

## CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS, HIDROGEOLÓGICAS Y AMBIENTALES DEL SISTEMA ACUÍFERO CARBONATADO SUR EN EL OCCIDENTE DE CUBA: SECTOR LOS PALACIOS- CANDELARIA

**Nelson. A. González Cabrera** <sup>(1-2)</sup> **R. Peláez García** <sup>(2-3)</sup> **E. Sobrino Hernández** <sup>(3)</sup>

(1) Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales. ECOVIDA - CITMA. Km2 ½ carretera a Luis Lazo, Pinar del Río CUBA. E-mail [nelson@ecovida.vega.inf.cu](mailto:nelson@ecovida.vega.inf.cu)

(2) Dpto. de Geología Universidad Hnos. Saiz. Pinar del Río.

(3) Empresa Geominera Pinar calle Martí 141 e/ Ciprian Valdés y Colon Pinar del Río CUBA. [bpinar@pri.minbas.cu](mailto:bpinar@pri.minbas.cu)

### RESUMEN

El agua subterránea ha jugado, juega y jugará un papel básico en la satisfacción de cubrir las crecientes demandas de agua tanto para abastecimientos humanos como para otros usos. El sector de estudio ocupa un área de 1 214 km<sup>2</sup> de extensión, donde vive una población de 120 950 habitantes. Durante los trabajos de investigación se realizó la compilación y análisis de información Geológica y de pozos de distinta procedencia (geología, minería, ingeniería geológica, geotecnia, hidrogeología, entre otros), trabajos de campo que incluyeron inventario de puntos de agua, itinerarios geológicos, muestreos y mapificación de sectores entre otros aspectos. La zona de interés está ubicada en la cuenca Los Palacios, extendida al sur de La Cordillera de Guaniguanico, a continuación de la Falla Pinar. Como resultado de la evaluación realizada a los pozos perforados tanto de investigación como de explotación, así como de la interpretación de otros datos, se ha podido ubicar los depósitos de la cubierta que yacen directamente sobre el basamento Presenozoico, enmarcándose como de edad Cretácico- Cuaternario, representados por calizas, margas y calizas margosas dolomitizadas entre otros sedimentos. Se presenta el Modelo Conceptual para el Sistema acuífero, que es abierto al mar. Se distinguen dos acuíferos, que pueden tener intercambio de flujo, con dirección preferencial regional de este flujo hacia el Mar Caribe. Se evaluaron los recursos de agua subterránea en Categoría B. Además, con óptica ambiental se evaluó la Intrusión Marina, representándose en un mapa la posición de la línea con 1g/L. También se elaboraron los mapas de: espesores de los sedimentos de cobertura del Cuaternario, profundidad del Techo de la Caliza, Isocloruros, así como la evaluación de la calidad de esta agua referida al contenido de nitrato y otros elementos químicos.

### ABSTRACT

Ground water has played, is playing and will play a basic roll to cover the increasing water demand for all uses. The study area covers a surface of 1 214 km<sup>2</sup> where is settled a population of 120 950 inhabitants. During the field work a compilation and analysis of the geological information about all the wells were made. This work included an inventory of water spots, geological trails, sampling and mapping of the sectors, among other aspects. The zone of interest is located in Los Palacios basin, at the south of Guaniguanico mountain belt, which leads to the Pinar fault. As result of the evaluation made to the drilled wells for investigation as well as for water use and data interpretation was possible to locate deposits of the cover that lies directly over the basement of Presenozoic period, which age is estimated as Cretacic-Quaternary, represented by clays, margays and mangoes clays dolomitized among other sediments. A conceptual model is presented for the Aquifer System that is open to the sea. Two aquifers are distinguished that might have flow interchange with regional preferential direction to the Caribbean Sea. Ground water resources were evaluated as Category B. The marine intrusion was evaluated from an environmental point of view, presenting a map with the position of the 1g/L line. The maps of Quaternary sediments thickness were made as well as maps for the roof of clay layer, iso-chlorine, water quality nitrate content and other chemical compounds.

## INTRODUCCION

Prácticamente la inmensa mayoría de las personas, sean de origen rural o urbano y tengan o no una titulación, hablan de la importancia y necesidad de ahorrar y proteger los recursos naturales y en particular el agua.

Las aguas subterráneas representan solo una parte de los recursos hídricos globales. Ese tan singular recurso de la Naturaleza, es un elemento básico y esencial para la existencia de cualquier tipo de vida. Como botón de muestra tomemos los seres humanos, que consumimos por día aproximadamente 2 litros de agua, teniendo en cuenta que esta sustancia no tiene sustituto alguno.

En muchas provincias del país como por ejemplo, Pinar del Río, Mayabeque, Artemisa, La Habana, Matanzas, y Ciego de Ávila, se abastecen y emplean para otros usos, las aguas subterráneas, con estimados de más del 60%. Se tendrá presente que la mayoría de esos acuíferos son cuencas costeras abiertas y están en relación hidráulica con el mar.

El sector de estudio presenta una población de 120 950 habitantes (Planificación Física Provincial Pinar del Río, septiembre 2008) con marcado desarrollo agrícola principalmente con cultivos agroindustriales como el arroz y la caña de azúcar, además de cultivos varios y frutales. Se comprenderá que este desarrollo está condicionado por la disponibilidad de agua para la que existe gran demanda. En este sentido, la política del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) ha estado encaminada a emplear las aguas superficiales fundamentalmente para riego y las subterráneas para abastecimientos humanos, y en años secos estas se emplean para riego además. Un problema detectado y evaluado a partir de la década de 1960, la Intrusión Marina, limita los aumentos de las extracciones en la actualidad, al que se suman otros como los derivados del desarrollo intensivo agrario, las infraestructuras, el sector turístico y los servicios técnicos que los cubren, entre otros.

Las representaciones cartográficas se presentan con las escalas indicadas para todos los casos. Los mapas base empleados se encuentran a escala 1: 100 000. En los mapas de trabajo presentados se describen principalmente de forma detallada los componentes tanto del medio Físico (mapa de ubicación geográfico), geológico, (mapa geológico) así como los del medio hidrogeológico entre los que están (mapa hidrogeológico, corte geólogo-hidrogeológico esquemático, mapa hidroquímico, de isocloruros, así como el de líneas equipotenciales). Como complemento Ambiental, se presentan los mapas de espesores de los sedimentos del Neógeno –Cuaternario, así como el del techo de la roca acuífera, presentándose una evaluación de la cantidad y calidad de las aguas subterráneas referidas a los contenidos en Nitrato y otros elementos químicos.

## Características físico-geográficas

La zona de estudio está localizada en la llamada Llanura Sur de Pinar del Río, comprende los municipios Los Palacios, San Cristóbal y Candelaria. Está situada al este de la cabecera provincial y al suroeste de la capital del país, limitada al Norte por la Falla Pinar y hacia el Sur por el Mar Caribe. El área abarca una superficie de 1 214 Km<sup>2</sup>, (Ver figura 1).

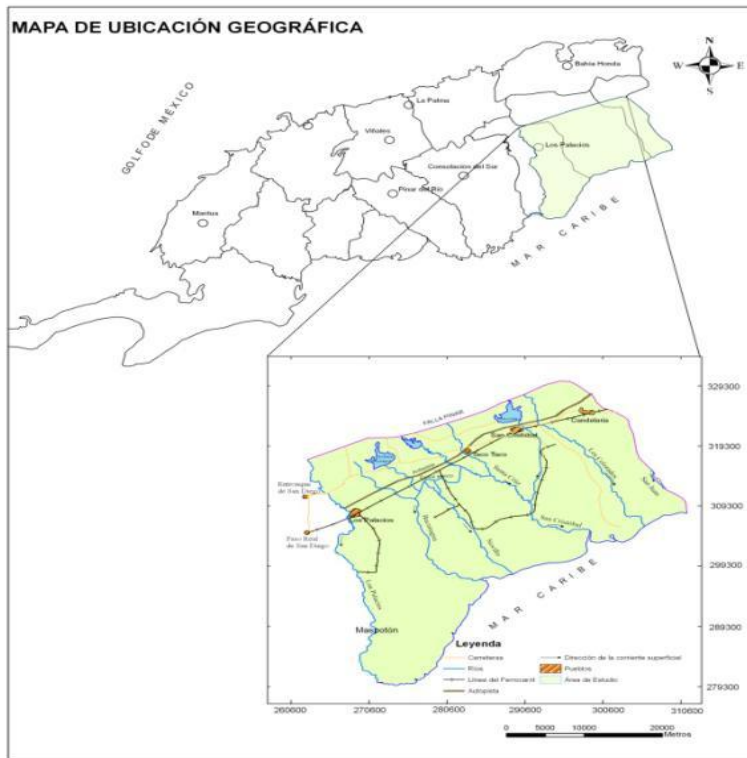


Figura 1 Mapa con la ubicación geográfica del sector de estudio.

## Relieve

El territorio se caracteriza por una llanura cársica que representa el 87% del área total, con pocas ondulaciones, cubiertas generalmente por aluviones. La morfoestructura consta de bloques escalonados en monoclinales con buzamiento generalizado al sur. Se destaca en estas regiones superficies aterrajadas cerca de las superficies fluvio-marinas creadas por los depósitos deltaicos potentes.

## Clima

La región de estudio concuerda con el clima prevaleciente en el país, es decir subtropical húmedo, que se corresponde con el clima del tipo sabana. Se definen dos estaciones bien marcadas: una lluviosa que se extiende de mayo a octubre, y otra seca que comprende de noviembre a abril. La temperatura promedio anual es de 26°C (Estación Meteorológica Paso Real de San Diego), con mínimas de 24.5°C (enero) y máximas de 27.5°C (agosto). Las lluvias alcanzan un valor promedio que varía entre los 800 y los 1200 mm al año.

## Hidrología

La red hidrológica de la zona es fundamentalmente dendrítica, como ocurre en las zonas llanas. Está representada por los ríos San Diego, Bacunagua, Los Palacios, Taco Taco, San Cristóbal y Bayate por citar los más caudalosos. Los que garantizan la existencia del recurso para las distintas actividades de la agricultura, estos ríos presentan obras hidrotécnicas (presas, derivadoras y canales magistrales) construidas en su cursos medios. Los recorridos fluviales de esta parte de la cuenca son mucho más largos que los de la parte más occidental (Zonas de San Luis, San Juan y Galafre), teniendo perfiles longitudinales y transversales más suaves y aplanados, lo que evidencia que las aguas se mueven a velocidades no muy altas, favoreciéndose la sedimentación. Esta cuenca, se

extiende desde la misma ladera sur de la Cordillera de Los Órganos hasta la línea costera del mismo sector.

## Suelos

En el área de estudio, prevalecen los suelos ferralíticos amarillentos, pardos rojizos, fersialíticos, halomórficos e hidromórficos, caracterizados por una gran variedad, presentándose como arenosos y arcillosos, (Benett, 1959), (Marrero, Rodríguez, et al 1989). Generalmente son suelos de una gran erosión, salinidad, acidez y con un deficiente drenaje; lo que provoca una baja productividad. Es una zona donde abundan los bosques siempre verdes, con mayor frecuencia más al este en la Sierra del Rosario.

## Vegetacion

La Flora se corresponde con especies vegetales típicas de las sabanas arenosas entre las que destacan: espartillo (*Sporobolusindicus*), cana japa (*Sabaljapa*) y marañón (*Anarcadiumoccidentale*). Otras especies, como la palma real (*Roystonea regia*), aparece con frecuencia en casi todo el área (Nuevo Atlas de Cuba, 1989).

Se comprenderá que como resultado de la generalización de cultivos agroindustriales (arroz, caña de azúcar y tabaco principalmente) fue sustituida la vegetación endémica por aquellos.

## Vialidad

La zona de estudio cuenta con vías de acceso conformada por una red de carreteras de primera a tercera categoría donde se destaca la Autopista Sur, la Carretera Central y el ferrocarril que enlazan todas las capitales municipales con La Habana. En la zona rural se aprecian terraplenes que en las áreas arroceras están bien conservados.

## Infraestructura hidraulica

Desde finales de la década de 1960 y luego de hacer las evaluaciones desde los puntos de vista geólogo e hidrogeológico, incluyendo la hidrología de superficie, se comenzó la creación de la infraestructura hidráulica a partir de la construcción de embalses superficiales de agua, pudiéndose citar como los más relevantes, las presas, Ramírez, Herradura, Bacunagua, Los Palacios, Juventud, San Julián, La Paila y Bayate. Como complemento se construyeron unos 40 km de canales magistrales que presentan gastos o caudales entre 10 y 20 m<sup>3</sup>/s, que conectan o enlazan de este a oeste todas las obras. En algunos tramos de estos canales, se construyeron baterías o grupos de pozos contiguos (equidistantes entre 500-1000 m) y paralelos, algunos de los cuales se comunican con el canal magistral, entonces en época de lluvia, cuando hay agua superficial en "abundancia", se abre la compuerta de comunicación del canal con el interior del pozo, penetrando el agua para recargar el acuífero. (González y Peláez, 2007). La figura 2, ilustra estas condiciones.



Figura 2 Vista de un tramo del canal Herradura-Los Palacios con la ubicación de los pozos explotación-recarga. (González, Báez, 1973)

Referido a los abastecimientos de agua se cuenta en la zona de estudio con algo más de 45 acueductos que captan aguas subterráneas con buena calidad tanto físico-química como bacteriológica. Las conducciones desde las fuentes de abastecimientos hasta los consumidores se realizan con tuberías de distintas calidades y materiales, pero básicamente se emplean las de hierro galvanizado y PVC.

### **Características geológicas del sector de estudio. generalidades.**

La zona de estudio se encuadra en la cuenca Los Palacios, extendida en la parte sur de la Cordillera de Guaniguanico justo al sur de la Falla Pinar. Mediante los pozos perforados en el área de estudio con diferentes fines, se ha destacado la presencia de depósitos de la cubierta que yacen directamente sobre el basamento precenozoico. Los depósitos de la cuenca se acumularon principalmente durante el post-orogénico y son de edad Cretácico-Cuaternario representados por calizas, margas, calizas margosas dolomitizadas, gravas, areniscas y arcillas entre otras. (Barrios, et al. 1988). A continuación se hace una breve descripción de la estratigrafía, tectónica y el magmatismo.

#### **Estratigrafía.**

El corte se caracteriza por tener formaciones que van desde el Cretácico Superior (Campaniano Superior-Maestrichtiano Inferior) hasta depósitos del Cuaternario (Holoceno), (ver figura 3). Para tener una idea aproximada de la disposición de los estratos, se describe de manera sucinta el corte estratigráfico, (Franco, 1994).



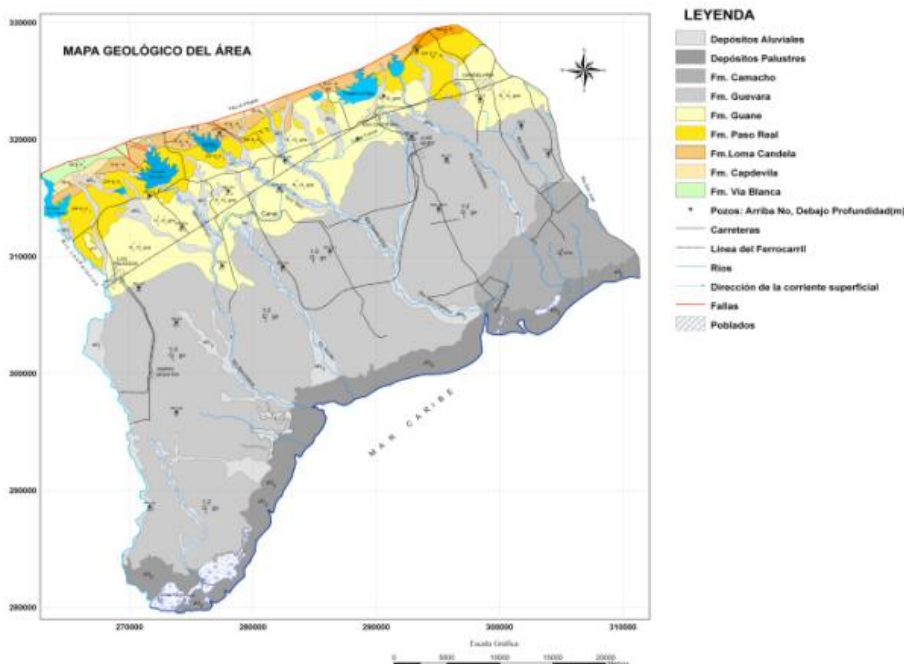


Figura 3 Mapa Geológico base del sector de estudio escala 1:100 000. Modificado con la escala indicada.

❖ **Formación Vía Blanca ( $Vbk_5^2-k_6^2$ ).**

**Litología diagnóstico:** Secuencia flyschoides constituida por argilitas, limolitas, areniscas, calcarenitas, conglomerados polimícticos con una matriz arcillo-arenosa, margas, calizas detríticas, arcillas y tufitas.

**Edad:** Cretácico Superior (Campaniano Superior- Maestrichtiano Inferior).

❖ **Formación Capdevila ( $cp_{4a}^e$ ).**

**Litología diagnóstico:** Areniscas, limolitas, arcillas, gravelitas, calcarenitas, margas, calizas, grauvacas y conglomerados.

**Edad:** Eoceno Inferior parte baja..

**Espesores:** Oscila entre 500 y 800 m.

❖ **Formación Manuelita ( $mnle_{5b}-E_3$ )**

**Litología diagnóstico:** Yacen calizas biógeno-arcillosas, areniscas calcáreo-arcillosas que forman pequeñas intercalaciones y en escasa cantidad aparecen delgadas capas de brechas calcáreas y calizas dolomitizadas.

**Edad:** Eoceno Medio-Oligoceno Inferior parte baja.

**Espesores:** 146 m.

❖ **Formación Loma Candela ( $lce_{5b}-e_{7a}$ )**

**Litología diagnóstico:** Arcillas calcáreas, calizas arcillosas, margas, areniscas calcáreas, gravelitas y conglomerados.

**Edad:** Eoceno Medio parte alta.

**Espesores:** 250-300 m.

❖ **Formación Paso Real ( $psre_g-n_5$ )**

**Litología diagnóstico:** Predominan las alternancias de calizas y margas. Las calizas son cavernosas, arcillosas, biodetríticas arcillosas, dolomitizadas. Aparecen también intercalaciones de

areniscas, limolitas calcáreas y arcillas. La estratificación está enmarcada por los cambios litológicos y es frecuentemente lenticular.

**Edad:** Oligoceno Superior- Mioceno Superior basal.

**Espesores:** Oscila entre 30 y 1 640 m.

❖ **Formación Guane (gne N<sub>2</sub><sup>2</sup>-Q<sub>1</sub><sup>1</sup>)**

**Litología diagnóstico:** Arenas silíceas, arcillas arenosas, gravas (angulosas y subangulosas) débilmente cementadas por arcillas con una estratificación indefinida lenticular y más raramente cruzada.

**Edad:** Plioceno Superior- Pleistoceno Inferior.

**Espesores:** Según datos de perforaciones puede alcanzar hasta 50 m.

❖ **Formación Guevara (qv Q<sub>1</sub><sup>1-2</sup>)**

**Litología diagnóstico:** Arcillas plásticas (montmorilloníticas y montmorillonito-caoliníticas), arenas silíceas, gravas finas, fragmentos de corazas ferríticas (hardpan) con una estratificación indefinida, paralela.

**Edad:** Pleistoceno Inferior-Medio.

**Espesores:** No excede los 50 m.

❖ **Formación Camacho (cmc Q<sub>1</sub><sup>3</sup>)**

**Litología diagnóstico:** Limos areno- arcillosos, arcillas limosas con intercalaciones de gravas finas y concreciones de carbonato.

**Edad:** Pleistoceno-Superior.

**Espesores:** Puede alcanzar hasta 3 m

❖ **Depósitos aluviales y palustres (alQ<sub>2</sub> y pQ<sub>2</sub>)**

Los sedimentos Holocénicos en el sector de estudio han sido clasificados como de origen continental. Los depósitos aluviales (alQ<sub>2</sub>), están asociados con los valles y terrazas fluviales de ríos y arroyos, constituidos por arenas cuarcíferas principalmente, la forma tanto de los granos como de las gravas son angular y subangular preferentemente. También se documentan arenas arcillosas y arcillas arenosas con intercalaciones de gravas de variada composición y dimensiones.

Por último, los sedimentos palustres (pQ<sub>2</sub>) se distribuyen sólo en las zonas costeras, están representados por Arcillas y Limos carbonatados con restos vegetales.

## **Tectónica**

Socas, (2002) afirma que, como el área de estudio se encuentra enmarcada en la parte sur de la provincia, se puede plantear que no presenta gran desarrollo de la actividad tectónica como ocurre al norte de la Falla Pinar. La tectónica de la región se caracteriza por movimientos verticales en bloques elevados y hundidos a diferentes niveles, cuyos límites en muchos casos pueden ser seguidos interpretando las anomalías gravimétricas de los levantamientos geofísicos realizados en el área.

## **Magmatismo**

No hay evidencias de actividad magmática en el corte geológico conocido.

## **Metodología de la investigación**

El estudio realizado en este trabajo fue orientado hacia dos vertientes dentro del campo de las Ciencias Naturales, la Intrusión Marina por un lado, que será el más detallado y los Aspectos Ambientales relacionados con otros tipos de contaminación por otro, incluyendo la salinización de

suelos. Como resultado van a existir diferencias en los procedimientos y métodos aplicados durante los trabajos de investigación. Se comprenderá que lo referido a los aspectos geológicos se trata como complemento o herramienta para el estudio hidrogeológico con el grado de detalle que ellos conllevan.

## **Métodos empleados**

Para este estudio, se han empleado métodos y medios muy diversos. Si bien, buena parte de la metodología empleada en esta investigación se utiliza convencionalmente en los estudios hidrogeológico-ambientales regionales, el enfoque que se ha mantenido sobre los trabajos a realizar ha sido eminentemente específico de los sistemas hidrogeológicos cársicos. Se tendrá presente que las aguas subterráneas contenidas en acuíferos cársicos son consideradas a nivel mundial un importante recurso (Vías, et. al 2006) como ocurre también para el caso de Cuba, donde más del 66% del territorio está ocupado por rocas carbonatadas (González y Jiménez, 1988a).

## **Métodos de Gabinete**

### **Captura de datos.**

La captura de datos es un proceso de la mayor importancia, además de ser imprescindible para el procesamiento de toda la información, sirvió para la recopilación de todos aquellos datos que se encontraban archivados desde comienzos de la década del 60 y de esta forma se llevó a formato digital; que permite preservarla convenientemente pues las copias duras de los informes se encuentran en franco deterioro en muchos casos, de esta manera se facilita el uso de la misma mediante programas de computación de fácil acceso.

### **Procesamiento digital de la información recopilada.**

Posteriormente a la captura de datos pasamos al procesamiento de toda la información obtenida.

- De cada pozo recopilado, se tomaron las descripciones de los siguientes parámetros: las coordenadas, la descripción geológica, la cota relativa en la boca del pozo (m), la profundidad (m), el diámetro (m), el nivel estático (m), el caudal (L/s), el abatimiento (m), la recuperación (min), tiempo de bombeo (horas) entre otros. Toda esta información fue evaluada y procesada, facilitando la elaboración de la base de datos en Microsoft Office (Excel).
- Con la base de datos en formato Excel, se confeccionó el Mapa de ubicación topográfica de los Pozos y sondeos de investigación (calas). Se empleó el software Surfer 9.0, con el objetivo de agrupar los pozos según nuestro interés considerando la ubicación geográfica, la profundidad, nivel estático del agua, caudal, abatimiento y mineralización.
- El Mapa Geológico del área de estudio se actualizó a partir de la información de la Empresa GeoMinera Pinar, los trabajos de campo realizados por el autor y consultas realizadas a geólogos de la Empresa, empleando los software Autocad Map 2005 y ArcGis 9.3. Este mapa está siendo reevaluado por el Instituto de Geología y Paleontología (IGP) actualmente no publicado.
- A continuación se procedió a la elaboración del Mapa Hidrogeológico de la zona de estudio, tomando como base entre otros, los pozos empleados para suministro a distintos objetivos sociales, económicos y abastecimiento humano. En total son 325 pozos y 30 sondeos de investigación, estos últimos perforados durante los trabajos para el levantamiento geológico y prospección a escala 1:50 000 Pinar-Habana (Martínez y Fernández, 1991). En esta elaboración, se emplearon los software AutoCadMap 2005 y ArcGis 9.3.
- A partir del Mapa Hidrogeológico se realizó el perfil geólogo-hidrogeológico esquemático identificado como (A-A'), donde se incluyen cuatro pozos (ver figura 4.3). Se representan los horizontes acuíferos e impermeables y la litología correspondiente. Se empleó el software AutoCadMap 2005.



- Entre los resultados finales del trabajo se obtuvieron los Mapas de profundidad del techo de las calizas que son las rocas acuíferas de mayor interés y el de espesores de los sedimentos Neógeno (eluvio)-Cuaternario en ambos casos se empleó el software Surfer9.0 a partir de la base de datos en Excel. Además los mapas de líneas equipotenciales e isocloruros, se elaboraron por este mismo método. Para el mapa hidroquímico se empleó el software RockWorks15.

## Métodos de Campo

Las primeras labores efectuadas sobre el terreno consistieron en revisar y reconocer los principales aspectos físicos y geográficos del área a estudiar, entre ellos:

- ✓ Reconocimiento geomorfológico, en especial de la zona más al norte, con el fin de establecer la relación entre los materiales carbonatados que afloran en algunas zonas y la alimentación de los acuíferos del Neógeno.
- ✓ Reconocimiento geológico general de los sectores centro y este, fundamentalmente.
- ✓ Inventario de puntos de agua.
- ✓ Toma de muestras de agua en botellas de vidrio con tapón parafrinado y volumen entre 500 y 1000 ml, de acuerdo con el número y tipo de las determinaciones analíticas a realizar.
- ✓ Medidas de niveles piezómetros con sonda eléctrica de fabricación nacional, provista de cable graduado cada 1cm y 100 m de longitud, cubierto en plástico, que permite una precisión en la medida de ( $\pm 5$  mm)

## Métodos de laboratorio

Los métodos de laboratorio consistieron en la realización de análisis químicos de las muestras de agua tomadas en el campo (ver Anexo 3), basado en la metodología aplicada en la Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos, Laboratorio ENAST Pinar del Río, perteneciente al INRH que responden a las normas internacionales de la A.W.W.A. (América Work Water Association). Los elementos determinados en el laboratorio para la mayor parte de las muestras (85%) fueron los siguientes: pH, CE,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ , DQO,  $\text{PO}_4^{3-}$ , SST, Alc.,  $\text{D}_T$ , Tu, T, CT y CF.

**Coliformes Totales:** Por la técnica de los tubos múltiples de fermentación para miembros del grupo coliformes (SMWW 9221B).

**Coliformes termo tolerantes:** Por la técnica de los tubos múltiples de fermentación para miembros del grupo coliformes (SMWW 9221B).

## Condiciones hidrogeológicas del sector de estudio.

### Horizonte Acuífero de los Depósitos Cuaternarios.

De manera general, las aguas contenidas en los sedimentos de cobertura del Cuaternario (Q) tienen un uso práctico poco significativo, aunque como señalan algunos autores, (Peláez y González, 2011) opus cit.; (Torsuev, 1984) si tienen mayor interés desde el punto de vista de mejoramiento del suelo y también desde el punto de vista Ambiental como atenuante o retardador de la contaminación antrópica. Estas aguas se emplean en abastecimientos individuales (captadas en pozos excavados), cuando están contenidas en lentes de arenas gravosas, arcillo-gravosas o arena gravosas; por ejemplo para una vivienda, consultorio médico, escuelas con poca matrícula, y organopónicos con áreas entre 0,1-0,4 hectáreas. Los caudales más frecuentes están entre los 0,3-0,5 L/s. Referido a la calidad química y bacteriológica de estas aguas, se ubican dentro de los parámetros de la Norma Cubana de calidad del agua de consumo humano, (NC 827: 2010) aunque existen zonas, donde como resultado de tener contenidos anormales de nitratos ( $\text{NO}_3$ ), hierro (Fe) y otros elementos pesados o bacterias patógenas, estas aguas no son aptas para el consumo humano, como sucede en las zonas de pastoreos intensivos situadas en Bacunagua, La Barbarita al este del pueblo Los

Palacios y áreas cercanas a construcciones rurales. Los espesores más frecuentes de los sedimentos del Cuaternario oscilan de norte a sur, entre los 10-15 m (más al norte, cerca del pie de monte) y avanzando al sur en dirección al Mar Caribe toman valores entre los 40-50 metros, existiendo zonas donde estos espesores pueden ser mayores

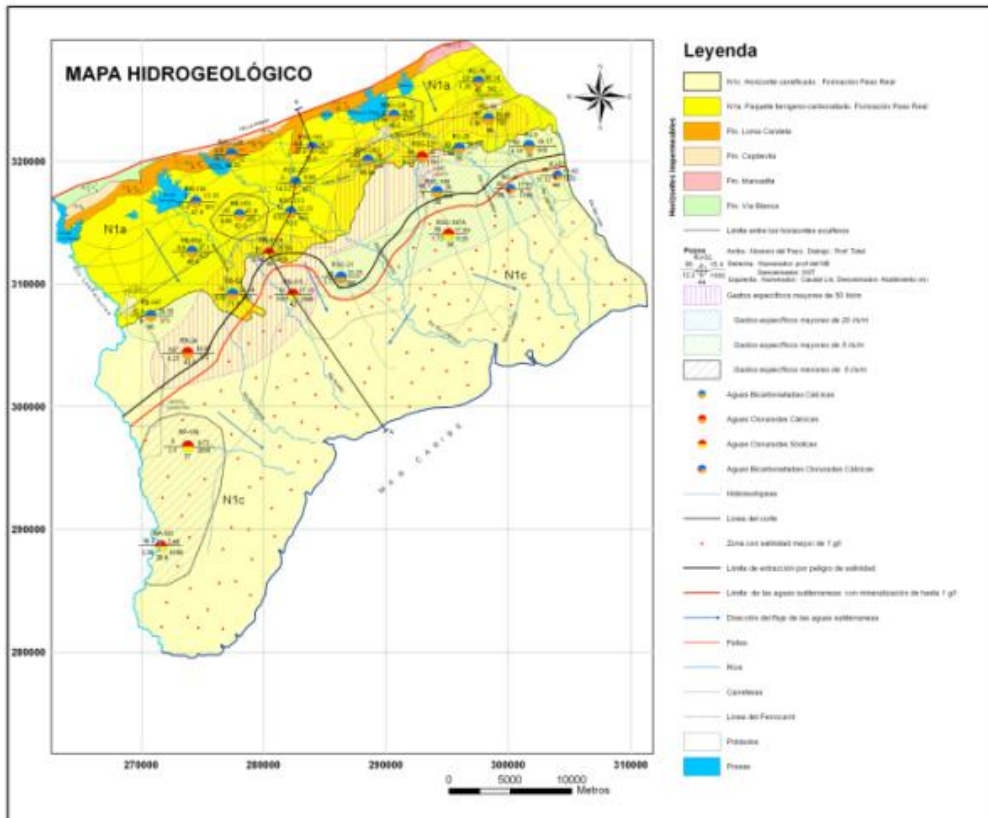


Figura 4 Mapa Hidrogeológico del área a escala 1: 100 000. Modificado con la escala indicada. La línea de intrusión marina presenta 35 años de diferencia (1975-2010).

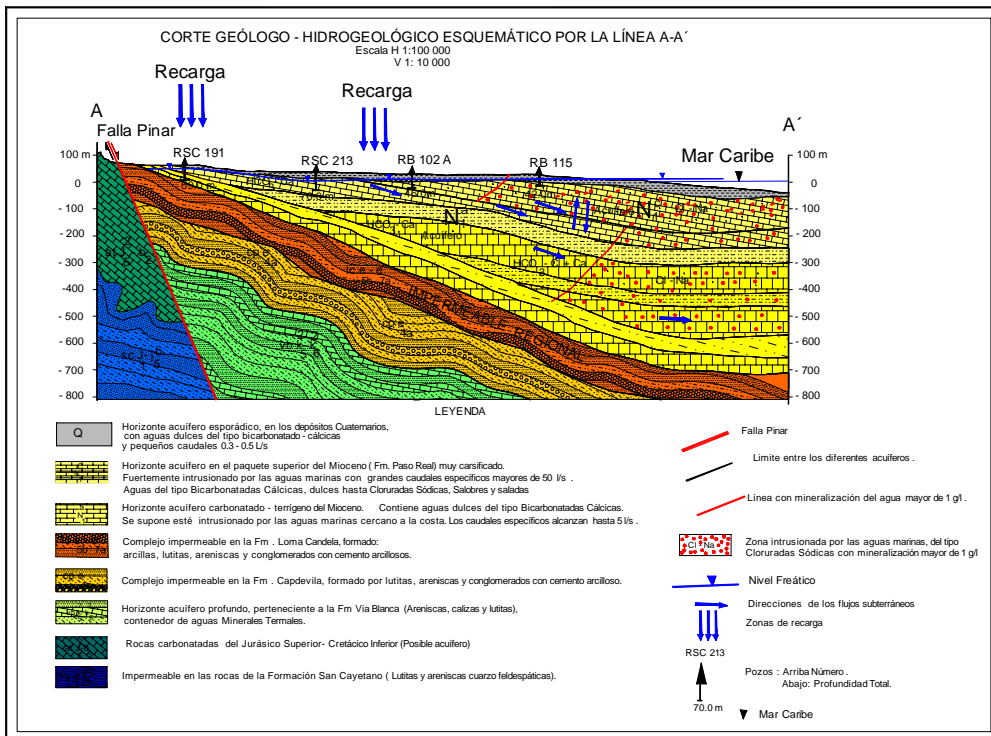


Figura 5 Corte Geológico-Hidrogeológico esquemático por la línea A-A'. Representación del Modelo Conceptual.

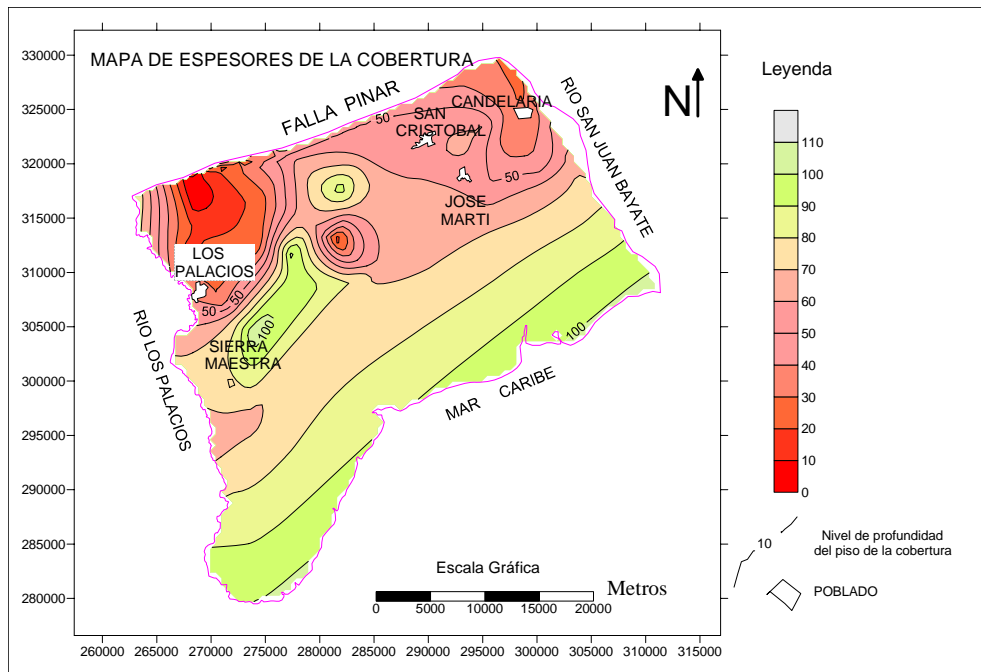


Figura 6 Mapa de Espesores de Sedimentos de la Cobertura Neógeno-Cuaternario.

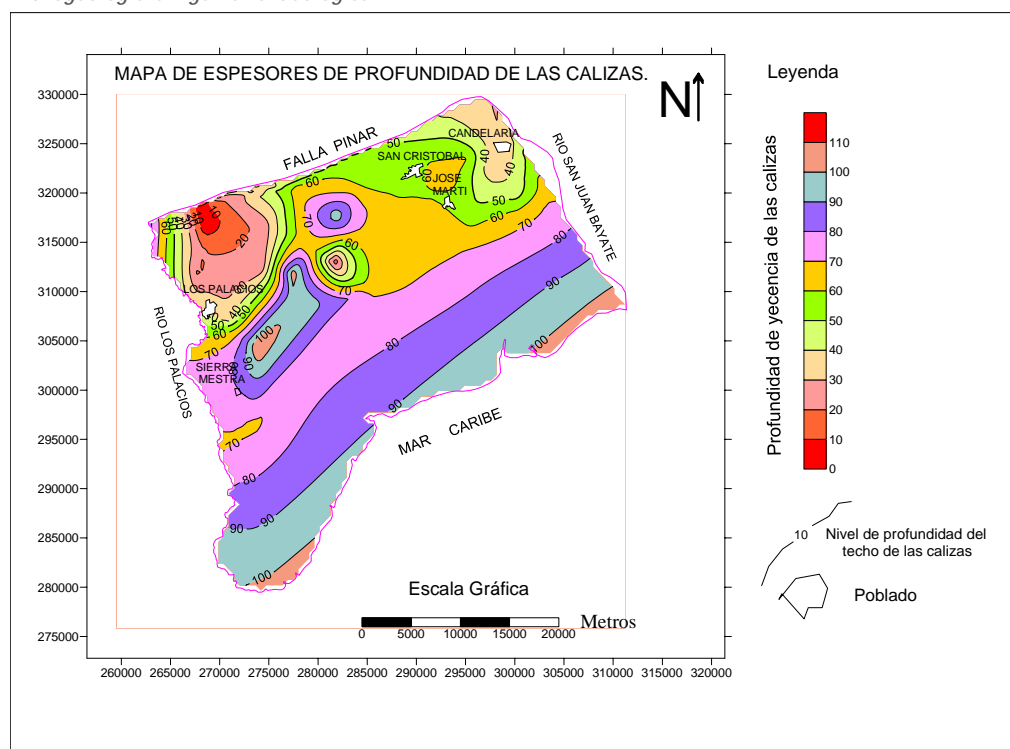


Figura 7 Mapa de la Profundidad del Techo de las Calizas.

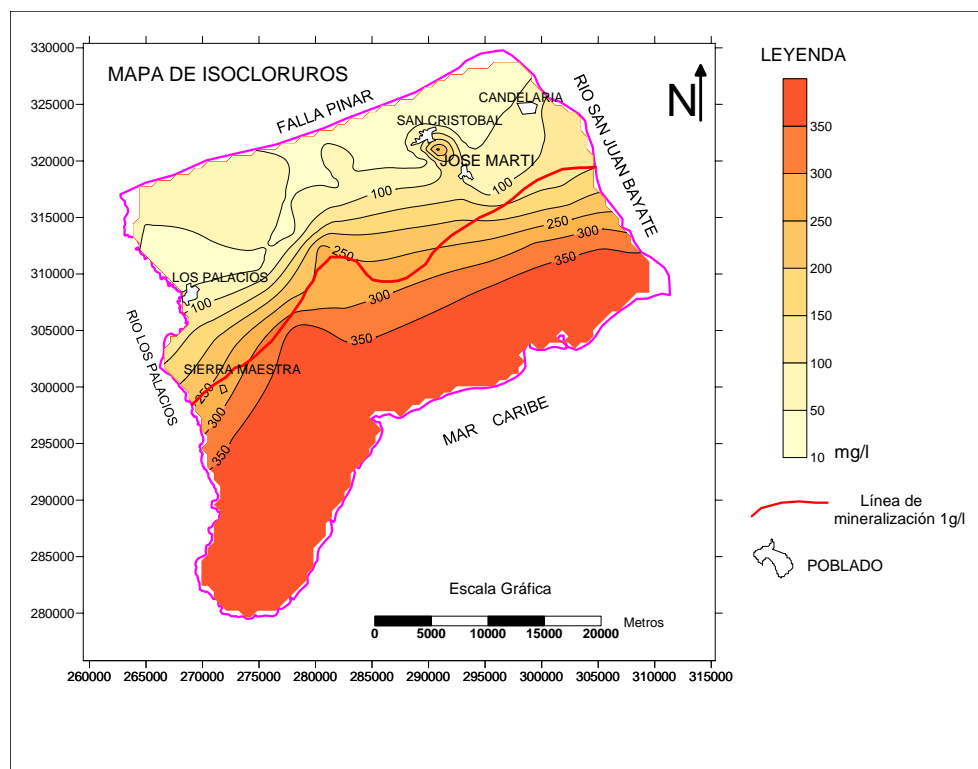


Figura 8 Mapa de Isocloruros del sector de estudio.

## Cálculo de los Recursos de Agua Subterránea.

En este trabajo denominaremos Recursos a la cantidad media de agua que cada año entra y sale en el acuífero. El otro concepto, muy unido al anterior denominado Reservas aunque no ha sido calculado, se entiende como el volumen de agua acumulado en el acuífero o embalse subterráneo a lo largo de los siglos.

En base a los trabajos realizados se elaboraron los cálculos según los cuales, los recursos naturales en el tramo del canal de riego "San Cristóbal" en 1 km de longitud del flujo de las aguas subterráneas es de 100 L/s realizado este por el método de balance. El balance hídrico según (Castany, 1977) se refiere a un periodo bien determinado y todos los elementos han de relacionarse obligatoriamente a un periodo igual.

➤ **Método de Balance.**

$Q_n = M \times l$  donde.

$Q_n$ : Gasto del flujo natural (Caudal), L/s

M: Módulo de escurrimiento, L/s/km

l: Longitud de la toma de agua, km

$Q_n = 100 \text{ L/s/km} \times 40 \text{ km} = 4000 \text{ L/s} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$

En total se situaron 57 pozos en la línea de la toma con una longitud de 40 km. Cuando estén todos los pozos funcionando el gasto total de la misma será de 4,0 m<sup>3</sup>/s o 345 600 m<sup>3</sup>/día.

### Calidad de las aguas.

En este epígrafe se van a describir las características referidas a los aspectos de calidad, basados en la Norma Cubana (NC 827: 2010), identificada como: AGUA POTABLE-REQUISITOS SANITARIOS. Este aspecto de calidad, resulta del mayor interés y mucha importancia, puesto que revela el grado de contaminación (de existir) en el agua empleada para abastecimiento humano que, ha sido de la que se dispone mayor cantidad de resultados. En la tabla I, se muestran, las concentraciones admisibles de los parámetros físico-químicos estudiados, y en el Mapa Hidrogeológico, la ubicación de los pozos con los datos hidroquímicos. Para el desarrollo de los aspectos señalados en dicha tabla, nos basamos en datos recogidos en 45 pozos cuyas aguas se emplean en abastecimientos humanos en los Municipios Los Palacios, San Cristóbal y Candelaria. Comprende los años 2005-2010. Las evaluaciones de estas aguas han sido realizadas por la Empresa de Análisis y Servicios Técnicos Generales (ENAST) perteneciente al INRH en Pinar del Río.

Tabla I. Concentraciones admisibles de los parámetros físico-químicos (NC 827: 2010)

Componente	Concentración máxima deseable mg/L	concentración admisible mg/L
Cloruro(Cl <sup>-</sup> )	200	250
Nitrato(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Ausente	45
SST	500	1000
Sulfato	200	400

➤ **Cloruro (Cl<sup>-</sup>):** El valor más bajo lo presenta el pozo ubicado en la zona conocida como Campo de Tiro, para el abastecimiento del poblado Candelaria, 11 mg/L. Los valores más altos los poseen los pozos RSC-7 (266 mg/L) y el RB-102 (266 mg/L), ubicados respectivamente en San Cristóbal y Los Palacios. Estas captaciones se están monitoreando con más detalles con vistas a identificar la procedencia de los valores anómalos.

➤ **Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>):** En principio se prefiere esté ausente. Se encontró que en el año 2009 el pozo RB-154 tenía 40 mg/L y en el muestreo del segundo trimestre del año 2010, como



resultado de las medidas ejecutadas quedo exento. Otro pozo donde se reportó la tenencia del agua con nitrato, es el RB-114 (Acueducto Fierro) con 19 mg/L. Este valor es inferior al admisible en la norma.

➤ **Sales Solubles Totales (SST):** Solo se tiene con valores por encima de la concentración máxima admisible el pozo RSC-7 con 1110 mg/L, ubicado sobre un estrato que al parecer posee una salinidad anormal, esto se ha descrito con anterioridad en el epígrafe de cloruro y en el mapa hidroquímico. Este punto resulta significativo por encontrarse en una zona superior a la comprendida con Intrusión Marina.

➤ **Sulfato ( $\text{SO}_4$ ):** Todas las captaciones analizadas presentan valores inferiores a la concentración máxima deseable. El menor valor identificado se encuentra el pozo RB-57 (Acueducto Los Palacios) con 2 mg/L. Con el valor más alto se asocia el pozo RSC-7 (San Cristóbal) señalado con anterioridad por presentar también valores no apropiados en otros parámetros estudiados.

#### ➤ **Características físicas**

La conductividad eléctrica expresa la capacidad del agua para conducir la electricidad. Dicho parámetro es función del contenido total en sales de las aguas y aumenta cuando ese valor así lo hace. Es un indicador importante para evaluar las calidades de las aguas. Los valores máximos y mínimos oscilan entre 390 en el pozo RB-57 (Acueducto Los Palacios) y 1520 en el pozo RSC-7. La unidad de medida es el microsiemens por centímetro (mS/cm) a 25° C.

La variación de la conductividad aumenta en el sentido del flujo subterráneo (Norte a Sur), alcanzando valores más elevados en la parte donde existe una fuente de salinización por Intrusión Marina. Con excepción del pozo RSC-7 extremadamente anómalo ubicado en la zona norte, que pudiera ser por tener aguas contenidas en un estrato salino, de lixiviados contaminados u otra procedencia.

En este incremento de la conductividad destacan los siguientes hechos:

- ✓ El sector sur del acuífero situado cerca de la costa es el más salinizado.
- ✓ La evolución generalizada de la salinización se realiza según el eje de avance sur-norte.
- ✓ Los máximos observados en la parte sur del acuífero se explican como consecuencia del avance del frente de la Intrusión Marina en la dirección sur-norte; según el eje anteriormente planteado y debidas a intensas extracciones que soportó dicho sector en décadas pasadas.

## CONCLUSIONES

- En el área estudiada, el acuífero del Cuaternario comprende aguas de propagación esporádica en las arenas y arenas gravosas, con caudales específicos que no sobrepasan 0,3-0,5 L/s/m.
- El sistema acuífero investigado presenta dos horizontes cársicos del Neógeno (Mioceno) en la formación Paso Real, identificados como  $N_1^c$  y  $N_1^a$  y su base impermeable del Paleógeno (Formaciones Loma Candela y Capdevila).
- Los acuíferos reportados, son confinados ambos e intrusionados por las aguas marinas, por ser abiertos al mar.
- En el acuífero  $N_1^c$  las aguas marinas han penetrado hasta el momento unos 10-15 km tierra adentro, pero en el  $N_1^a$  la penetración ha sido notablemente inferior.
- Los caudales específicos en el acuífero  $N_1^c$  son mayores de 50 L/s/m y en el  $N_1^a$  este valor desciende a menos de 10 L/s/m.
- Al norte de la formación Paso Real y sur de la Falla Pinar, los caudales específicos en las formaciones Vía Blanca, Loma Candela, Capdevila no sobrepasan 1 L/s/m.
- En el  $N_1^c$  los recursos de agua calculados tienen el valor de 4 m<sup>3</sup>/s, obtenidos por el método de Balance.

- Cuando una captación asignada a un suministro de agua se contamina, se crean problemas tanto de tipo económico como social, incluyendo el más importante que es la afección a la salud humana.
- Todo estudio o investigación de los recursos hídricos subterráneos, así como todo proyecto de explotación y de aprovechamiento de esas aguas, debe ir precedido del establecimiento del balance hídrico. Este puede tener diversas escalas dimensionales (para todo el globo terráqueo, para un sector, una pequeña área de terreno, hasta llegar al área límite de un pluviómetro) y también referido a espacio de tiempo variable que van desde la media anual, hasta el mes e incluso a la duración de un torrencial aguacero.
- El agua subterránea constituye un recurso estratégico muy importante. De producirse un conflicto bélico estas aguas tendrán demora en contaminarse; lo mismo ocurre al contaminarse las aguas superficiales por accidentes o catástrofes de cualquier tipo.

## Recomendaciones

### ➤ Intrusión Marina

- La gestión de los acuíferos costeros debe ir acompañada con extracciones acordes a la recarga del acuífero (sin extracción excesiva). En esta misma línea de pensamiento se debe considerar tanto la proximidad de las captaciones al litoral o la costa, como entre ellas. Ya que las cercanías en ambos casos se ha comprobado traen aparejados problemas, cuando los caudales son en exceso y no controlados.
- Ha de considerarse desde el punto de vista técnico, una red de observación complementaria (a la actual) de las aguas subterráneas, con diseño adecuado para los piezómetros, con el propósito de monitorear tanto la Intrusión Marina, como los niveles piezométricos.
- Sería de mucho interés realizar trabajos de Geofísica con vistas a determinar en profundidad los cambios en cuanto a la existencia del índice de cavernas y zonas carsificadas. Así como la comprobación de esto con perforaciones de pequeño diámetro y toma de muestras continua.
- Al considerar la fragilidad del recurso hídrico subterráneo y los aspectos de contaminación, que para el control de las aguas subterráneas y la Intrusión Marina que los afectan, así como los aparentes volúmenes que parecen existir en los depósitos del Cuaternario, deben dedicarse investigaciones a la evaluación y caracterización de los mismos.
- Debe contemplarse el sello sanitario en la construcción de pozos destinados a la explotación de las aguas subterráneas (para evitar la entrada de aguas contaminadas) y en especial aquellos cuyas aguas serían empleadas en abastecimientos humanos (esto es aplicable para los pozos donde se explotan aguas minero-medicinales). Cementar la tubería de revestimiento al menos los primeros 5-10 m.
- Cuando por cualquier causa se abandona una captación (pozo) con vistas a evitar la contaminación o entrada de contaminantes a los acuíferos y también evitar accidentes físicos (caída de animales o personas), se han de sellar con materiales apropiados (arena-cuarcífera desinfectada, arcilla y hormigón entre otros). Previa la desinstalación de la captación (extracción de la tubería de revestimiento si no está cementada, el sistema de elevación, tubería de impulsión u otros elementos).
- Aunque siempre proponemos prevenir "antes que curar", conocemos que la corrección ante la contaminación por Intrusión Marina en la mayoría de los casos no es posible (aunque no siempre), resulta muy costosa, difícil y puede suponer actuar sobre grandes volúmenes de agua. No siempre se dispone de agua suficiente con buena calidad a emplear en la restauración. Además, se requieren obras de ingeniería complementarias y control hidrogeoquímico.
- En la zona donde se ubica el pozo RSC-7 uno de los empleados para el abastecimiento al pueblo de San Cristóbal, los valores del ión cloruro se notan muy altos (266

mg/L). Debe realizarse un estudio y análisis en detalle para la solución de esta situación. De donde procede la contaminación, posibilidad de sustituirla, u otra solución.

➤ **Suelos**

- Realizar el estudio de la dinámica de las sales contenidas en los suelos, y del desarrollo del cultivo por campañas (2 veces al año).
- De acuerdo con los contenidos de sales en estos suelos, el empleo de métodos adecuados de desalinización de los mismos, permitirá el uso de estas tierras con efectividad para el cultivo del arroz. Con este propósito, debe construirse un sistema de drenaje que permita el lavado de los suelos con aguas de buena calidad química, que a nuestro criterio ha de ser importada de embalses.
- Realizar las labores de riego según los tipos de suelos y propiedades hidrofísicas; así como construir sistemas de drenajes que permite de evacuar las excedentes; ya sean procedentes del riego o las lluvias.

➤ **Contaminación Antrópica**

- En las captaciones destinadas para consumo humano, debe considerarse la evaluación de los componentes químicos y la posible relación de algunos de ellos con una fuente contaminante, este puede ser el caso de un pozo aislado, con contenidos anormales en cuanto al ión cloruro por ejemplo.
- Evitar o prohibir almacenar sustancias contaminantes (abonos, combustibles u otras) sin ejecutar medidas protectoras y de estanqueidad. Se conoce que en zonas donde las rocas carbonatadas como las calizas afloran en la superficie del terreno, los vertidos ocasionales (accidentes o derrame) de abonos o hidrocarburos pueden inutilizar un acuífero al contaminarlo.
- Los vertederos de desperdicios (sólidos) deben estar controlados, con vertidos en forma de rellenos sanitarios.
- Para la introducción (inyección) de sustancias contaminantes en profundidad, se deben realizar estudios detallados de los estratos geológicos y posición espacial. También de los parámetros hidrogeológicos fundamentales, al menos (Transmisividad, Permeabilidad y Coeficiente de almacenamiento).

**Agradeiminetos**

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto 1303 de Hidrogeología Ambiental, financiado por el Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA-CITMA, que es coordinado por el primer autor. Además, se agradece al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos en Pinar del Río por la facilidad brindada para el acceso a los datos.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Barrios, E., Marrero; J., Portuondo; A., R., Núñez. Placeres, (1988) Levantamiento geológico a escala 1:100 000 y búsqueda acompañante Pinar Sur. ONRM (Oficina Nacional de Recursos Minerales), La Habana, Cuba.
- Benett, H.H. (1959). Los suelos y la agricultura en los municipios Los Palacios, San Cristóbal y Candelaria. Publicaciones de suelo, No 5. La Habana. Cuba, pp. 10-17.
- Castagny, G. (1977) Traité pratique des eaux souterraines. Ed. Dunot, Paris, France, pp. 750.
- Franco, G. L. (1994) Léxico Estratigráfico. Instituto de Geología y Paleontología (IGP). La Habana, Cuba.

- González, Báez A. (1973) El agua subterránea: Su uso racional y controlado en la agricultura. Rev. Vol. Hidráulica N°26, La Habana, Cuba, pp. 35-39.
- González, Cabrera, N. A. y R. Peláez, García (2007) El Empleo Conjunto de Aguas Superficiales y Subterráneas en la Mitigación de los Impactos de la Sequía. Experiencias en la Llanura Sur de Pinar del Río, Cuba. Ira. Convención Internacional de Geografía, Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial. Universidad de la Habana, septiembre 25-28, pp. 1-12.
- González, Báez, A.; S. Jiménez, Echevarría (1988a) La Protección Sanitaria a los Acuíferos Cásicos Cubanos: Un Problema Actual. Rev. Vol. Hidr. N°77 (Especial), Primera parte. La Habana, Cuba, pp. 3-18.
- Marrero, A.; J. Rodríguez, M. Pérez., E. Suárez y E. Vega (1989). Mapa de suelos de la república de Cuba. 1: 1 000 000.
- Martínez, D.; R. Fernández (1991) Informe sobre los resultados del levantamiento geológico y prospección a escala 1:50 000 Pinar-Habana. Empresa Geominera Pinar. Tomo I, Tercera y Cuarta parte.
- Nuevo Atlas Nacional de Cuba (1984). Academia de Ciencias. Suelos de la Provincia Pinar del Río, mapa a escala 1:250 000.
- Norma Cubana, (2010) AGUA POTABLE-REQUISITOS SANITARIOS, NC (827).
- Peláez, García, R.; N. A. González, Cabrera (2011) Los acuíferos y presas subterráneas, soluciones ingeniosas frente a las sequías y déficit de agua en regiones cubanas. (Sequías cubanas mito o realidad). Memorias del IX Congreso Cubano de Geología. Taller sobre aguas subterráneas y contaminación, la Habana. Cuba, pp. 1-8.
- Soca, Y (2002) Regionalización Hidrogeológica de la Provincia Pinar del Río. Escala 1: 250 000: Un Nuevo enfoque, Trabajo de Diploma para Ingeniero Geólogo, Dpto. Geología, Universidad de Pinar del Río Hnos. Saiz.
- Torsuev, V. (1984), Esquema Precisado de los estudios hidrogeológico e ingeniero geológico para la utilización y conservación de las aguas en el tramo Ajiconal-Sábaló. Informe técnico. Español-Ruso. Mecanografiado, archivo del INRH, Pinar del Río, Cuba, pp. 39.
- Vías, J.M. ; B. Andreo; M.J. Perles; F. Carrasco; I. Vadillo; P. Jiménez (2006) Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (Karstic) aquifers: The COP method. Application in two pilot sites in south Spain. Hydrogeology Journal. Vol. 14, N°6, sept. pp.913-925.