos lugares cortada por una solapa de abrasión o surcada por niveles de cavernamiento y grutas marinas. Esta primera terraza es la más afectada por la antropización, donde se desarrolla la urbanización de Boca de Jaruco, así como las superficies antrópicas donde se han emplazado las instalaciones de la industria local del petróleo y de ENERGAS S.A.

Si bien la zona de estudio es un territorio pequeño con respecto a un criterio regional de caracterización, son los morfoalineamientos los elementos que van a constituir patrones de la hidrodinámica del acuífero y de la distribución de los elementos ingeniero-geológicos.

Sin detallar los elementos de la tectónica regional, compleja, las unidades de relieve se desarrollan en franjas alargadas en dirección O-E, cuyas geometrías son consecuentes a la sucesión de terrazas. A este modelo se agregan discontinuidades con dirección predominante de NNE-SSO.

Se puede considerar que la región no sufre de los efectos de la tectónica reciente, aunque se observan discontinuidades con una orientación predominantemente de NO-SE, con algunas desviaciones. Asimismo, a esta escala regional se reportan estructuras lineales que cortan las capas de rocas jóvenes yacientes en las terrazas marinas y que contribuyen a la remodelación del relieve local.



**Figura 1-** Gráfico de dirección de los morfoalineamientos vs. frecuencia para la región

De este análisis es evidente que se destacan tres grupos de morfoalineamientos, el primero con direcciones preferenciales de 30-40°, de mayor población de estructuras, asociadas con discontinuidades del relieve y que evidentemente están relacionadas con la litología, la estratigrafía y los elementos de buzamientos de los estratos, donde al predominar intercalaciones de rocas carbonatadas de diferente textura y dureza, marcan la morfología local.

El segundo grupo con dirección 100° corresponde con los principales patrones de varios paleoprocesos de erosión y remodelación del relieve, incluidos los “bordes” de escalones estructurales del macizo y paleodrenajes superficiales. Asociados con estos paleoprocesos se han observado varios sumideros de régimen eventual, que espacialmente se alinean siguiendo las direcciones del primer grupo.

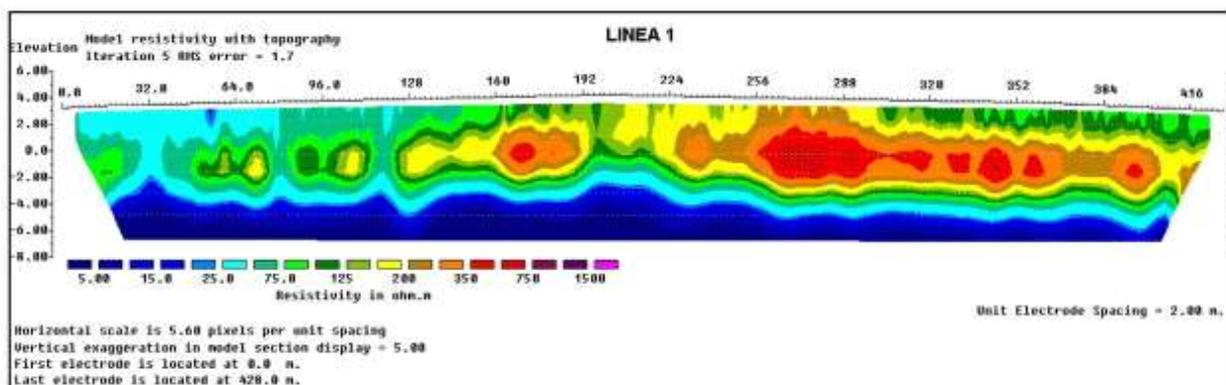
Un tercer grupo con dirección 160° y escasa representatividad, corresponde con aisladas discontinuidades del relieve, y que coinciden con puntos de intercepción con los otros grupos de alineamientos, que condicionan discontinuidades más profundas, las cuales en la línea de costa dan lugar a la formación de pequeñas ensenadas.

Cabe mencionar las acciones antrópicas de conformación de plataformas y rellenos en la región, han enmascarado significativamente muchas de las formas superficiales de relieve y han influido en los cambios del escurrimiento y el drenaje subsuperficial.

## RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES GEOFÍSICAS

Como resultado del trazado de los perfiles geoelectricos se obtuvo la siguiente información por perfiles:

Perfil geoelectrico de la línea 1. Se extiende de Oeste a Este por el borde inferior de la autopista Vía Blanca, por casi 440 m y alcanza una profundidad de estudio de 11 m, hasta las cotas absolutas de alrededor de 4 m hasta -7m.



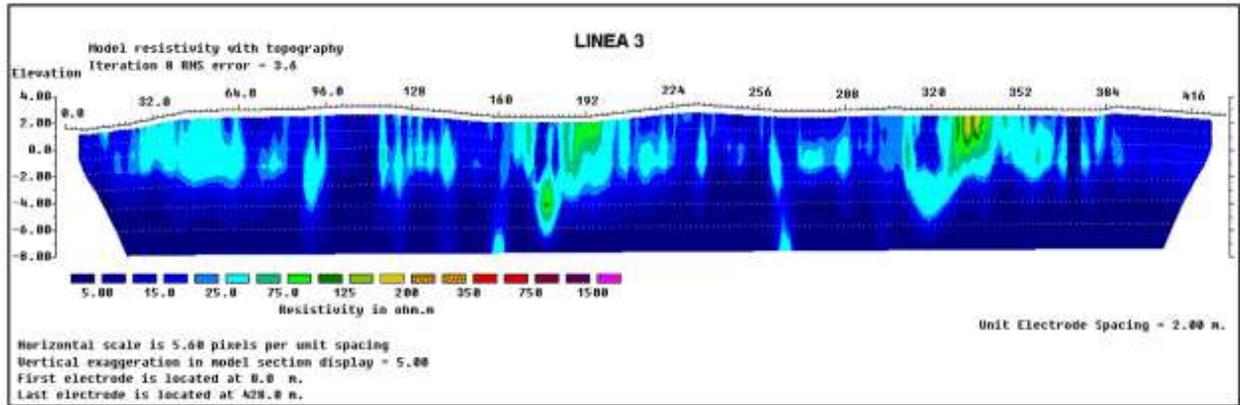
**Figura 2-** Corte geoelectrico 1

Las condiciones variables en la salinidad del agua que satura las rocas existentes en el sector estudiado, pueden provocar que las variaciones en la composición litológica y en su estado técnico se enmascaren. En la figura 2 se observa que alrededor de la cota -4 m existe un gradiente geoelectrico que provoca una disminución de la

resistividad de las rocas hasta valores de 5 ohm-m, lo cual es típico de la presencia de agua de mar. Esta frontera no es completamente horizontal, sino que muestra ligeras ondulaciones, situándose a la mayor profundidad en el extremo este del perfil (estacionado 400m) y ascendiendo a cotas más elevadas en el centro del corte, alrededor del estacionado 200m.

Se destaca que hacia el inicio del perfil, predominan los valores bajos e intermedios de resistividad eléctrica, por lo que aquí deben existir rocas menos duras y carsificadas que las que aparecen en el resto del corte.

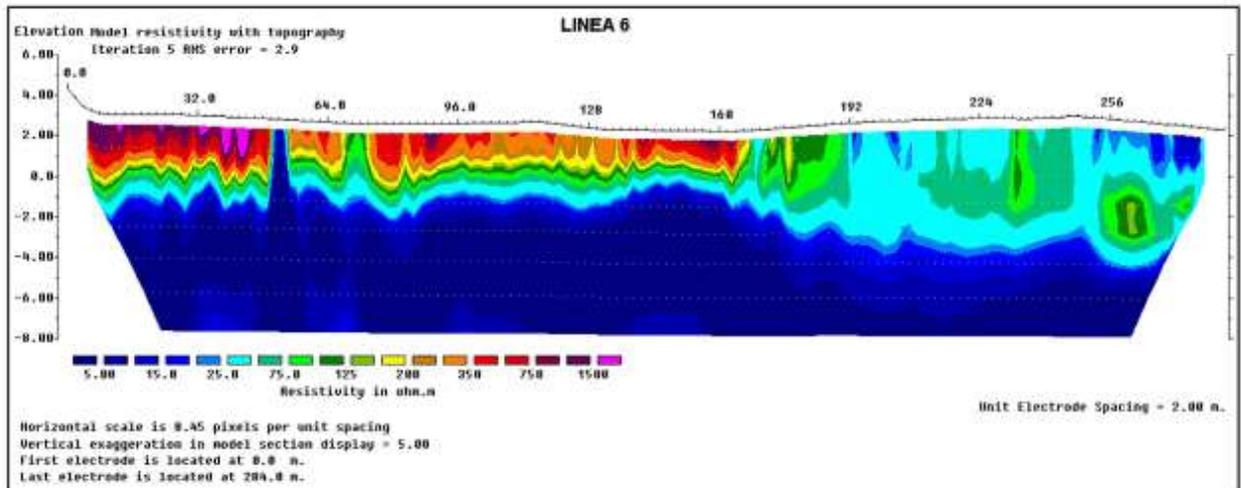
Perfil geoelectrico de la línea 3. Este se ubica por el extremo norte del área estudiada, bordeando la línea de costa. Precisamente la cercanía al mar hace que las cotas absolutas del terreno sean menores de 1 m y que la presencia de aguas fuertemente mineralizadas sea una constante en el corte. Debido a este aspecto, se nota la presencia de altos valores de resistividad típico de las rocas calizas carsificadas y no saturadas.



**Figura 3-** Corte geoelectrico 3

Se destaca el predominio de los gradientes verticales de resistividad eléctrica los cuales denotan la presencia de grietas o fallas, que prácticamente se extienden por todo el perfil.

El perfil de la línea 6 se extiende en la dirección de sur a norte del área estudiada, siendo un perfil típico transversal a la línea de costa. Se observan en su parte inicial sectores en superficie de rocas con alta resistividad eléctrica que varían desde 200 hasta más de 1500 Ohm-m. Esto se debe a la presencia de rocas calcáreas agrietadas y carsificadas que en su mayor parte están situadas por encima del nivel estático y por consiguiente no están saturadas de agua. A partir de la presencia en el nivel estático de las aguas subterráneas, la resistividad global de las rocas desciende hasta 5 ohm-m, valor típico para rocas saturadas con agua de mar.



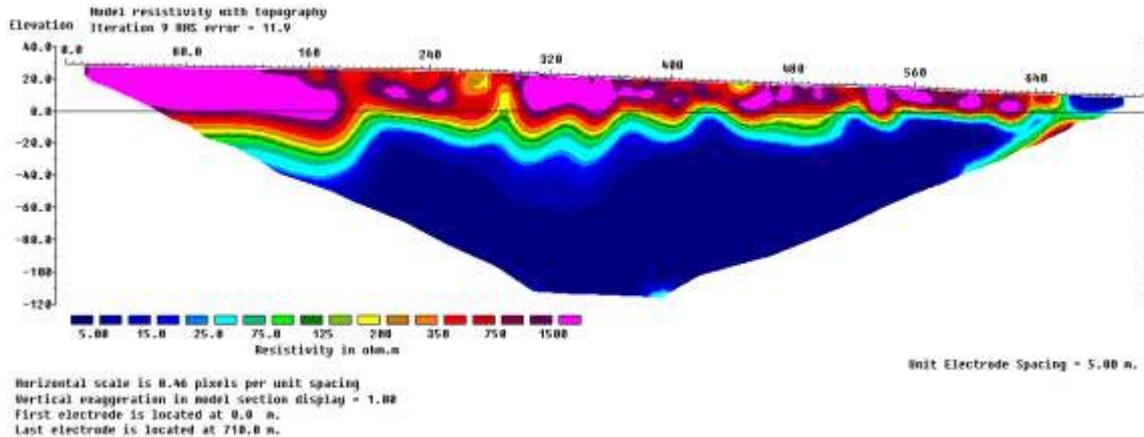
**Figura 4-** Corte geoelectrico 6

El perfil obtenido a lo largo de la Línea 4 se extiende de Oeste a Este, por casi 710 m y alcanza una profundidad de estudio de 130 m, extendiéndose desde cotas absolutas de alrededor de 16 m hasta -120m.

En la figura 4, se observa un fuerte contraste de resistividad que separa una primera capa de altos valores de resistividad, que descienden hasta menos de 5 ohm-m hacia la profundidad del perfil. Este contraste debe estar influenciado por la presencia de aguas subterráneas muy fuertemente mineralizadas en todo el corte. Se puede

observar que el límite entre las rocas de altas resistividades y el fondo de bajos valores de resistividad, no es rectilíneo ni uniforme, sino que presenta sinuosidades que hacen que en algunos sectores el espesor de la capa de alta resistividad solo alcance alrededor de 15 m, pero en otros sectores alcance hasta 35 m de profundidad. Estos son los sectores observados en los estacionados 350 m y 479 m. En estos sectores se considera que la capa de rocas calcáreas existentes es más potente y posiblemente saturada de agua de menor mineralización, por lo que si en esta región existieran conductos subterráneos preferenciales para la descarga de las aguas subterráneas al mar, estos sectores mencionados serían los más idóneos para ello.

En la figura 5 se aprecia el corte de resistividades de las rocas que comprenden la línea tomográfica 7. Esta línea se extiende de Sur a Norte, por lo que presenta un pendiente del terreno descendente hacia el norte del área.



**Figura 5-** Corte geoelectrico 7

En el inicio del perfil afloran rocas de valores de resistividad muy alta (más de 1500 ohm-m), los cuales se asocian con rocas calizas muy duras y carsificadas, no saturadas de agua. Lo mismo ocurre en la zona del estacionado 320 m y en sectores más limitados hacia el extremo derecho del perfil. Entre estos sectores de rocas de alta resistividad encontramos sectores de resistividades intermedias (entre 200 y 750 ohm-m) que indican rocas menos duras y menos afectadas por los procesos cársicos.

## CARACTERÍSTICAS INGENIERO-GEOLÓGICAS

Como resultado de los trabajos de campo fueron delimitados 6 elementos ingeniero-geológicos.

El Elemento ingeniero-geológico 1 está representado por el relleno antrópico muy heterogéneo, con bloques de rocas, localmente arcilloso, que no representa interés ingeniero-geológico por cuanto su compactación es muy variable localmente, aunque su distribución espacial cubre el 15% del territorio. Los Elementos ingeniero-geológicos 2<sub>1</sub> y 2<sub>2</sub> (IG 2<sub>1</sub> y 2<sub>2</sub>) están representados por calcarenitas y calizas, blanco crema, orgánogenas, fracturadas, semiduras, con niveles variables de fragmentación y oquedades cársicas rellenas. En este IG 2<sub>1</sub> se han agrupado rocas calcarenitas y calizas blandas, fracturadas y con un RQD mayor de 67%. Generalmente se observan con procesos de carsificación pero sus oquedades están rellenas de material arcilloso calcáreo rojizo, duro, que llega a influir en la densidad aparente de las rocas. En todas las calas perforadas se cortó este IG 2<sub>1</sub> con potencias que oscilan entre los 1.20 m hasta los 3.50 m, siempre subyaciendo las capas de relleno antrópico. Estas rocas por su posición estratigráfica en la región constituyeron la superficie natural, lo cual se evidencia por la presencia de discontinuidades y dolinas, característica muy común en estas terrazas marinas, carsificadas de la región noroeste de La Habana. Según los valores promedios de parámetros físico-mecánicos se puede clasificar este IG 2<sub>1</sub> de resistencia baja, con un RQD regular. Asimismo, tienen un coeficiente de ablandamiento (Kab) que si bien su valor de 0.86 corresponde en el rango de “rocas no ablandables”, este es un valor límite de clasificación por lo cual se sugiere considerar a estas rocas como “ablandables” en estado saturado.

En caso de ejecutar excavaciones con taludes verticales, estos serán suficientemente estables desde el punto de vista estructural, sin embargo la fracturación intrínseca del macizo puede condicionar la formación de bloques que bajo la influencia de la dinámica de las aguas marinas, puedan desprenderse y caer. El IG 2<sub>2</sub> está representado por rocas calcarenitas, que desde el punto de vista litológico son semejantes a las del IG 2<sub>1</sub>. En este caso están más fracturadas y su recuperación como testigos de las calas perforadas es en fragmentos, que disminuye su RQD a menos de 40%. En estas rocas el desarrollo de la carsificación es más intenso localmente, y predominan las oquedades vacías.

De acuerdo con los valores promedios se puede clasificar este IG 2<sub>2</sub> de resistencia baja, con un RQD malo. En el caso de los taludes, la fragmentación observada en estas rocas es favorable a los procesos de desprendimientos de bloques, incluso en condiciones submarinas, con el consecuente deterioro de estos taludes. EL IG 3 está representado por rocas calcarenitas, grises, aunque muy localmente pueden ser calizas de grano medio, y donde se observan procesos de desarrollo de formaciones calcáreas secundarias dentro de las oquedades cársicas de estas rocas. Su yacencia en la zona de estudio se limita hacia el sector noroeste, habiendo sido cortada solo en la cala 2 a 5.00 m de profundidad y con un espesor de 4.00 m (Figura 6).



**Figura 6-** Testigos de las rocas del IG 3 recuperadas en la cala 2 a los 4.80 y 7.60 m de profundidad

Teniendo en cuenta los rasgos morfológicos regionales y la existencia de corredores subterráneos como vías que permiten el drenaje preferencial de las aguas subterráneas, se ha supuesto que estas rocas del IG 3 corresponden con uno de estos corredores subterráneos y por ello su distribución es hacia el noroeste de la zona de estudio con dirección perpendicular a la costa.

El grado de fragmentación de las rocas de este IG 3, combinado con el intenso desarrollo de la carsificación, son los patrones esenciales que las caracterizan y las diferencian del resto.

Aunque no ha sido comprobado con métodos de laboratorio, es significativo que la coloración gris, observada solamente en las rocas de este IG 3 sugiere que se debe a la presencia de flujos de aguas subterráneas con contenido de hidrocarburos y no a una coloración natural de ellas. La presencia de manchas de color más intenso y casi negro, en las oquedades abiertas y sobre las formaciones secundarias calcáreas que se han desarrollado en ellas, reafirma este criterio.

Este sector hacia el Oeste, desde el punto de vista ingeniero-geológico, no se considera favorable para excavaciones que alcancen al IG 3. Estas rocas en taludes son muy inestables, además de aportar un factor hidrodinámico que favorece el deterioro de las propiedades geomecánicas de las fracturas. Es importante considerar el criterio hidrogeológico con respecto a que estas rocas representen un corredor de flujos preferenciales desde el acuífero cársico tierra adentro, propiciando la migración de los contaminantes presentes en las aguas subterráneas locales, cuestión que se analiza en epígrafes posteriores.

El IG 4 está representado por rocas calcarenitas muy alteradas, cuya recuperación como testigos de las calas perforadas es de forma muy triturada, y donde predominan los fragmentos de rocas que no exceden los 4-6 cm de tamaño dentro de una matriz arenosa.

Los valores de los parámetros físicos y mecánicos para este IG 4<sub>1</sub> sugieren una resistencia muy baja y con un RQD nulo en todo el intervalo que clasifica a las rocas de muy mala calidad. En taludes son rocas desfavorables, considerando que el grado de alteración en los sectores más blandos puede representar superficies de fallas para movimientos de masas más complejos. El estado general de estas rocas sugiere que en caso de excavaciones permanentes se utilicen elementos de contención, no solo considerando el elemento de estabilidad sino y el de contención de flujos de sedimentos granulares hacia el interior de la excavación.

A escala de detalle, en las áreas de afloramientos de las rocas, independientemente de su formación geológica, se midieron la dirección del agrietamiento y se llevó a un gráfico de frecuencia que se muestra en la figura 7.

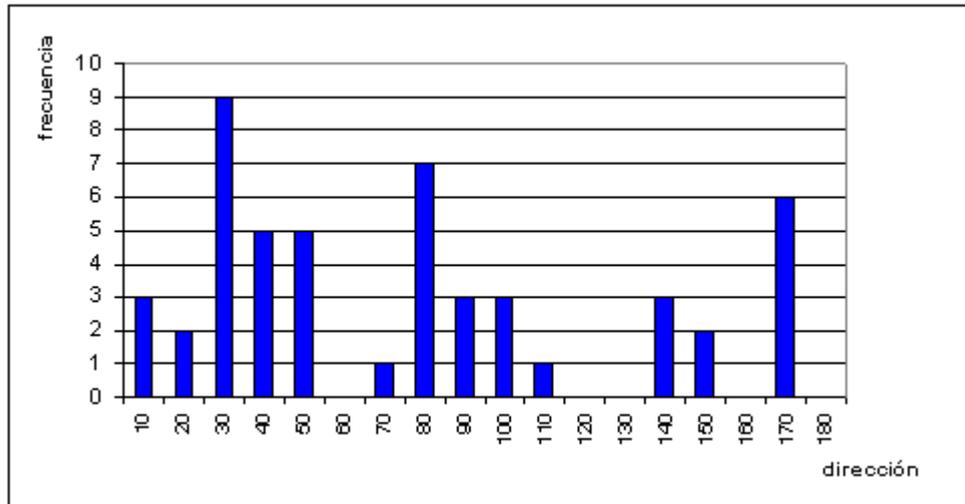


Figura 7- Gráfico de frecuencia vs. dirección del agrietamiento en la zona de estudio

Como se puede observar se identificaron tres familias de grietas: A con dirección 30°, familia B de 80-100° y familia C de 140-170°. En ninguna de las familias predomina un patrón determinado en cuanto a sus características, pudiendo generalizar que la abertura oscila entre 0.5 y 1 cm, y en su mayoría están rellenas de material calcáreo o calcita. El espaciamiento de las grietas tampoco mantiene una regularidad, solo apreciable en las familias B que está en el orden de 1.50 m. En cuanto a la continuidad de estas grietas, en el plano horizontal pueden alcanzar hasta los 5.00-6.00 m, mientras que en profundidad atraviesan toda la capa de rocas del IG2<sub>1</sub>. Es de destacar que una comparación entre los resultados del análisis de la frecuencia-dirección de los morfoalineamientos a escala regional y del agrietamiento a escala local, sugiere un comportamiento muy semejante, que reafirma los criterios de distribución de los elementos ingeniero-geológicos y las particularidades de la dinámica de las aguas subterráneas del acuífero cársico costero.

#### CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

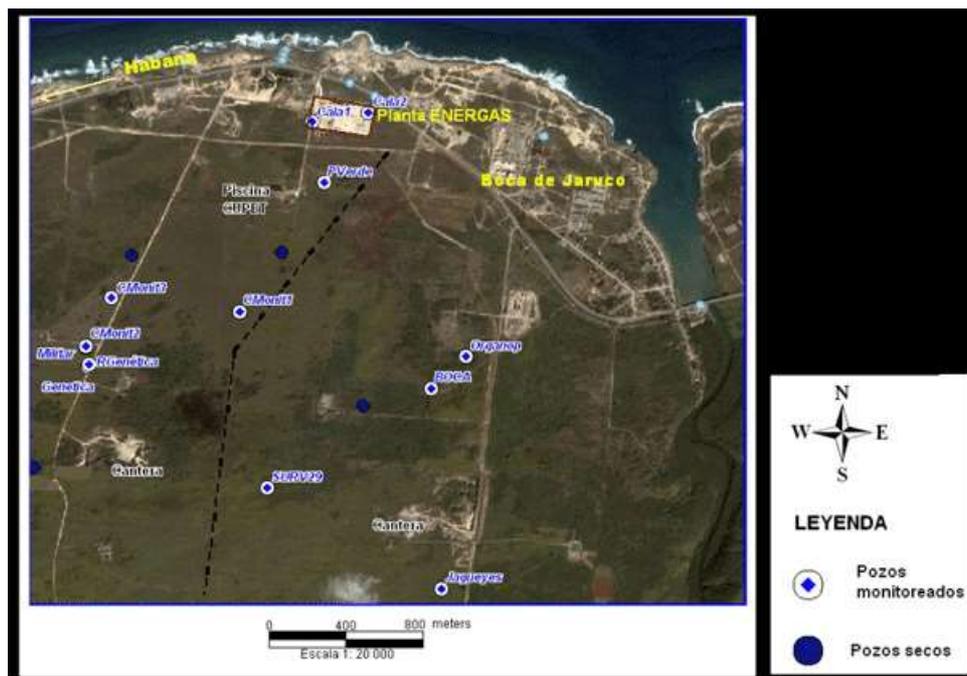
En la zona de estudio se desarrolla un acuífero litoral, libre, de flujo difuso, en rocas carbonatadas carsificadas miocénicas. Este acuífero, conocido como cuenca Costera Norte tiene sus recursos de agua subterránea calculadas en el orden de los 20.5 Hm<sup>3</sup>/año y, en la zona de estudio las aguas subterráneas son captadas con fines de abastecimiento doméstico.

En el territorio que se estudia, entre El Cayuelo y el río Jaruco se ha desarrollado un acuífero local, que se extiende desde la costa hasta la primera terraza marina y está fuertemente intrusionado por las aguas marinas que penetran tierra adentro perpendiculares a la línea costera, aprovechando los bajos gradientes hidráulicos; las elevadas porosidades y transmisividades de las rocas cavernosas; y fuertemente contaminado por el vertimiento indiscriminado de residuos derivados de la actividad petrolífera.

La dirección de las aguas subterráneas es de Sur a Norte y perpendicular a las corrientes fluviales que las drenan, con gradientes muy bajos, del orden de 10<sup>-4</sup>, producidos por el bajo potencial de carga hidrostática de las aguas dulces.

El sistema de drenaje local es de flujo difuso, y la descarga se efectúa hacia el litoral y hacia la red fluvial activa. Por tal motivo, las divisorias subterráneas entre los sistemas locales de flujo parecen muy ligeras y, en todo caso, estacionales, produciéndose, sobre todo en aguas altas.

Esto significa que cualquier alteración en el balance hídrico del sistema acuífero, ya sea por incremento en las tasas de extracción, sequías prolongadas, obras de recarga inducida, drenajes y similares, pueden provocar el avance tierra adentro de las aguas marinas, con las que el acuífero está en equilibrio hidrodinámico. En todo el territorio acuífero se encuentran solamente tres pozos con agua dulce que constituyen la fuente de abasto con agua potable de la comunidad de Boca de Jaruco, y también las fuentes de suministro de agua técnica y potable a las instalaciones de la EPEP Occidente y la Granja El Cayuelo, así como de algunos asentamientos locales dispersos. Las mayores amenazas sobre la calidad de sus aguas lo constituyen la intrusión marina, la contaminación industrial en general y, particularmente, la producida por hidrocarburos y derivada de la exploración y explotación de petróleo, y la resultante de la disposición sin tratamiento o con tratamiento deficiente, de los residuales domésticos y agropecuarios. Por otra parte en el territorio se localizan otros 10 pozos los cuales constituyeron antiguas fuentes de abasto de agua, que por variadas razones fueron abandonados.



Esquema 2. Ubicación de los pozos

Tabla I- características principales de estos pozos inventariados y se incluyen los pozos de Boca de Jaruco y La Genética.

Pozos existentes	Prof. NE, m	Prof. Total, m	Φ pozo, m	SPC, μS/cm	pH
Abasto Boca de Jaruco	26.00	27.23	2.50	930	7.42
Cala 1	5.06	8.44	0.12	18400	7.2
Cala 2	4.30	7.74	0.12	6970	7.65
Genética	33.57	46.20	0.30	940	7.3
Jimagua	Seco	60.75	2.00	-	-
Militar	30.69	37.50	0.30	848	7.28
Jagüeyes	52.98	53.50	2.00	-	-
Organopónico	19.53	21.00	0.20	870	7.53
Verde	10.50	13.00	0.20	6220	7.47
Pozo3	Seco	9.30	2.00	-	-
La Ceiba	Seco	20.53	2.00	-	-
SURV29	42.70	44.90	2.00	560	7.94

Tabla II- Composición de las aguas subterráneas en cada pozo observado

Localidad	Al	As	Cu	Fe	Mn	Sr
Cala 2	2.20	2.00	0.014	2.60	0.027	4.0
Cala 1	0.11	0.83	0.017	1.80	0.280	1.2
Acdto. Boca	0.11	0.23	0.025	-	0.007	0.29
Organopónico	-	0.73	-	0.56	0.320	0.26
Genética	-	0.24	-	-	-	0.18
Verde	-	0.65	0.024	0.28	0.010	1.4

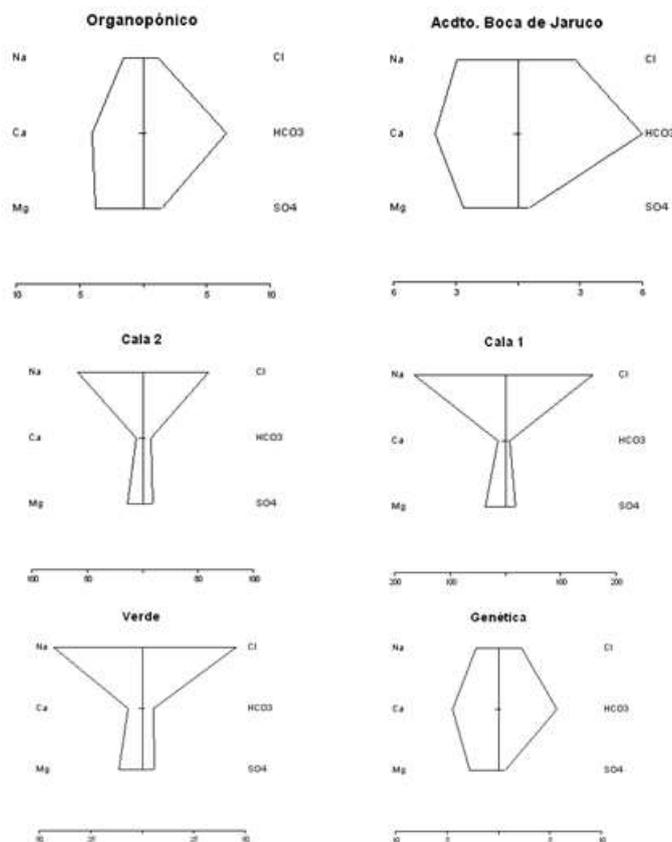
**Tabla III-** Clasificación de las aguas subterráneas en los pozos, según su residuo seco

Pozo	Tipo de agua
Acdto. Boca	Dulce
Cala 1	Salada
Cala 2	Salobre
Genética	Dulce
Organopónico	Dulce
Verde	Salobre

Como puede observarse, se trata de aguas cloruradas sódicas hacia la franja costera que van transitando a bicarbonatada clorurada cálcico sódicas hacia el interior del territorio. Exceptuando a los pozos evidentemente intrusados, en el resto los valores de Sólidos Totales Disueltos (TDS) no sobrepasan el gramo por litro y las concentraciones de cloruro son inferiores a 100 mg/l.

**Tabla IV-** Metales y microelementos tóxicos en las aguas subterráneas muestreadas (en mg/l)

Localidad	Al	As	Cu	Fe	Mn	Sr
Cala 2	2.20	2.00	0.014	2.60	0.027	4.0
Cala 1	0.11	0.83	0.017	1.80	0.280	1.2
Acdto. Boca	0.11	0.23	0.025	-	0.007	0.29
Organopónico	-	0.73	-	0.56	0.320	0.26
Genética	-	0.24	-	-	-	0.18
Verde	-	0.65	0.024	0.28	0.010	1.4



**Figura 8-** Diagrama de Stiff de los pozos observados y muestreados

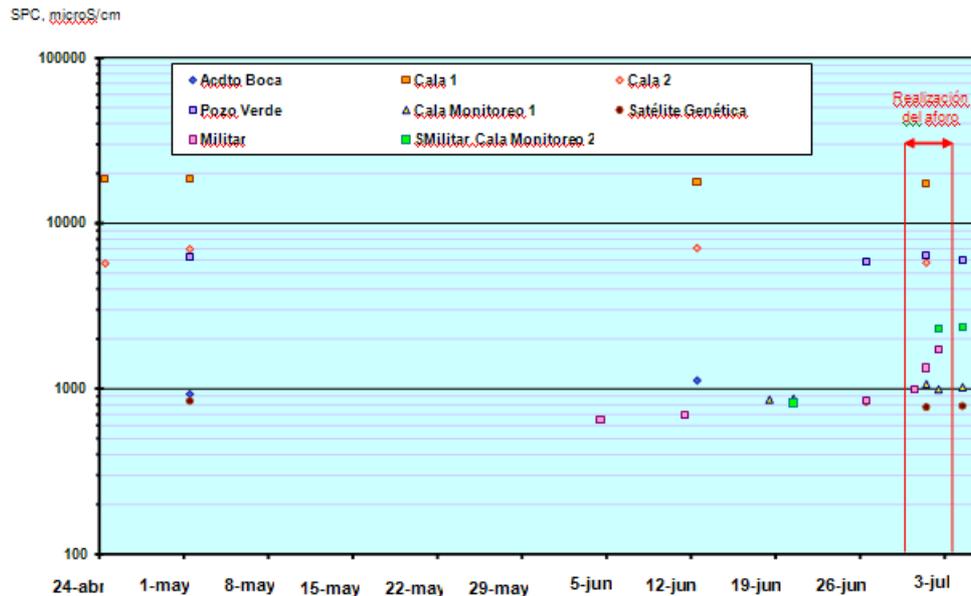
**Tabla V-** Hidrocarburos totales y Aceites y grasas (mg/l) en las aguas subterráneas

Localidad	Hidrocarburos totales	Aceites y grasas	Fenoles
Cala 2	< 0.01	< 0.01	0.084
Cala 1	0.24	< 0.01	0.056
Boca	0.03	< 0.01	< 0.02
Organopónico	0.03	< 0.01	0.028
Genética	< 0.01	< 0.01	< 0.02
Verde	0.03	< 0.01	0.149

Las concentraciones anteriores indican que los aceites y grasas están en muy bajas concentraciones, mientras que los hidrocarburos y fenoles tienen una distribución en dependencia de varios factores más complejos, del campo de propiedades físicas del acuífero.

De manera paralela y con vistas a la caracterización del acuífero en condiciones dinámicas, se realizaron aforos con una duración de 72 horas y con un gasto de 4 l/s, que provocó un abatimiento del nivel de agua de 1, 32 m.

En la figura 9 se presenta un análisis de la Conductividad medida “in situ” durante toda la campaña donde se observa el cambio de la misma durante el aforo, razón por la cual se limita el tiempo de bombeo.



**Figura 9-** Comportamiento de la SPC durante la campaña de campo

De manera general se estima que para el acuífero local el gasto de explotación no debe ser superior a los 5 l/s con un régimen de bombeo de 8-10 horas diarias, y especificaciones muy locales para los distintos usuarios según la demanda de calidad.

En cuanto a la relación de la marea con el nivel de las aguas subterráneas del acuífero, se pudo analizar a partir de las calas perforadas y a escala de detalle.

En el gráfico de la figura 10 se plotearon los niveles de las aguas subterráneas (cota piezométrica) medidas en las calas de manera sistemática durante un mismo intervalo de tiempo y un mismo día, sin factores externos que pudieran provocar desviaciones a esta relación (condiciones meteorológicas normales, sin precipitaciones desde 4 días antes y mar tranquila).

Un primer aspecto es que la respuesta de los niveles piezométricos en todas las calas antes las oscilaciones locales de las mareas es inmediata, muy directa y con un comportamiento bastante homogéneo. Se ha considerado que los sectores desfasados o no coincidentes de la curva se deben a anomalías locales en las vías de flujo o a efecto de la inercia en la dinámica subterránea.

Este desfase muy pronunciado hacia el sector Oeste de la franja costera ha sugerido la presencia de un corredor subterráneo de flujo preferencial de aguas dulces desde el acuífero, quizás asociado con la yacencia de rocas intensamente carsificadas del IG 3.

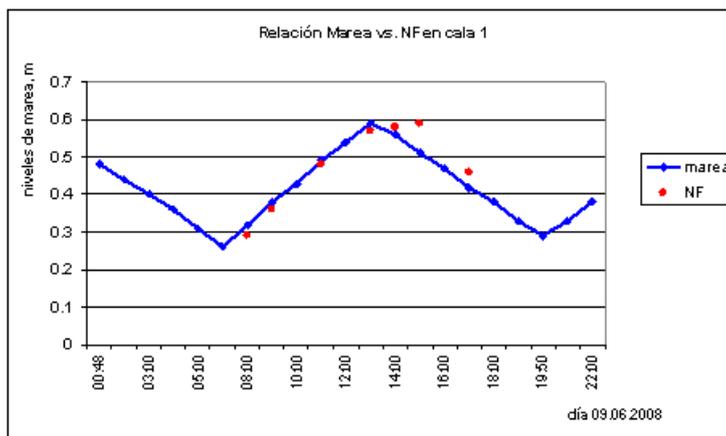


Figura 10- Relación entre la marea y los niveles piezométricos en las calas

La existencia de este corredor subterráneo de flujo preferencial de aguas dulces, que tiene una distribución espacial siguiendo la orientación de una estructura morfológica identificada en el estudio regional, fue corroborada por el análisis hidroquímico “in situ” de estas aguas. Esta aparente delimitación de la zona de estudio en un sector oeste y otro este, también fue sugerido por los resultados de las investigaciones geofísicas.

La ejecución de mediciones sistemáticas de la conductividad eléctrica (SPC) de las aguas subterráneas en las calas, a diferentes profundidades, reportó un comportamiento diferenciado en el caso del sector oeste y del este (Figura 11).

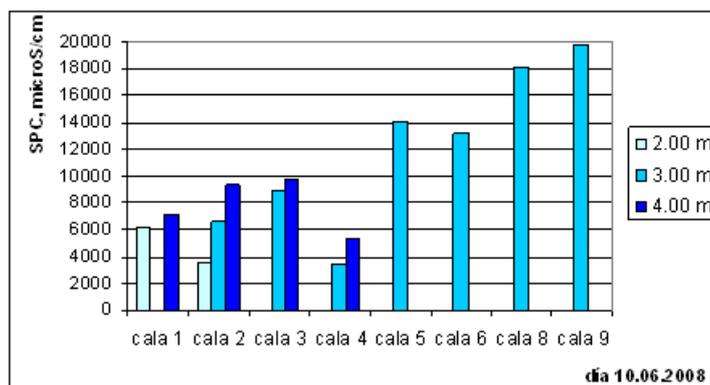


Figura 11- Valores de SPC de las aguas subterráneas a diferentes profundidades en las calas perforadas

En las calas 1, 2, 3 y 4 a pesar de su cercanía con la línea de costa, los valores de SPC a profundidades entre los 2.00 y los 4.00 m están muy por debajo de los valores en las calas restantes a la misma profundidad, incluso de las calas 8 y 9 considerablemente más alejadas de la costa. Fue interesante comprobar que en uno de los pozos de monitoreo, situado a 500 m hacia el Sur, tierra adentro, los valores de SPC medidos alcanzan los 17620  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Por otra parte, estos valores de SPC en las calas del sector oeste disminuyen aún más después de ocurrido el evento lluvioso, alcanzando valores cercanos a 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (cala 4 a 3.00 m de profundidad), lo cual es una característica de flujos preferenciales de agua dulce descargando al mar en acuíferos cársicos costeros.

## **Conclusiones**

De acuerdo a los resultados de los trabajos en la zona de estudio se ha considerado que dentro de este territorio, la dirección de las aguas subterráneas es de Sur a Norte, perpendicular a las corrientes fluviales que las drenan, con gradientes muy bajos, del orden de  $10^{-4}$ , producidos por el bajo potencial de carga hidrostática de las aguas dulces. El sistema de drenaje local es de flujo difuso, y la descarga se efectúa hacia el litoral y hacia la red fluvial activa. Por tal motivo, las divisorias subterráneas entre los sistemas locales de flujo parecen muy ligeras y, en todo caso, estacionales, produciéndose, sobre todo en aguas altas.

Se han diferenciado dos localidades en cuanto a la dinámica de las aguas subterránea. Hacia el sector oeste de la zona de estudio, se ha identificado un corredor de flujos preferenciales de descarga de las aguas subterráneas del acuífero hacia el mar, y que sobreponiendo el resto de las condiciones descritas, puede representar una vía de migración y concentración de los contaminantes de la industria del petróleo en la misma dirección de las aguas subterráneas.

Este acuífero cársico se caracteriza por rocas de muy alto coeficiente de filtración (permeabilidad) y por una transmisividad superior a los 6000 m<sup>2</sup>/d. De manera general se recomienda un gasto de explotación en el acuífero no superior a los 5 l/s con un régimen de bombeo de 8-10 horas diarias.

## **Referencias**

- CEN (1999): Eurocódigos. Eurocódigos 7, Proyecto geotécnico. Reglas generales. Ed. AENOR, España. 124 p.
- APHA: 1998,5520-C part. Standard Methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. 20 th Ed. And Carlberg Stig R. and Bo Skarstedt (1972). Determination of small amounts of non-polar hydrocarbons (oil) in sea water. J.Cons. Int. explo. Mer 506-515.
- Cuba. Oficina Nacional de Normalización (1985): NC-93-02-1985. Agua potable. Requisitos sanitarios y de muestreo.
- Cuba. Oficina Nacional de Normalización (1986): NC-93-01-1986. Fuentes de abastecimiento de agua, calidad y protección sanitaria.
- FAO (1979): Groundwater Pollution. Tecnology, Economics and Managment. FAO Irrig. Drain. Paper 38, roma 137 p.
- McNeely, R.N., V.P. Neimanis, L. Dwyer (1979): Water Quality Sourcebook. A Guide to Water Quality Parameters. Inland Water Dir. , Ottawa, 88:
- Molerio León, L.F. (2006a): Efecto de la anisotropía de la transmisividad sobre el campo de flujo en un acuífero cársico litoral. Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (108), Madrid, Marzo :77-80.
- Molerio León, L.F. (2007b): Migración vertical de Líquidos de Fase No Acuosa (LFNA) en acuíferos cársicos. 2a. Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. VII Congreso de Geología, GEO5-010, La Habana, Marzo 20-23, 2007:98. Publicado en CD-ROM ISBN:978-959-7117-16-2 .