

Modelo físico geológico del acuífero cárstico San Diego de los Baños, Pinar del Río, Cuba

Antonio J. Santibañez Rodríguez email: asantibanezro@gmail.com

Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae). Calle 114, No 11901, e/ 119 y 127, Marianao 15, Ciudad de La Habana, Cuba.

Lisbeth Núñez Haugh email: lnunezh@civil.cujae.edu.cu

Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae). Calle 114, No 11901, e/ 119 y 127, Marianao 15, Ciudad de La Habana, Cuba.

José Antonio Díaz Duque email: jaduque@civil.cujae.edu.cu

Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae). Calle 114, No 11901, e/ 119 y 127, Marianao 15, Ciudad de La Habana, Cuba.

RESUMEN

El acuífero cárstico San Diego de los Baños ha sido poco estudiado desde el punto de vista geofísico, provocando un déficit de información petrofísica. Con la aplicación del principio de analogía, información geológica de trabajos desarrollados en el área e información de propiedades físicas medidas en zonas con características similares a este acuífero, se modelaron pozos distribuidos en todo el sector, logrando confeccionar el primer modelo físico geológico de este acuífero cárstico. Se elaboraron los modelos de parámetros físicos 3D y se calcularon las respuestas locales de los campos gravitatorio y magnético, producidas por fuentes que se encuentran hasta los 400 metros, además se calculó el comportamiento de la resistividad eléctrica en el corte geológico. Se propone el complejo racional de métodos geofísicos que contribuiría a una mejor caracterización del acuífero.

Palabras clave: acuífero, complejo racional de métodos geofísicos, Cuba, modelo físico geológico, San Diego de los Baños.

Physical geologic model of karst aquifer San Diego de los Baños, Pinar del Rio, Cuba

ABSTRACT

The karst aquifer San Diego de los Baños has been little studied from the geophysical point of view, provoking a deficit of petrophysical information. With the application of the analogy principle, geologic information of works developed in the area and information of physical properties measures in areas with similar characteristics to this aquifer, wells were modeled distributed in the whole sector, being able to create the first physical geologic model of this karst aquifer. The models of physical parameters 3D were elaborated, and the local answers of the gravitational and magnetic fields were calculated, taken place by sources that are until the 400 meters, the behavior of the resistivity it was also calculated in the section. Finally, it was proposed the rational complex of geophysical methods that would contribute to a better characterization of the aquifer.

Keywords: aquifer, rational complex of geophysical methods, Cuba, physical geologic model, San Diego de los Baños.

INTRODUCCIÓN

Resulta de suma importancia optimizar el manejo y control de los recursos hídricos para su mejor aprovechamiento. En dicha optimización se utilizan métodos y técnicas avanzadas que constituyen las claves de los estudios modernos en los acuíferos, que componen unas de las principales fuentes de agua. Entre las principales técnicas que mejor puede resolver la estructura de un acuífero está la modelación, que permite determinar la geometría y la distribución de las propiedades físicas en el subsuelo, específicamente, la petrofísica. Esta constituye el nexo entre la geología y la geofísica. En este sentido la modelación petrofísica representa un eslabón fundamental para la elaboración de los modelos físico-geológicos (MFG). El MFG es la representación generalizada y formalizada de las características geológicas y físicas del objeto estudiado y su roca de caja, con la máxima aproximación a las condiciones reales y en correspondencia con el conocimiento esencial existente sobre el objeto.

Los acuíferos de aguas mineromedicinales se caracterizan por la existencia de fracturas de diferente naturaleza, que le confieren una gran complejidad geológico estructural. Este aspecto es común prácticamente para todas las aguas subterráneas de Cuba. Los diferentes acuíferos estudiados se caracterizan por la existencia de más de un horizonte acuífero. Debido a esta gran complejidad en muchos de ellos (Menéndez, Fragua, Aurora, Elguea y San Diego) se producen mezclas de aguas de diferentes horizontes acuíferos y variada composición química, provocando rangos muy amplios de variación de la mineralización. Los acuíferos de aguas minerales naturales y mineromedicinales son mayoritariamente confinados y semiconfinados, siendo en algunos casos surgentes (Rodríguez 1998).

La confección del MFG optimiza y abarata los estudios de acuíferos sobre todo porque es una representación más cercana a la realidad. Para la confección del mismo hay que considerar varios elementos: el modelo geológico de los objetos de interés que incluye los principales atributos geológicos: litología, forma, dimensiones, posición, estructura y otros datos; el modelo petrofísico que muestra las principales propiedades físicas de los objetos geológicos de interés: densidad, susceptibilidad magnética, resistividad, cargabilidad entre otras; y el modelo de los campos físicos que describe el carácter de los campos físicos en el semiespacio superior e inferior de los objetos geológicos de interés.

La zona occidental cubana se caracteriza por presentar varios ambientes geológicos y litológicos, condicionantes para la presencia de fuentes de aguas minerales y mineromedicinales de diversa naturaleza fisicoquímica. Los estudios más recientes realizados en Cuba han estado a cargo de varias entidades como el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), el Instituto de Geografía Tropical (IGT) y el Instituto de Geología y Paleontología (IGP), en colaboración con varias universidades, destacándose sobre todo los trabajos de Fagundo que ha dedicado gran parte de su carrera al estudio geoquímico de los acuíferos de aguas mineromedicinales (Fagundo et al. 1996). En los últimos años ha sido un interés de los investigadores desarrollar estudios geólogo-geofísicos utilizando la modelación de las estructuras geológicas. Un extenso trabajo diseñando modelos geoelectricos para diferentes formaciones geológicas con fines geotécnicos de zonas cercanas al acuífero San Diego de los Baños fue realizado por García (2018) como parte de su tesis doctoral.

Aunque la provincia de Pinar del Río ha sido objeto de estudio en diversas investigaciones hidrogeológicas, hidroquímicas y geofísicas, no se ha logrado una adecuada integración del conocimiento geocientífico, lo que ha motivado la creación del proyecto nacional, coordinado por la Universidad de Pinar del Río, “Sistema de evaluación y control de los recursos hídricos en la región centro oriental de la Cordillera de Guaniguanico” que tiene como objetivo integrar el

conocimiento hidrogeoquímico e hidrodinámico de las aguas subterráneas que drenan la porción centro oriental de esta cordillera. Una de las entidades ejecutoras del proyecto es el Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” que se encarga del procesamiento e interpretación de los datos geofísicos. A pesar de las diversas investigaciones realizadas hasta la fecha, ninguna ha estado focalizada hacia la confección del modelo físico geológico del acuífero San Diego de los Baños, lo cual es de vital importancia para esclarecer su estructura, contribuyendo con la gestión sostenible de sus recursos hídricos para el abastecimiento de agua para la población cercana y el turismo de salud.

De esta forma, en la investigación se identificó como problema científico: la gran complejidad geólogo estructural del acuífero San Diego de los Baños crea incertidumbre sobre la sostenibilidad de la gestión de los recursos hídricos. Y se formuló la hipótesis científica: la confección del modelo físico geológico del acuífero San Diego de los Baños facilitará la disminución de la incertidumbre en la sostenibilidad de la gestión de sus recursos hídricos.

El presente trabajo, resultado de la investigación realizada, persigue como objetivo general, realizar la caracterización geólogo-geofísica de la región donde se encuentra el acuífero San Diego de los Baños y como objetivo específico, elaborar el modelo físico-geológico del acuífero San Diego de los Baños.

LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio pertenece a la provincia Pinar del Río y se localiza al noroeste del poblado de San Diego de los Baños (figura 1), que es el centro urbano más cercano. Al suroeste se sitúa el municipio de Consolación del Sur y al sureste el de Los Palacios. La zona abarca una extensión de 10 km², en forma de una franja de aproximadamente un kilómetro de ancho por 10 km de largo, extendiéndose desde el NO de los Baños de Bermejales hasta el poblado de San Diego de los Baños, abarcando todo el trayecto del río San Diego.

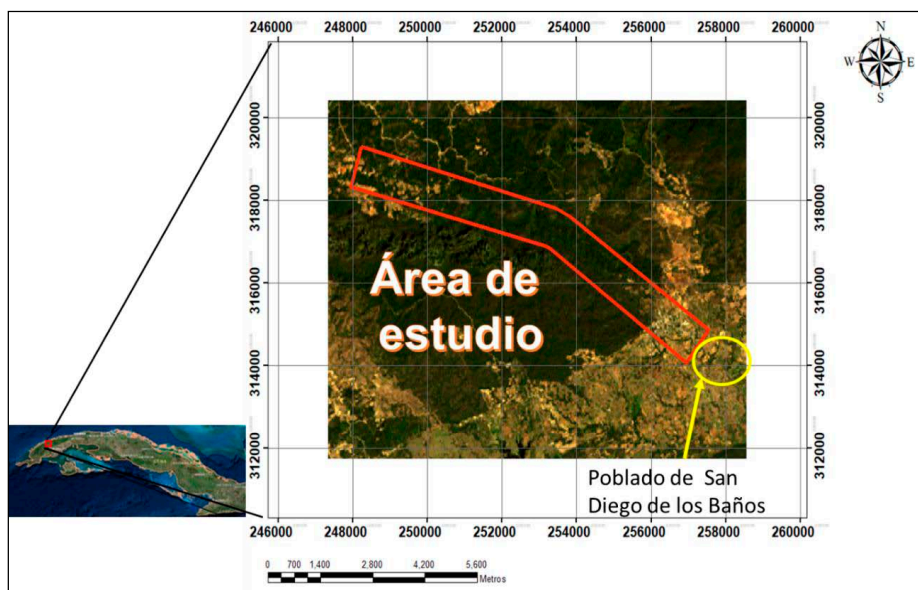


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. Sector San Diego de los Baños (SSDB), Sector Bermejales (SBMJ).

El relieve de la región está constituido por elevaciones cársticas de calizas (mogotes) con forma de cúpulas de laderas verticales, así como por sierras y colinas pizarrosas, entre las que se

encierran valles llamados llanuras cársticas marginales. Las colinas pizarrosas se caracterizan por cimas redondeadas y laderas con variadas pendientes muy erosionadas. Es notable la presencia de fenómenos cársticos en el relieve superficial como el diente de perro y las dolinas. Las cotas en toda el área oscilan entre los 50-200 m, caracterizando un relieve ondulado y pendientes abruptas, que en dirección al poblado de San Diego de los Baños se hace más suaves.

La vegetación en el área está en correspondencia al tipo de suelo y al relieve, predominando en las colinas pizarrosas de la Formación (Fm.) San Cayetano grandes bosques de pinos, en los mogotes de la Fm. Artemisa se desarrollan árboles típicos del carso cónico, en las zonas más bajas (llanas) se encuentran fundamentalmente arbustos espinosos y frescos (Lima 2009).

La principal corriente superficial de la región y del área es el río San Diego también conocido como Caiguanabo en un tramo de su recorrido, corre de oeste a este y se caracteriza por ser estrecho y de cauce profundo, en algunos tramos forma meandros. Sus afluentes más importantes son el río Las Catalinas y el arroyo El Flamenco que corren de norte a sur y que a su vez tienen otros afluentes que enriquecen en época de lluvias su caudal (Peláez et al. 1990).

El área está enmarcada en la Zona Estructuro Facial Sierra del Rosario y los depósitos están representados por las secuencias terrígenas de la Fm. San Cayetano ($J_1 - J_3^{ox}$) y Francisco (J_3^{ox}), así como los depósitos carbonatados de la Fm. Artemisa ($J_3^{th} - K_1$). En la porción sur del yacimiento se encuentran los depósitos de la subzona San Diego de los Baños, representados en este caso por las secuencias flyschoides de la Fm. Capdevila y los sedimentos terrígenos de la Fm. Manacas. El cuadro tectónico de la provincia en general es complicado con un gran desarrollo de dislocaciones disyuntivas y plicativas, así como por la existencia de grandes y complejas estructuras, producto de las fases orogénicas que afectaron al geosinclinal cubano, representadas al norte de la falla Pinar por la Zona Estructuro-Facial Guaniguanico. Al sur, en la zona San Diego de los Baños, el desarrollo de la tectónica es más simple, en general las capas son horizontales, casi monoclinales e inclinadas hacia el sur. Estas dos zonas están separadas entre sí por la falla Pinar, la cual constituye la estructura disyuntiva más importante en el desarrollo tectónico de la región (Peña 2000).

En el área está ampliamente extendido el horizonte acuífero asociado a las calizas agrietadas y carstificadas del Jurásico Superior, Fm. Artemisa, que de manera general se presentan sin presión y con gran variabilidad de los parámetros hidrogeológicos principales desde 1,0 a 14,0 m/día para el coeficiente de filtración con gastos entre 0,6 y 10,1 l/s; fuera de las áreas de los yacimientos de aguas mineromedicinales predominan las aguas del tipo bicarbonatadas-cálcicas con una mineralización los 0,8 g/l. La alimentación de los horizontes se produce por la infiltración de parte de las precipitaciones atmosféricas que caen directamente en la zona. La descarga de las aguas subterráneas ocurre por la red fluvial, en especial por el río San Diego; localmente se descargan por manantiales de origen cárstico cuyos gastos oscilan entre 0,5 – 15 l/s (Lima 2009).

La base impermeable regional está representada por los depósitos terrígenos de la Fm. San Cayetano que está ampliamente extendida en la región y están constituidas por limolitas y areniscas cuarzosas que contienen aguas de propagación esporádica en las zonas de agrietamiento. Frecuentemente las escamas de los sedimentos terrígenos recubren los depósitos carbonatados del Jurásico constituyendo así la cobertura impermeable. Por último, las aguas asociadas a las zonas de fallas están relacionadas con las aguas mineromedicinales extendidas tanto en el sector San Diego como en Bermejales, y en otros lugares donde existen manifestaciones de estas aguas como la cueva de los Portales, Loma del Infierno. La Güira, Los Cuartones, entre otros (Peña 2000).

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Para la confección del modelo físico-geológico del acuífero San Diego de los Baños se consideraron las características generales de los datos geofísicos disponibles (gravimétricos, magnéticos, eléctricos y las propiedades físicas), así como su descripción y técnicas de procesamiento aplicadas.

Los datos gravimétricos y magnéticos del área fueron brindados por el IGP (Mondelo y Sánchez 2011) y los datos de los estudios geoeléctricos fueron facilitados por la Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM), pertenecientes al levantamiento de búsqueda detallada en el sector San Diego de los Baños- Bermejales realizado en el año 1990 por el equipo de trabajo encabezado por el Ing. Roberto Peláez, vale destacar que es el único trabajo del cual se disponen datos geofísicos de la zona (Peláez et al. 1990).

La distribución de los intervalos entre isoanómalas para la determinación de la anomalía de Bouguer fue de 0,5 mGal y el error de interpolación de $\pm 0,35$ mGal para el 10 % de los puntos. Los datos magnetométricos se basan fundamentalmente en el levantamiento aerogamma-espectrométrico y magnético (LAGEM) a escala 1: 50 000, efectuado entre 1979-1993. En las áreas donde no se planificaron líneas de vuelo, se utilizaron los datos magnéticos a escala 1: 500 000 realizada en 1963 por O. N. Soloviev y sus colaboradores. El error de interpolación no se calculó en los mapas magnetométricos, puesto que para la confección de estos se utilizaron las cuadrículas originales del LAGEM a escala 1: 50 000. El valor nulo escogido fue de 43 000 nT. El modelo digital de elevaciones con resolución espacial de 25x25 metros (USGS, 2005) fue suministrado por el Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana.

En el área de estudio, solo se dispone de datos de núcleos, descripciones de columnas geológicas de pozos, cortes geológicos de detalle y sondeos eléctricos verticales (SEV), correspondientes al levantamiento llevado a cabo por Peláez et al. (1990); además de los estudios regionales del levantamiento desarrollado por el Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME) en 1986. Es por ello que para la obtención de los datos petrofísicos fue necesario aplicar el principio de analogía, utilizando la descripción litológica de las columnas geológicas de los pozos y los cortes geológicos a detalle del sector, los que se correlacionaron con datos de pozos realizados en el levantamiento CAME II (Martínez et al., 1988), de los cuales se dispone de mediciones de susceptibilidad magnética y de densidad, tomadas de testigos de perforación extraídos en intervalos regulares, de 5 a 10 metros hasta completar la profundidad total del pozo.

Las descripciones litológicas realizadas por los geólogos de perforación permitieron realizar una caracterización integral de los pozos con información de susceptibilidad magnética y densidad de las rocas in situ. Producto del levantamiento de búsqueda detallada, en el área se cuenta con información de 14 pozos, de profundidades aproximadas a los 400 m, además de cuatro perfiles geológicos de 1000 m de extensión con dirección noreste – suroeste, en los cuales se describen las formaciones y las litologías presentes en el sector, permitiendo una mejor correlación con los pozos del levantamiento CAME II (Martínez et al., 1988).

Con toda esta información del levantamiento de Peláez et al. (1990) y del levantamiento CAME II (Martínez et al., 1988), aplicando el principio de analogía, se le otorgaron valores de propiedades físicas (densidad, susceptibilidad magnética, y resistividad) a las formaciones presentes en los cortes geológicos ya existentes del área de estudio. Para generar la base de datos que almacenara estos valores de propiedades, se modelaron 220 pozos con datos de propiedades físicas con una distancia de promedio de 200 m y una profundidad máxima de 400 m. La metodología general del trabajo puede apreciarse en la figura 2.

Inicialmente se parte de la información geológica, petrofísica y geofísica disponible en los fondos geológicos del IGP y la ONRM. En el sistema informático Oasis Montaj (GEOSOFT 2008) se crearon los ficheros de entrada y se confeccionaron los voxeles¹ de propiedades físicas o modelos 3D de parámetros físicos que sirven de modelo inicial al módulo GMSYS 3D para calcular los campos potenciales. Las anomalías calculadas a partir de los voxeles sólo reflejan las componentes locales de los campos gravitatorio y magnético, puesto que los voxeles únicamente llegan hasta una profundidad máxima de 460 metros (pozo más profundo) y que tienen como tope el modelo digital de elevaciones. A partir de los modelos 3D de parámetros físicos se obtuvieron los mapas de parámetros físicos.

Como resultado final se construye el modelo físico-geológico, integrado por el modelo geológico, el modelo petrofísico y el modelo de los campos físicos (gravitatorio, magnético y la resistividad modelada). Con posterioridad se pasa a definir el complejo racional de métodos geofísicos para la caracterización de este tipo de acuífero, teniendo en cuenta las características del modelo y la documentación bibliográfica analizada.

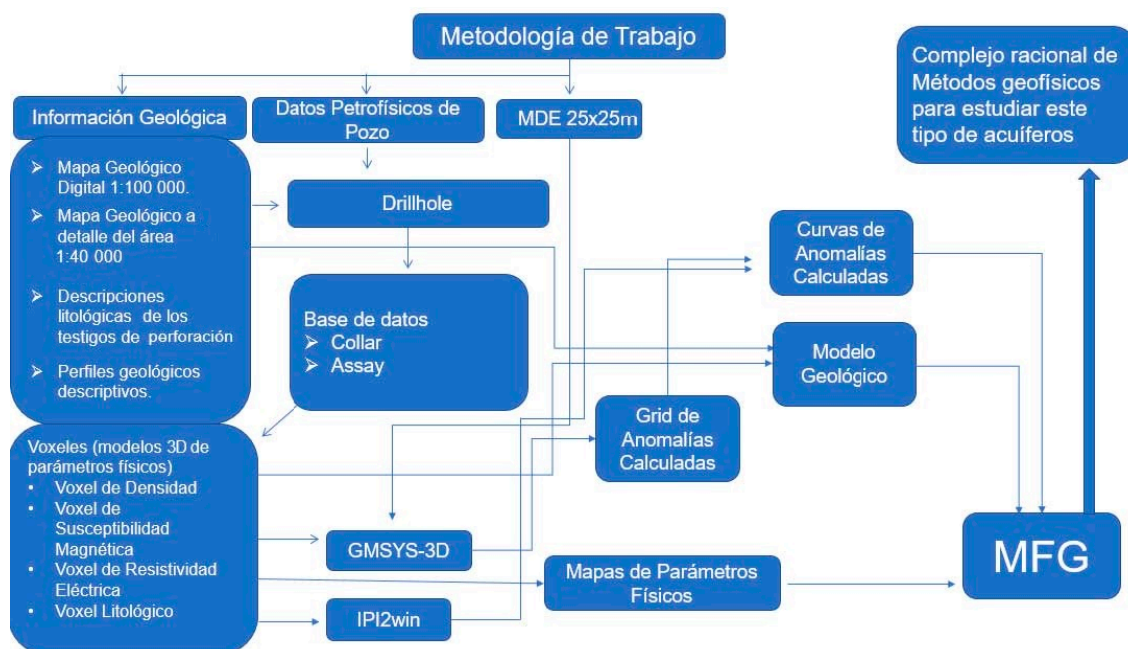


Figura 2. Metodología de trabajo para el procesamiento de los datos

Confección de los modelos de parámetros físicos 3D

Para la confección de un voxel se empleó la extensión 3D, con la opción Gridding. Existen dos métodos de interpolación definidos para estas tareas y son el Kriging y el Inverso de la Distancia. Se utilizó el método de interpolación Kriging y no el Inverso de la Distancia porque se comprobó que con el mismo los resultados no eran tan nítidos y presentaba errores de interpolación cuando se aumentaba el blanqueado. Otro parámetro que es necesario tener en cuenta es el tamaño de celdas (*cell size*) que el programa calcula, a partir de la distribución de los datos en área y sugiere el más adecuado. Por defecto aparece 50 m², pero se probó con otras magnitudes (5, 25 y 100 m²) para comparar los resultados y escoger el más favorable, dejando predefinida la opción cuatro del blanqueado (*blank*).

¹ El voxel es la unidad cúbica que compone un objeto tridimensional.

El blanqueado es un comando que tiene una relación directa con el tamaño de las celdas. Aquellos puntos del área que se encuentran a una distancia mayor que la señalada por el programa, aparecen como espacios en blanco. Por defecto, está definido por el número cuatro, lo que significa que cualquier nodo de voxel que no esté dentro de cuatro celdas, quedará en blanco. Si se aumenta demasiado el tamaño de celdas, se corre el riesgo de perder la resolución, pues, si una celda abarca mucha área va a recibir la influencia de varias mediciones, por lo que el programa le asignará un valor promedio a la celda y se dejarán de caracterizar las variaciones laterales y verticales de las propiedades físicas.

Para la confección del modelo litológico 3D, se creó un voxel a partir de la nomenclatura en código AGSO, a la cual se le añadieron los códigos correspondientes a cada litología presente en los cortes en profundidad en correspondencia con la información de los testigos de pozos. La principal desventaja reside en que las descripciones litológicas no pueden ser interpoladas porque se trata de palabras o códigos litológicos y no de valores numéricos, es por ello que puede representar rocas de distinta naturaleza y formación geológica con el mismo color, y el programa informático no permite el cambio de esta leyenda cromática. Otras dificultades son las pocas opciones que tiene el Oasis Montaj para la representación de fallas y que la visualización con colores no es acorde con las normas de representación de datos geológicos utilizada en Cuba.

Cálculo de los campos físicos

El GMSYS 3D no permite modelar dos propiedades a la par, por tal motivo se realizaron dos modelaciones, una para los datos de densidad y otras para los datos de susceptibilidad magnética. Para el cálculo de la tarea directa es necesario que no existan espacios en blanco en los voxeles, pues los cálculos se ejecutan aplicando el Algoritmo de Parker que utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la matriz que se emplea en la transformación de los datos requiere estar completa. Se tomaron como modelos de entrada al GMSYS 3D los voxeles con tamaño de celda de 25x25 metros y con blanqueado de 16 celdas. Se seleccionó este tamaño de celda porque la extensión superficial del área es de unos 10 km² y la separación entre pozos se aproxima a los 150 metros.

A partir del MDE se confeccionaron los modelos hasta una profundidad de 530 metros. Para el cálculo de las anomalías de Bouguer se tomó como densidad de capa intermedia 2,67 g/cm³. Otros parámetros que exige el programa son la superficie de medición que se quiere simular y la anomalía observada. Se escogió que la superficie de medición fuese el MDE para suponer que los datos fueron medidos en la misma superficie terrestre. Se tomó como valor de anomalía observada la cuadrícula de ΔG de Bouguer. Las anomalías calculadas se aprecian en la figura 3.

Para la obtención del ΔT calculado, se tomó una susceptibilidad de fondo de $0 \times 4\pi \cdot 10^{-6}$ SI, una inclinación del campo magnético de 51,26 °, una declinación de -0,49° y una intensidad de 45524,56 nT. El programa informático calculó estos parámetros a partir del International Global Reference Field (IGRF) para las coordenadas del área y el año 1986 (año en que se realizó el levantamiento). La altura de medición fue de 60 metros (la misma altura a la que fue desarrollado el LAGEM en esta área). Las cuadrículas con las anomalías calculadas, ya reducidas al polo, se muestran en la figura 4.

Para corroborar la correspondencia entre las propiedades físicas de las rocas y las anomalías calculadas, se trazó un perfil en San Diego de los Baños, del que se tiene la información geológica y su localización geográfica (Peláez et al. 1990), sobre el cual se realizaron cortes 2D a los modelos 3D de densidad y susceptibilidad magnética generados en el GMSYS 3D. En el caso del modelo de campos físicos para la resistividad, se dispuso de los datos de cortes geoeléctricos

de resistividad aparente hasta una profundidad aproximada de 200 m, pertenecientes a los levantamientos de SEV, realizados por Peláez et al. (1990).

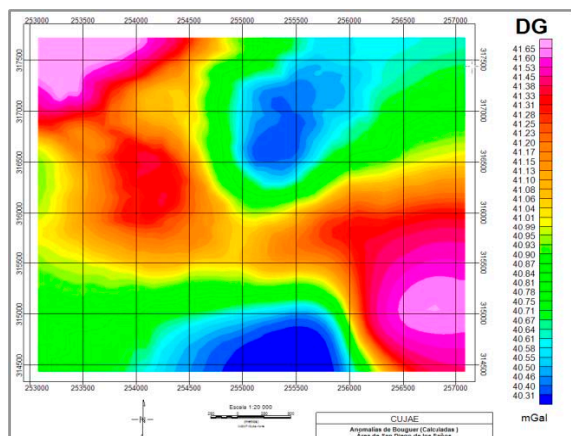


Figura 3. Anomalías calculadas de ΔG en el Sector San Diego de los Baños.

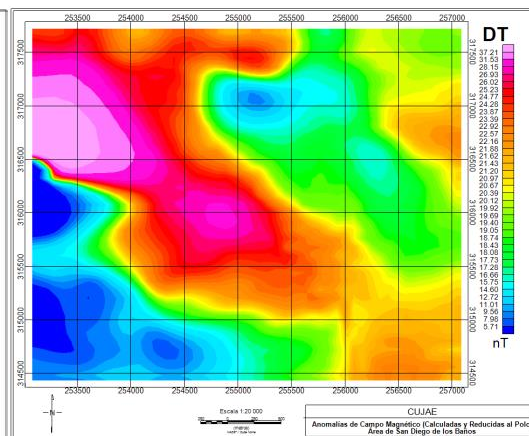


Figura 4. Anomalías calculadas de ΔT en el Sector San Diego de los Baños.

Los gráficos fueron digitalizados y se modelaron de manera inversa en el programa informático IPI2WIN (Moscow State University 2000). Al tener el comportamiento de la resistividad se modeló, contando con un AB máximo de 1000 m, para alcanzar una profundidad de 250 m y se obtuvo una pseudosección para cada SEV (7 SEV para el perfil, con una separación de 150 m), permitiendo caracterizar el comportamiento de la resistividad y apreciar los tipos de curvas que pudieran presentar los SEV en el área, con vistas a la realización de un nuevo levantamiento, se estimó cuáles serían los tipos de curvas esperadas como respuesta (figura 5).

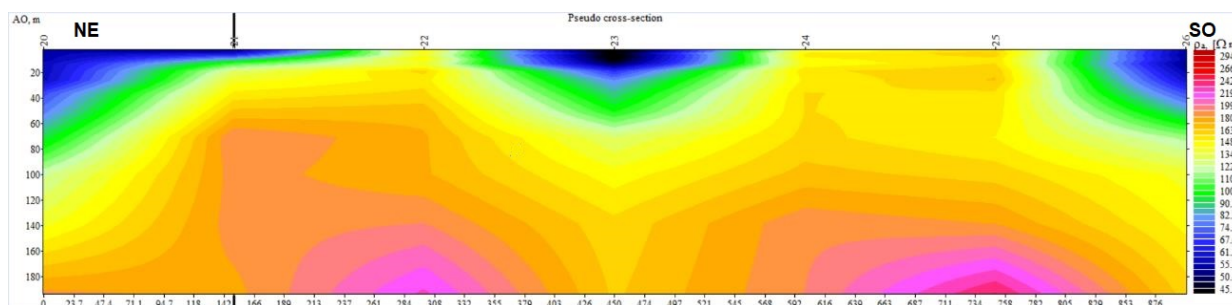


Figura 5 Seudosección de resistividad eléctrica obtenida para el perfil de San Diego de los Baños.

Confección de los mapas de parámetros físicos

Para la confección del mapa de parámetros físicos de la región San Diego de los Baños se realizó un corte horizontal a los voxels de densidad y susceptibilidad magnética (figuras 6 y 7) y vertical para la resistividad (figura 8) (modelos de parámetros físicos 3D) que cubren toda el área. Se utilizó un tamaño de celda de 25 metros cúbicos y el método de interpolación Kriging. El corte se realizó lo más cercano a la máxima profundidad, para reflejar así el comportamiento de las propiedades, lo más profundo posible, de cómo sería el comportamiento de las propiedades físicas modeladas. Con la vista en planta del voxel se pueden apreciar los valores superficiales de los parámetros físicos.

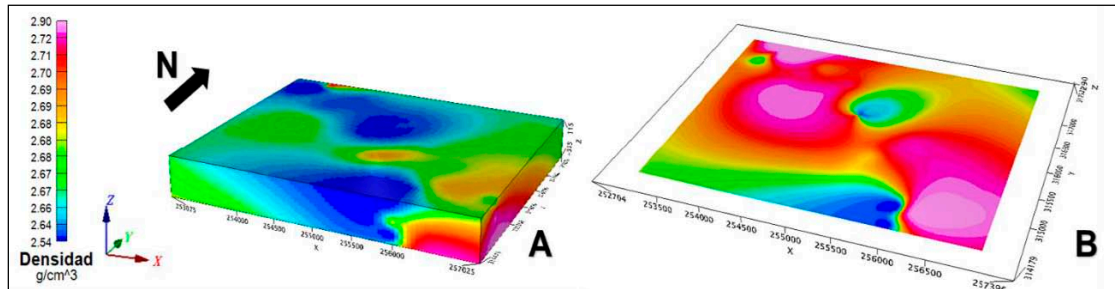


Figura 6. Voxel de densidad de San Diego de los Baños: A) valores en superficie; B) valores a la profundidad de 390 metros

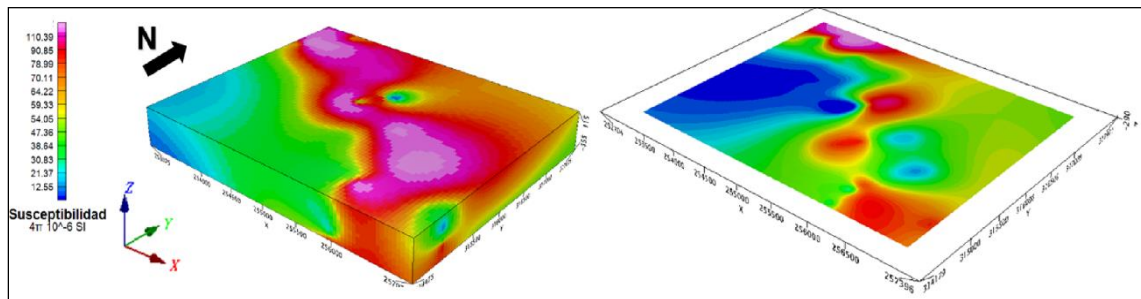


Figura 7. Voxel de susceptibilidad magnética de San Diego de los Baños: A) valores en superficie; B) valores a la profundidad de 390 metros.

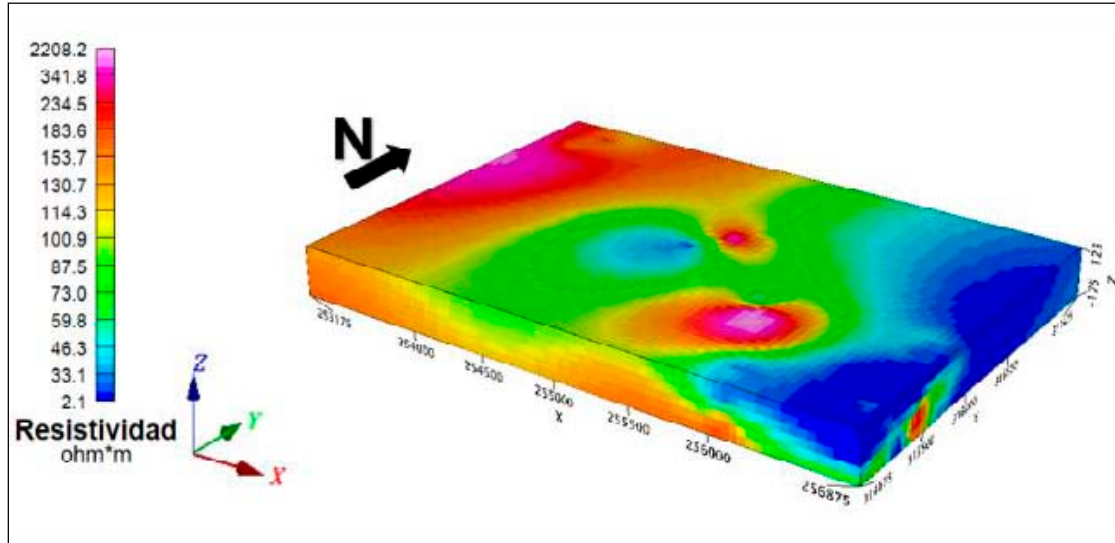


Figura 8. Voxel de resistividad eléctrica del Sector San Diego de los Baños

MODELO FÍSICO GEOLÓGICO DEL ACUÍFERO SAN DIEGO DE LOS BAÑOS

Descripción y caracterización del modelo geológico e hidrogeológico del sector de San Diego de los Baños

El modelo geológico del área de estudio se confeccionó a partir del modelo geológico ya existente, desarrollado por Peláez et al. (1990), al cual se le agregó la profundidad del nivel freático obtenida de la información de los pozos realizados en el propio levantamiento.

Las aguas mineromedicinales de este acuífero son producto de la infiltración, regidas por el siguiente mecanismo: las aguas meteóricas caen en la zona de alimentación, ubicada en la Sierra de la Güira, se infiltran a través de grietas verticales profundas y algunos fenómenos cársticos verticales hasta profundidades de 1,5 y 2,0 km, se calientan a partir del gradiente geotérmico, aprovechan después los planos de fallas jóvenes que abundan en el área, ascendiendo por estos, como existe mucho material carbonoso y sulfuros diseminados en el corte se cargan de sulfatos, que posteriormente son reducidos por bacterias hasta sulfhídrico. (Fagundo 2005)

El complejo acuífero de San Diego de los Baños (figura 9) está relacionado con calizas agrietadas y carstificadas (predominando las primeras), con sulfuros y materia carbonosa diseminada de la Fm. Artemisa que afloran en el área del yacimiento y por parte están cubiertas por sedimentos caóticos de la Fm. Manacas y al suroeste con un espesor aproximado de 20 m, y en forma de cuña, se encuentran sedimentos caóticos de la Fm. Cacarajicara.

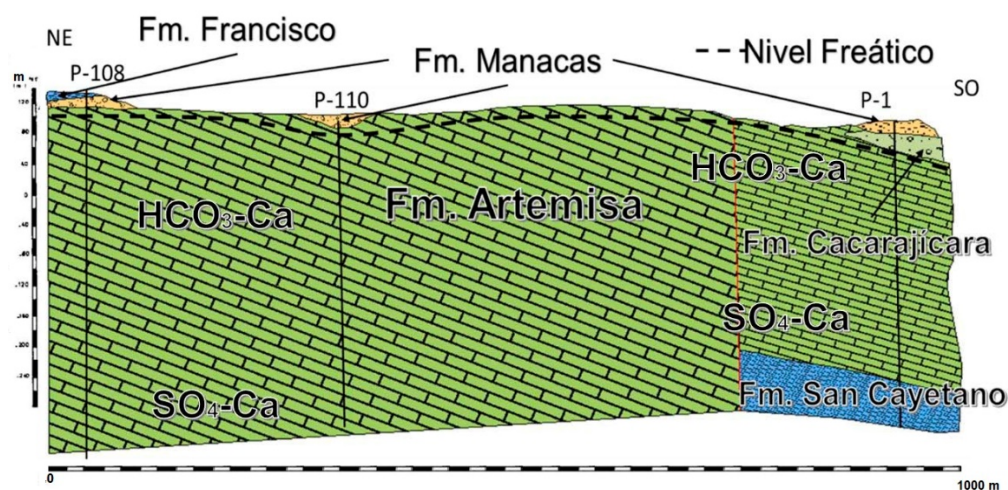


Figura 9. Modelo geológico-hidrogeológico del sector San Diego de los Baños (Modificado de Peláez et al. 1990).

Las fallas presentes en este sector en su mayoría son verticales y desplazan a los planos de sobrecorrimiento. El espesor del horizonte complejo del acuífero es de aproximadamente 350 m, donde se distinguen cuatro zonas acuíferas (0-60 m, 60-120 m, 120-200 m, 200-280 m) y una quinta capa (280-320 m), las cuatro primeras asociadas a las calizas de la Fm. Artemisa y la quinta asociada a los depósitos de la Fm. San Cayetano que actúa como capa impermeable. Las aguas del primer horizonte son del tipo carbonatadas cálcicas con una temperatura de 30°C, mientras que para el resto de las capas las aguas comienzan a cambiar sus propiedades a sulfatadas cálcicas con una temperatura inicial de 31°C y con el aumento de la profundidad llega hasta los 46°C.

Descripción del modelo petrofísico

Para la confección del modelo petrofísico se modelaron pozos de propiedades físicas al carecer de la información directa de las propiedades físicas de las rocas presentes en el sector. La modelación fue realizada bajo el principio de analogía, utilizando información petrofísica del levantamiento CAME II Pinar del Río (Martínez et al., 1988).

El voxel de densidad con blanqueado de 16 celdas de tamaño 25m^3 (figura 6), se puede considerar como el modelo de densidad 3D de la región San Diego de los Baños. El cual caracteriza las rocas, diferenciando notablemente las rocas de baja densidad que pertenecen a las formaciones terrígenas (Fm. San Cayetano y Manacas) y las densidades mayores a las formaciones carbonatadas (Fm. Artemisa y Cacarájicara). Los valores máximos de esta propiedad alcanzan $2,90\text{ g/cm}^3$ y los mínimos $2,54\text{ g/cm}^3$; los valores máximos se reflejan a mayor profundidad debido a la presión de confinamiento de los estratos, en tanto los mínimos corresponden a las zonas de la superficie, debido al intemperismo de las rocas y también porque las formaciones terrígenas se encuentran en su mayoría aflorando.

El voxel de susceptibilidad magnética con blanqueado de 16 celdas de tamaño 25m^3 (figura 7), se puede considerar como el modelo de susceptibilidad magnética 3D de la región de San Diego de los Baños. Los valores de susceptibilidad tienden a disminuir con la profundidad desde la superficie hasta la base del modelo. Los mínimos que se localizan aflorando al sur pertenecen a las rocas de la Fm. Artemisa, la cual está aflorando en este sector. Los valores máximos que se localizan en profundidad, asociados a las zonas donde está presente la Fm. Artemisa, se deben a la presencia de pirita y serpentinita en las grietas de esta capa.

El voxel de resistividad eléctrica con blanqueado de 20 celdas de tamaño de 5 metros (figura 8) se puede considerar como el modelo de resistividad eléctrica al cual responden las rocas del sector de San Diego de los Baños hasta una profundidad máxima de 200 m. Los valores más altos de resistividades están asociados a las calizas de la Fm. Artemisa y los menores están asociados a las rocas terrígenas de las formaciones Manacas y Cacarájicara.

Características del modelo de los campos físicos

Los campos físicos constituyen la respuesta de la aplicación de la tarea directa a la conjunción del modelo geológico-hidrogeológico con el modelo petrofísico, mostrando las anomalías calculadas para las propiedades físicas en la sección geológica dada. El comportamiento de la curva calculada de anomalías de Bouguer (figura 10) es cuasi horizontal debido a que la distribución de las densidades en este corte es poco variable (del orden de las decimas de g/cm^3). Los valores de ΔG oscilan entre 39,2 y 40,5 mGal, los que responden correctamente a la distribución de las densidades, que varían de 2,62 a $2,72\text{ g/cm}^3$.

El comportamiento que evidencia la curva del campo magnético (figura 11) es ascendente en dirección NE-SO del perfil, a pesar de la poca variación (entre 10 y 20 nT). Los valores mínimos de la curva están respondiendo al contraste entre las rocas de muy baja susceptibilidad magnética ($16\text{ a }21 \cdot 4\pi \cdot 10^{-6}\text{SI}$) localizadas en profundidad al NE del perfil, con rocas más superficiales de mayor susceptibilidad magnética ($40\text{ a }101 \cdot 4\pi \cdot 10^{-6}\text{SI}$), y al SO el contraste es casi nulo (rocas de susceptibilidad magnética de $50\text{ a }101 \cdot 4\pi \cdot 10^{-6}\text{SI}$), mostrando un comportamiento cuasi horizontal en la curva de anomalías magnéticas.

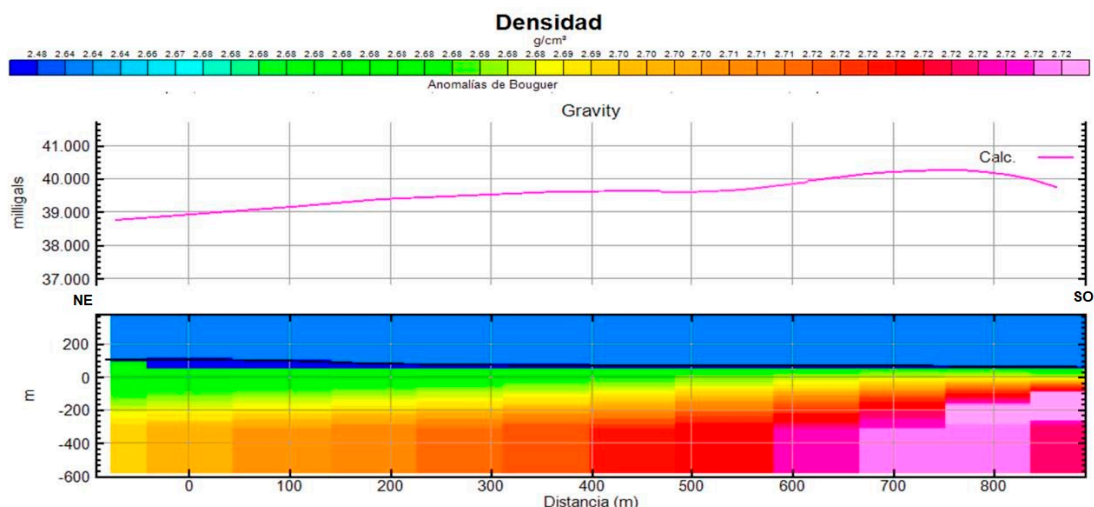


Figura 10. Curva de anomalías calculadas de ΔG (Anomalías de Bouguer).

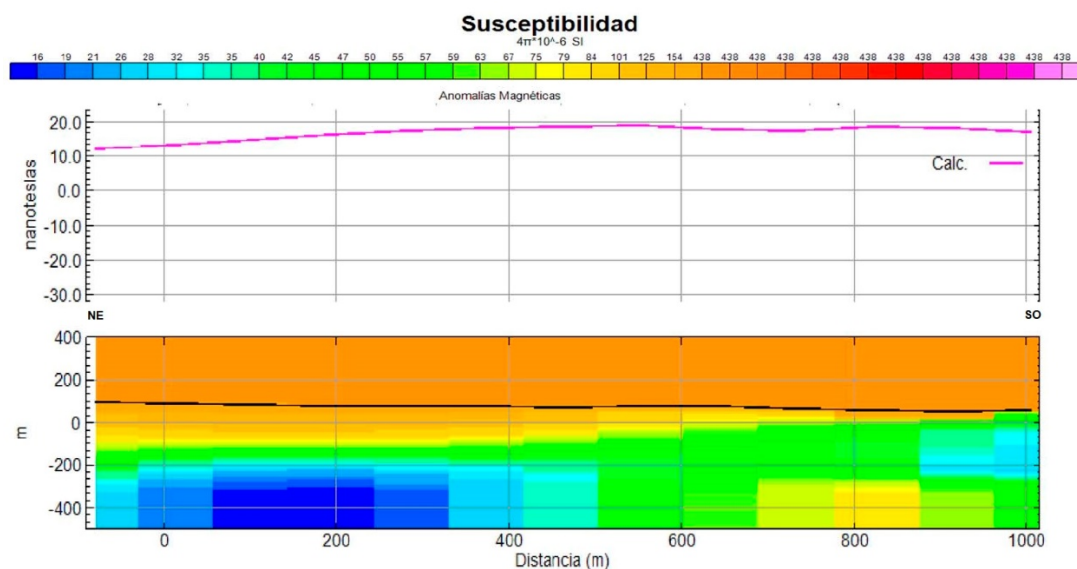


Figura 11. Curva de anomalías calculadas de ΔT (Anomalías del Campo Magnético) del Sector San Diego de los Baños.

El corte geoelectrónico que caracteriza a San Diego de los Baños (figura 12) responde a los primeros 200 m de profundidad correlacionándose con el modelo geológico propuesto para el sector San Diego de los Baños, caracterizado en su mayoría por las rocas carbonatadas de la Fm. Artemisa (valores de 280 Ωm), marcando los mínimos de resistividad en las rocas terrígenas que afloran de la Fm. Manacas (valores de alrededor de 50 Ωm).

No se dispuso de datos de resistividad eléctrica para poder caracterizar el horizonte terrígeno de la Fm. San Cayetano, debido a que los SEV realizados en esta zona por Peláez et al. (1990) tenían un AB máximo de 1000 m, con un dispositivo Schlumberger, permitiendo solo llegar a los 250 m de profundidad aproximadamente.

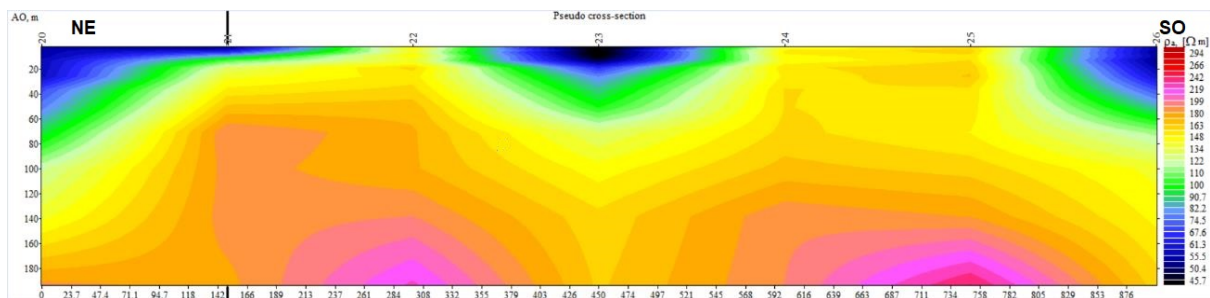


Figura 12. Corte geoelectrico perteneciente al Sector San Diego de los Baños con dirección NE-SO.

Modelo físico geológico 2D del acuífero San Diego de los Baños

El perfil D con dirección NE-SO correspondiente al sector San Diego de los Baños, se define como el modelo 2D que caracteriza a estos sectores en general. En el perfil D se localizan tres pozos, de los cuales se conoce su columna litológica y además como resultado del levantamiento de Peláez et al. (1990) se contaba con la caracterización geológica del área, la cual fue asumida como modelo geológico para este MFG. Con esta información y la del levantamiento CAME II Pinar, utilizando el principio de analogía, se modeló un conjunto de 110 pozos en total para toda el área, otorgándole valores de propiedades físicas por intervalos a lo largo de cada pozo, (ejemplo: donde el pozo creado cortara rocas de la Fm. San Cayetano se asignaban valores de propiedades físicas obtenidas en pozos de levantamiento CAME II Pinar donde cortaran la Fm. San Cayetano). El resultado de la integración de modelos planteados anteriormente constituye el MFG 2D del acuífero San Diego de los Baños (figura 13).

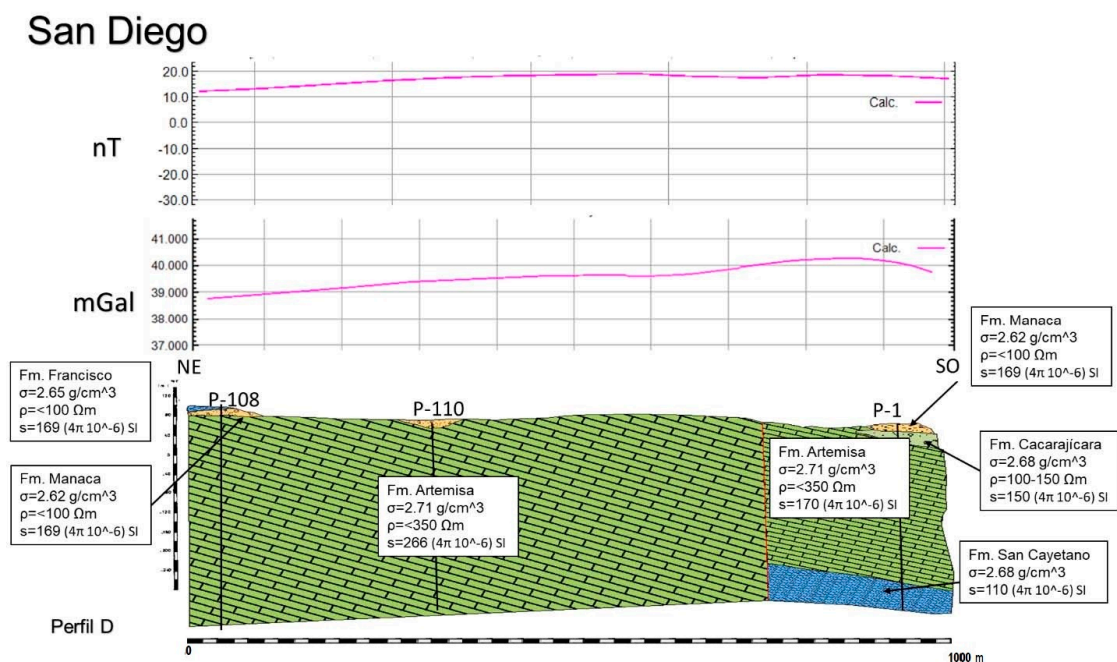


Figura 13. Modelo físico geológico del acuífero San Diego de los Baños.

Este modelo muestra la influencia que tienen los valores de las propiedades físicas de las rocas (densidad, susceptibilidad magnética y resistividad eléctrica) sobre los campos físicos

calculados. Como la variación de las propiedades de susceptibilidad magnética y de densidad en este sector es muy pequeña la respuesta de los campos potenciales también presenta poca variación. Sin embargo, los valores de resistividad eléctrica si presentan un adecuado contraste permitiendo caracterizar los cortes geoelectricos y correlacionarlos con los cortes geológicos, pero presentan una limitante, la profundidad, debido a que los datos de partida eran de SEV y llegaban a una profundidad de 250 m.

La integración de toda la información de los modelos para San Diego de los Baños distingue:

Zona noreste: el campo gravimétrico responde con mínimos (38,8 mGal) asociados al poco contraste de densidades de las rocas superficiales de los sedimentos terrígenos de la Fm. Manacas y Francisco ($2,62 \text{ g/cm}^3$ - $2,65 \text{ g/cm}^3$) con los sedimentos carbonatados de la Fm. Artemisa ($2,71 \text{ g/cm}^3$) que se extienden en profundidad. El campo magnético se comporta casi constante con valores de alrededor de los 15 nT, producto del poco contraste de las rocas de la Fm. Manacas y Francisco que presentan una susceptibilidad magnética promedio similar a las rocas de la Fm. Artemisa. El comportamiento de la resistividad en esta zona se caracteriza por mínimos de resistividad eléctrica ($50 \Omega\text{m}$) para las rocas terrígenas y caóticas de Manacas y Francisco y máximos ($300 \Omega\text{m}$) para las rocas carbonatadas en profundidad de Artemisa.

Zona central: El campo gravimétrico responde con valores medios (39,5 mGal) comenzando a reflejarse una tendencia ascendente en la curva producto a que aumenta el contraste entre las rocas de mayor densidad (calizas de Fm. Artemisa) con una pequeña capa de la Fm. Manacas que se encuentra aflorando, predominado más las rocas de la Fm. Artemisa y así influenciando más en la respuesta del campo gravimétrico. El comportamiento del campo magnético en esta zona es relativamente constante, alcanzando los valores máximos del área (20 nT) influenciado por el poco contraste de susceptibilidad magnética, ya que en esta área la Fm. Artemisa está distribuida casi en la totalidad, solo contrastando con una pequeña capa de la Fm. Manacas con menor valor de susceptibilidad que Artemisa. La resistividad eléctrica se comporta de manera similar que en la zona noreste, mostrando una pequeña capa de mínimos asociada a las rocas de la Fm. Manacas, y una capa de máximos extendida en profundidad que responde a las rocas de la Fm. Artemisa.

Zona suroeste: El campo gravimétrico en esta zona se comporta con valores máximos (40,3 mGal) respondiendo al pequeño contraste entre las rocas de la Fm. Artemisa con $2,71 \text{ g/cm}^3$ y las rocas de las Fm. Manacas y Cacarajícara las cuales presentan una densidad promedio de $2,68 \text{ g/cm}^3$, este valor se considera máximo, aunque la variación de esta curva es del orden de las decimas de miligales, que es una característica que distingue a los campos potenciales para toda el área de estudio, debido a la poca variabilidad de la densidad de estas rocas. El campo magnético se comporta similar al de la zona central influenciado también por el poco contraste de las rocas de Manacas y Cacarajícara con las rocas de Artemisa. La resistividad eléctrica se comporta en la zona central con una capa de mínimos de resistividad asociada a las rocas de la Fm. Manacas y Cacarajícara y una capa de máximos extendida en profundidad que responde a las rocas de la Fm. Artemisa. Los datos de SEV modelados fueron con un AB máximo de 1000 m, por lo que no se logra caracterizar la capa perteneciente a las areniscas de San Cayetano, constituyendo una limitación de este modelo.

Complejo racional de métodos geofísicos para el estudio de acuíferos cársticos profundos del tipo San Diego de los Baños.

Para establecer el complejo racional de métodos geofísicos (tabla 1) se tuvo en cuenta el MFG obtenido para el acuífero San Diego de los Baños, basándose en el comportamiento de la geología, las propiedades petrofísicas y los campos físicos en el acuífero; además de la extensión

del territorio y una amplia investigación bibliográfica acerca de la aplicación de los métodos geofísicos en la caracterización de acuíferos cársticos profundos

Del análisis detallado del MFG se pueden apreciar las posibles respuestas que darían los campos potenciales en esta área. Al no existir mucha variación con respecto a las propiedades de densidad y susceptibilidad magnética el comportamiento de las curvas que se calculan es el más aceptado, puesto que estos métodos responden al contraste de propiedades, aun así, se deben realizar levantamientos gravimétricos y magnéticos con un mayor grado de detalle dada la limitada extensión del sector de estudio (aproximadamente 10 km²), pues solo existe información de levantamientos a escala 1:50 000 que no son útiles para corroborar la información obtenida. El comportamiento de la resistividad eléctrica fue estudiado solo hasta los 250 m de profundidad apoyando significativamente la determinación de los contactos entre las rocas de las diferentes formaciones detectadas en el área, pero no resuelve en su totalidad la caracterización del acuífero, es por ello que se recomienda desarrollar una campaña de SEV que logre alcanzar los 400 m de profundidad. Se considera incluir el método de Polarización Inducida (PI) de forma experimental, debido a que existe información geológica de la presencia de mineralización diseminada de pirita, como posible causa del origen de las aguas sulfatadas, y aprovechando la campaña de SEV con el mismo equipamiento en el dominio del tiempo, calcular los valores de cargabilidad, con valores esperados de alrededor de los 45 ms.

Tabla 1. Complejo racional de métodos geofísicos para el estudio de acuíferos cársticos profundos del tipo San Diego de los Baños.

Orden de aplicación	Método geofísico	Escala	Red	Descripción
1°	Gravimétrico	1:1 000	100X10	Un perfil longitudinal NE-SO de 5 km. 4 perfiles transversales SSO-NNE de 1 km.
2°	Magnético			
3°	Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)	1:2 000	200X20	50 perfiles SSO-NNE de 1 km separados cada 200 m, con un paso de medición de 20 m. Configuración Schlumberger con AB=800 m. Al menos un SEV paramétrico en el área.
4°	Polarización Inducida (SEV-PI)			Dominio del tiempo. Los mismos perfiles y configuración que para el SEV. Se realiza simultáneamente empleando el mismo dispositivo.

CONCLUSIONES

El modelo físico geológico 2D del acuífero San Diego de los Baños está integrado por el modelo geológico e hidrogeológico elaborado a partir de Peláez et al. (1990), por el modelo petrofísico construido a partir de la modelación e interpretación de las propiedades físicas por formación disponibles (densidad, susceptibilidad magnética y resistividad eléctrica), aplicando el principio de analogía, y por el modelo de los campos físicos calculados sobre la sección geológica considerando los valores de las propiedades físicas de cada litología.

A partir del modelo físico geológico construido, se aprecia que no existe mucha variación de los valores de densidad y susceptibilidad magnética, lo que se refleja en el comportamiento de las curvas de los campos ΔG y ΔT calculados. El rango de variación de la densidad es 2,62-2,72 g/cm³ y el de susceptibilidad magnética $2,01 \cdot 10^{-4}$ – $3,58 \cdot 10^{-4}$ SI.

Los valores de la resistividad eléctrica, calculados para el modelo físico geológico del acuífero San Diego de los Baños, distinguen el comportamiento de las diferentes formaciones geológicas presentes en el área de estudio. Los mínimos de resistividad (50 Ω m) se asocian a las rocas de las Formaciones Manacas, Francisco y Cacarájicara, en tanto los máximos extendidos en profundidad (300 Ω m) responden a las rocas carbonatadas de la Fm. Artemisa. No fue posible

caracterizar a las areniscas de la Fm. San Cayetano por encontrarse a una profundidad que excede el alcance del dispositivo de electrodos empleado, lo cual deberá tenerse en cuenta para futuros trabajos.

El complejo de métodos geofísicos para el estudio de acuíferos cársticos profundos está integrado por los métodos potenciales, gravimetría y magnetometría, con una escala detallada, seguido por el método del sondeo eléctrico vertical con una red densa que caracterice las diferentes litologías presentes en el área. El método de polarización inducida puede incluirse en forma experimental y complementaria siempre que existan evidencias de pirita secundaria en el área, lo cual atestigua la presencia de aguas mineromedicinales asociadas a zonas de fallas.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Instituto de Geología y Paleontología, a la Oficina Nacional de Recursos Minerales y al Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana por el soporte brindado para la realización de la investigación científica realizada. También deja constancia de su gratitud al Departamento de Geología de la Universidad de Pinar del Río, por la coordinación del proyecto nacional que ampara al presente trabajo.

REFERENCIAS

- Fagundo J., Pérez Franco D., García J. y Morell I. (eds).** (1996). "Contribuciones a la Hidrogeología y Medio Ambiente en Cuba". Publicacions de la Universitat Jaume I. Castelló de la Plana, España. 388 pp. ISBN 84-8021-104-0.
- Fagundo, J., González, P., Carillo-Rivera, J., Antigüedad, I., Peláez, R., Suárez, M., Melián, C., Hernández, R. y Cáceres, D.** Caracterización hidrogeoquímica del sistema de flujo local-regional de la Sierra del Rosario (Cuba) 2005.
- García J.** (2018). "Modelos de resistividad eléctrica en formaciones geológicas de la cuenca Los Palacios, Cuba occidental". Tesis de Doctorado. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Pinar del Río, Cuba.
- GEOSOFT** (2008). "Oasis montaj 7.0. Manual release". Toronto, Canada. 107 pp.
- Lima B.** (2009). "Comportamiento Hidrológico de la Cuenca San Diego-Bermejales". Trabajo de Diploma. Departamento de Geología, Facultad de Geología y Mecánica, Universidad de Pinar del Río. Cuba
- Martínez D., Fernández R., Reinoso R., Chang J. C., Fernández O., Valido A., Peláez R., Núñez R., Hernández J., Rodríguez P., Shalva S., Vázquez M., Yunttsky V., Precado S., Touchenko V., Shirueg V. y Cofiño C.** (1988). Informe sobre los resultados del levantamiento geológico y búsqueda a escala 1:50 000 en la parte central de la provincia de Pinar del Río. Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba. La Habana.
- Mondelo F. y Sánchez R.** (2011). "Mapas geofísicos regionales de gravimetría, magnetometría, intensidad y espectrometría gamma de la República de Cuba, 1: 2 000 000 hasta 1: 50 000". Repositorio del Instituto de Geología y Paleontología. La Habana, Cuba.
- Moscow State University** (2000). "IPI2Win User Manual". Moscow, Russian Federation. 33 pp.
- Peláez R., Olivares M., Núñez R. y Valdivia M.** (1990). "Informe para la búsqueda detallada y exploración orientativa de las aguas minero-medicinales San Diego – Bermejales". Fondo Geológico, Ministerio de la Industria Básica, 179 p.
- Peña B.** (2000). "Caracterización de Sistemas Hidrominerales en el Distrito Físico Geográfico Pinar del Río". Tesis de Maestría. Facultad de Geografía, Universidad de La Habana. Cuba
- Rodríguez R.** (1998). "Características de las aguas minerales y medicinales de Cuba". Acta Geológica Hispánica, España. Vol. 33, pp. 373-393. ISSN: 0567-7505.

USGS (2005). “Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)”. United States Geological Survey.
Disponible en: <http://srtm.usgs.gov>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Antonio J. Santibañez Rodríguez <https://orcid.org/0000-0002-6556-3985>

Realizó la adquisición, procesamiento e interpretación de los datos. Redactó el informe final. Colaboró en el diseño de la investigación.

Lisbeth Núñez Haugh <https://orcid.org/0000-0002-0927-9963>

Participó en la interpretación de los datos y colaboró en la elaboración del diseño de la investigación.

José A. Díaz Duque <https://orcid.org/0000-0003-0032-4681>

Desarrolló la idea del proyecto y ejecutó el diseño de la investigación. Brindó las bases para el marco teórico de la investigación, en especial respecto a los modelos físico-geológicos. Participó en el análisis de los resultados. Revisó y ajustó la redacción del informe final.