

Determinación de la geometría del Acuífero de Morrosquillo y geología detallada del Acuífero de Tolviejo, Sucre

Determination of Morrosquillo aquifer geometry and detailed geology of the Tolviejo Aquifer, Sucre

Jaime Mauricio Bacca¹, Orlando Hernández P¹ & Luís Eduardo Vasquez²

¹Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, jmbaccar@unal.edu.co, ohernandezp@unal.edu.co, Ciudad Universitaria, Edificio Manuel Ancizar, of. 335, Telephone: 571 3165000 ext 16568, Fax +571 3165390.

²Tecnología, Equipos y Procesos, TEP Ltda, geophysics@tepltda.com, Carrera 64 #. 24 – 47 In / Ap. 626, Bogotá. D. C. Telephone: +571 2215050.

Bacca, Jaime Mauricio; Hernández, Orlando & Vasquez, Luis Eduardo (2010): Determinación de la geometría del Acuífero de Morrosquillo y geología detallada del Acuífero de Tolviejo, Sucre. [*Determination of the Morrosquillo aquifer geometry and detailed geology of the Tolviejo Aquifer, Sucre*]. GEOLOGÍA COLOMBIANA, Vol. 35, pp 87-101. Bogotá, Colombia.

Artículo de Investigación Científica Manuscrito recibido: 7 de julio 2010; aceptado: 4 de diciembre de 2010.

RESUMEN

Los acuíferos de Tolviejo y Morrosquillo están localizados en el noroccidente de Colombia, en el área costera del Departamento de Sucre. El modelamiento geológico de estos acuíferos ha sido basado en cartografía geológica detallada, estudios de resistividad eléctrica e interpretación de líneas sísmicas y datos de perforación compilados de estudios exploratorios de hidrocarburos. La cartografía geológica de la Formación de Tolviejo fue actualizada a partir de la interpretación de fotografías aéreas y revisión en campo, incluyendo la medición de datos de susceptibilidad magnética y espectrografía de rayos gamma. La geometría y extensión del Acuífero de Morrosquillo fue modelada a partir de la interpretación de 28 sondeos eléctricos verticales y el análisis de la secuencia más superficial de la secuencia estratigráfica y estructuras interpretadas a partir de líneas sísmicas. Como resultado, se han elaborado una serie de mapas de resistividad a varias profundidades incluyendo el tope y base del Acuífero de Morrosquillo y la profundidad de la interfase de la intrusión de agua salina para proveer información básica a las autoridades locales que administran los recursos de agua subterránea de la región.

Palabras clave: Tolviejo, Morrosquillo, acuíferos, modelamiento geofísico

ABSTRACT

The Tolviejo and Morrosquillo aquifers are located in northwestern Colombia, in the coastal area of the Sucre Department. A geologic and geophysical modeling of these aquifers was based on a detailed geologic mapping, an electrical resistivity survey, the reinterpretation of seismic lines and borehole data that were compiled from oil exploration surveys. The geologic map of the Tolviejo Aquifer was updated by a combined aerial photograph interpretation and field work that included the measurement of gamma - ray spectrometry and magnetic susceptibility of the exposed rock formations. The geometry and areal extent of the Morrosquillo Aquifer was obtained by the interpretation of 28 vertical electrical soundings together with the analysis of the upper seismic stratigraphic sequence and structural features of reinterpreted seismic lines. As a result, a series of thematic maps were produced including electrical resistivity maps at various depths, depth estimation to the top and to the base and thickness of the Morrosquillo Aquifer as well as the spatial relationship between the fresh drinking water and the salt water intrusion. These products help to understand and manage the groundwater resources for local authorities.

Keywords: Tolviejo, Morrosquillo, aquifers, geophysical modeling

Introducción

Los objetivos de la investigación en este artículo consistieron en determinar la geometría del Acuífero de Morrosquillo, evaluando los resultados de líneas sísmicas regionales, pozos de exploración petrolera y resultados de perforaciones que CARSUCRE tiene disponible de la zona, la interpretación de 28 sondeos eléctricos verticales, con apertura de electrodos de corriente (AB/2) máximos de 300 m, repartidos en 5 líneas transversales al rumbo, cada una conformada por 6 sondeos eléctricos verticales (SEV) y actualizar la geología detallada del Acuífero de Tolviejo, utilizando fotografías aéreas y trabajo de campo.

El área geográfica del proyecto se ubica en la cuenca Sinú-San Jacinto, localizada en la cuenca marginal Colombo - Caribe al noroccidente del país (Fig. 1). Regionalmente, la cuenca está conformada por dos cinturones montañosos plegados adyacentes: el Cinturón de San Jacinto de edad Paleógeno hacia el norte y el Cinturón del Sinú de edad Neógeno al suroccidente del anterior, los cuales tienen un rumbo aproximado suroeste-noreste y se encuentran separados por el lineamiento del Sinú (Duque-Caro, 1984). Cada cinturón tiene su propia sucesión estratigráfica, así como su propia evolución tectónica. Los cinturones de San Jacinto y Sinú forman una cuña de sedimentos de aproximadamente 12 km de espesor, la cual fue acrecionada al borde occidental de Suramérica en el Cenozoico, debido a la interacción entre las placas Caribe, Nazca, Suramericana y Panamá (Pindell, 1998).

De acuerdo a sus características estructurales, los cinturones de Sinú y San Jacinto se subdividen en bloques tectónicos. Los bloques pertenecientes al Cinturón del Sinú son Turbaco y Cartagena, mientras que el Cinturón de San Jacinto se divide en los bloques Luruaco, el Carmen, Sincelejo y San Jerónimo (Reyes *et al.*, 2001).

El área de estudio está incluida dentro del bloque Sincelejo, en donde la Serranía de Coraza y los Montes de María forman parte de la Serranía San Jacinto que a su vez parece ser una extensión de la Serranía de San Jerónimo, uno de

los tres ramales en que se divide la Cordillera Occidental en el Nudo de Paramillo. El Acuífero de Tolviejo está demarcado dentro de la Serranía de Coraza, la cual se sitúa al norte del Departamento de Sucre, con alturas que oscilan entre 200 y 560 m (Fig. 2).

El Acuífero de Tolviejo presenta un relieve predominantemente escarpado de cuchillas angostas y alargadas limitadas por valles profundos en las que se origina una serie de nacimientos de agua que surten los acueductos de los municipios de la región. Los arroyos que nacen en la reserva y desembocan al mar o a las ciénagas aledañas que tienen una duración estacional limitada a las épocas de lluvias y, por lo tanto, al desaparecer sus caudales durante el verano, la oferta hídrica se limita a los denominados “ojos de agua”, depósitos que se forman en las colinas debido a que en los suelos de calizas, el agua lluvia y las corrientes disuelven el carbonato de calcio y se infiltran en el subsuelo constituyendo oquedades o cavernas que se llenan de agua.

Originalmente la cobertura vegetal de esta serranía consistía en bosques higrofiticos y subhigrofiticos desarrollados en gran parte sobre suelos constituidos por mantos de arena, arcillas y calizas de edad terciaria. Los niveles calcáreos conforman relieves fuertes en los cuales se pueden apreciar geformas asociadas a fenómenos kársticos, producto de la disolución de carbonatos. En la parte central de la serranía se aprecian relieves más suavizados relacionados con niveles alternantes de arcillolitas y areniscas. El Acuífero de Morrosquillo está constituido por una unidad geomorfológica plana, homogénea, ubicada desde su margen occidental con la costa con el Mar Caribe, en el Golfo de Morrosquillo y hasta los primeros niveles resistentes de las formaciones asociadas al Acuífero de Tolviejo en su sector oriental.

Estratigrafía

La descripción estratigráfica se basa en las unidades litoestratigráficas del Bloque Sincelejo, de acuerdo a la columna estratigráfica de Clavijo & Barrera (2001) y Universidad de Caldas (2009), en los cuales se encuentran incluidos los acuíferos de Morrosquillo y Tolviejo (Fig. 3).

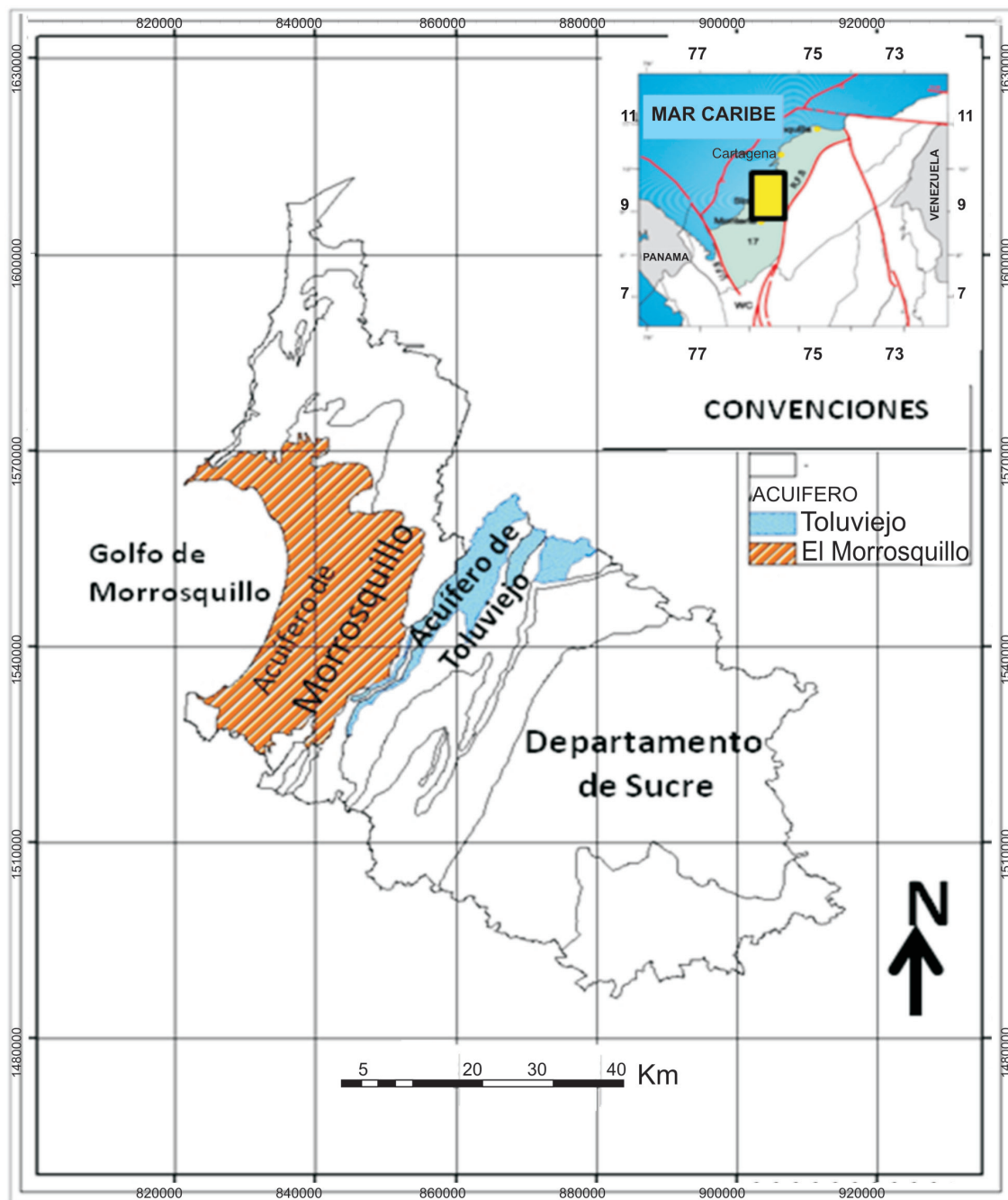


Figura 1. Localización de la Cuenca Sinú – San Jacinto en la región noroeste de Colombia, en la región costera del Mar Caribe, al oeste del Sistema de Fallas de Romeral (Barrero *et al.*, 2007).

Figure 1. Location of Sinú -San Jacinto Basin in the northwest region of Colombia, in the coastal zone of the Caribbean Sea, to the west of Romeral Fault System (Barrero *et al.*, 2007)

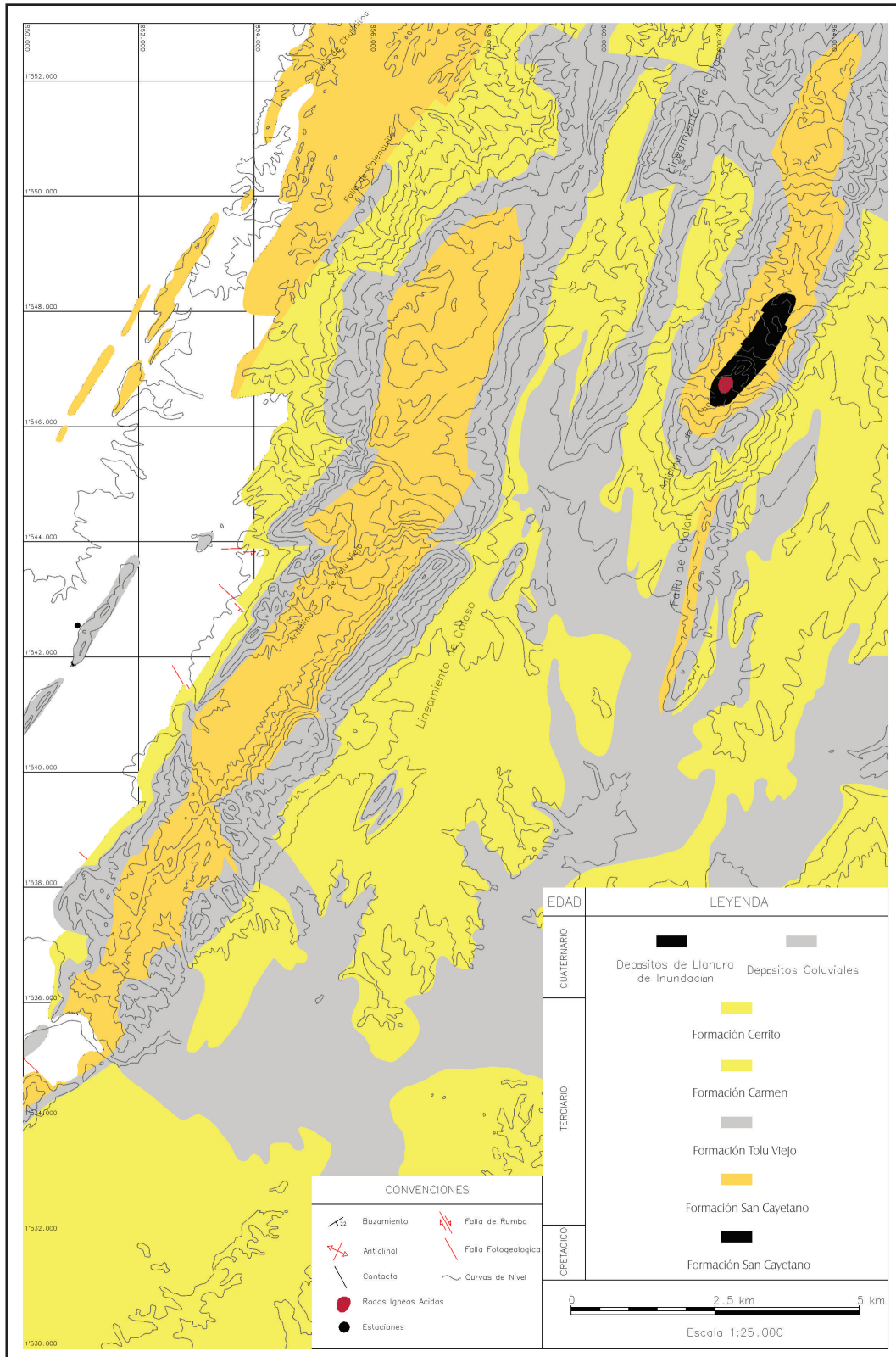


Figura 2. Mapa geológico del Acuífero de Tolu Viejo
Figure 2. Geologic map of the Tolu Viejo aquifer

Formación Cansona: esta unidad está constituida hacia la base por alternancia de limolitas silíceas y cherts en capas delgadas. Suprayaciendo se encuentran areniscas que van desde finas hasta conglomeráticas e inclusive llegando a conglomerados de guijos, con fragmentos volcánicos en un 90%. El tope de la formación se encuentra dominado por limolitas silíceas y calcáreas. Su exposición en forma aislada impide estimar el espesor de esta unidad, no obstante puede variar en promedio entre 200 y 250 m. La base no se encuentra bien establecida, aunque autores como Dueñas & Duque (1981) y Duque - Caro (1980) mencionan que descansa discordantemente sobre las Peridotitas de Planeta Rica. Su contacto superior es una discontinuidad estratigráfica con las suprayacentes Formación San Cayetano y Formación Maco (discordancia angular). Con base en fauna de foraminíferos, se le asigna a la Formación Cansona una edad Santoniano - Maastrichtiano. Su ambiente de depositación se ha interpretado como batial profundo a pelágico (Clavijo & Barrera, 2001).

Formación San Cayetano: esta formación fue definida por Chenevert (1963) como una sucesión arenosa aflorante en los Montes de María y Serranía de San Jacinto. La formación está constituida hacia la base por litoarenitas finas a gruesas en capas medias, intercaladas con lodolitas grises fisiles; en la parte media presenta lodolitas café y micritas intercaladas con litoarenitas finas a gruesas y algunos cherts amarillos en capas medias. Hacia el tope de la unidad se encuentran cuarzoarenitas finas blancas en capas planas delgadas a medias. De acuerdo con Reyes *et al.* (2001), debido a los contactos fallados con las unidades suprayacentes no se ha podido establecer un espesor real de esta unidad. Por otro lado Guzmán *et al.* 1998 le da a la unidad un espesor promedio de 240 m. En Reyes & Zapata, (2001) el espesor de la Formación San Cayetano, calculado a partir de cortes geológicos, es de por lo menos 500 m.

Formación Toluvejo: Werenfels (1926) menciona por primera vez el nombre de "Toluvejo Limestone" o "Toluvejo Series". La formación consta de las siguientes facies:

○Calizas bioclásticas: capas muy gruesas de wackestones y packstones masivas, localmente arenosos, de color gris, con bioclastos de moluscos, equinodermos macroforaminíferos.

○Arenitas calcáreas: capas muy gruesas y masivas de arenitas líticas de color gris verdoso, con cemento calcáreo, localmente glauconíticas, abundantes bioclastos de moluscos, crustáceos, equinodermos, macroforaminíferos, pellets fecales y oncolitos; localmente bioturbadas y con laminación plano paralela, ondulada y flaser. Son comunes los niveles conglomeráticos y los restos carbonosos.

○Lodolitas calcáreas: lodolitas calcáreas masivas, con restos de moluscos, crustáceos, equinodermos, macroforaminíferos, pellets fecales, peces y oncolitos. Es común la presencia de láminas de materia orgánica e intervalos suavemente bioturbados.

○Lodolitas masivas – carbón: corresponde a arcillolitas y limolitas masivas de color negro, láminas de materia orgánica, yeso y moscovita, intercaladas con una capa de carbón.

En la parte más occidental del área, la unidad se encuentra en discordancia angular con la infrayacente Formación San Cayetano; en el Anticlinal de Chalán está en aparente paraconformidad sobre la Formación Maco. El contacto superior es también paraconforme con la suprayacente Formación Carmen. En las diferentes secciones levantadas la microfauna plantónica indica una edad del Eoceno medio para la Formación Toluvejo. De acuerdo a las asociaciones faciales encontradas, se aprecia que la Formación Toluvejo representa el depósito de calizas, lodolitas y arenitas en ambientes someros mixtos terrígenos y carbonatados con abundante registro fósil de zona litoral.

Formación Carmen: nombre utilizado por primera vez en informes internos de la *Texas Petroleum Company*, para designar el paquete de lodolitas, que afloran en el Carmen de Bolívar (Notestein *et al.*, 1944). Unidad típicamente arcillosa que ocupa las zonas topográficamente bajas del área de las dos planchas, que corresponden generalmente a estructuras sinclinales, como son los de Carbón y Palmito y flanco oriental del Anticlinal de Toluvejo.

La unidad consta de arcillolitas macizas, grises y gris amarillentas, con delgadas y muy espaciadas intercalaciones de limolitas y areniscas en capas muy delgadas. Su característica más notable es la presencia de una abundante fauna de foraminíferos planctónicos. Se encuentra en discontinuidad estratigráfica (paraconformidad) con la infrayacente Formación Toluvejo y en continuidad con la Formación Ciénaga

de Oro. Con la suprayacente Formación Cerrito la relación es de paraconformidad. En algunos sitios la suprayace discontinuamente la base de la Formación Sincelejo. La formación contiene zonificaciones clásicas de foraminíferos planctónicos del Oligoceno inferior – Mioceno inferior. Las características tanto litológicas como texturales de esta unidad sugieren una sedimentación en una cuenca interna restringida (Douglas & Heitman, 1989), relativamente anóxica, con aporte de sedimentos terrígenos limo, lodo y precipitación de carbonatos, lo cual indica un área bordeada por zonas de pendientes no muy desarrolladas con sedimentación continua e invasión ocasional de organismos perturbadores del substrato.

Formación Cerrito: la referencia original de este término fue dada por Werenfels (1926) al designar las rocas expuestas en el corregimiento de el Cerrito, al suroccidente de Sincelejo. La unidad consta de arenitas bioclásticas calcáreas y conglomerados hacia la base, que varían en la vertical a arenitas de grano fino, limolitas y arcillolitas gris verdosas interpuestas con concreciones de limolita calcárea. El máximo desarrollo de la unidad se presenta en el sur donde alcanza espesores cercanos a los 1000 m en cercanías a Planeta Rica (Duque – Caro, 1980). Su espesor varía entre 0 y 600 m. La Formación Cerrito suprayace en discontinuidad estratigráfica a la Formación Carmen y es cubierta por la Formación Sincelejo. La edad de la unidad se ha establecido con base en fauna de moluscos como Mioceno medio al Plioceno inferior. El ambiente de formación es marino de plataforma nerítica superior, con abundantes conchas transportadas y mezcladas por acción de las olas.

Formación Sincelejo: la referencia original del término Sincelejo aparece en Werenfels (1926), quien utiliza el nombre de “Sincelejo Sandstone” para describir la parte más superior de su sucesión estratigráfica. Corresponde a sedimentos pobremente consolidados que descansan discordantemente sobre la “Sabana Sandstone”. Su nombre deriva de la ciudad de Sincelejo. La unidad está conformada por las siguientes facies:

○Lodolitas masivas: se compone de capas muy gruesas de arcillolitas y limolitas masivas, poco consolidadas, localmente con laminación plano paralela y lenticular, de color gris verdoso a verde, con moteados rojizos y cafés. Presentan niveles con moscovita, ocasionales fragmentos carbonosos, restos de plantas y numerosas capas de calcretas masivas y laminadas.

○Arenitas masivas – laminadas: se intercalan capas muy gruesas, en muchos casos dispuestas en secuencias granodecrecientes de arenitas líticas, masivas, con niveles bioturbados y ocasionalmente – particularmente en facies finas - con laminación plano paralela, ondulada y festoneada. Estas arenitas se aprecian friables y poco consolidadas, de grano muy fino a medio y localmente conglomeráticas, de color gris amarillento a gris verdoso o incluso verde. Presentan buena selección, matriz arcillosa y alta porosidad, ocasionalmente muestran cemento calcáreo.

○Conglomerados masivos: ocasionalmente se encuentran niveles subordinados y en general en la base de secuencias grano-decrecientes que pasan a las litoarenitas antes descritas de conglomerados masivos, matriz-soportados y poco consolidados, generalmente tamaño guijo, de color gris verdoso a gris oscuro, con clastos subredondeados de limolitas y arenitas, rocas volcánicas y plutónicas, cuarzo lechoso y chert; presentan matriz arenosa, pobre selección y moderada a buena porosidad.

Su contacto inferior es discontinuo con la Formación Carmen. El contacto con la suprayacente Formación Betulia está dado por una paraconformidad dudosa. Su edad se ubica en el Plioceno – Pleistoceno, formada en un ambiente de río trezado (Reading, 1982). La presencia de espesores importantes de lodolitas (a espacios regulares de la unidad), macizas o con laminación débilmente desarrollada, con láminas de yeso y azufre diseminado, indican un ambiente cerrado de aguas tranquilas de poca profundidad similar al de ciénagas y pantanos.

Geología Estructural

La Cuenca Sinú – San Jacinto ha sido afectada por la interacción entre las placas Caribe, Nazca, Suramericana y Panamá, específicamente debido a la subducción de la Placa Caribe (corteza oceánica) debajo de la Placa Suramericana (corteza continental), desde el Cretácico Superior hasta el Holoceno (Duque–Caro, H. 1980), la cual ha formado una cuña de acreción en el margen noroccidental de Colombia. Esta interacción ha generado varios bloques tectónicos con una historia de sedimentación y deformación diferente, de la que se derivó, entre otros, la Serranía de San Jacinto o Cinturón Plegado de San Jacinto (Fig. 2).

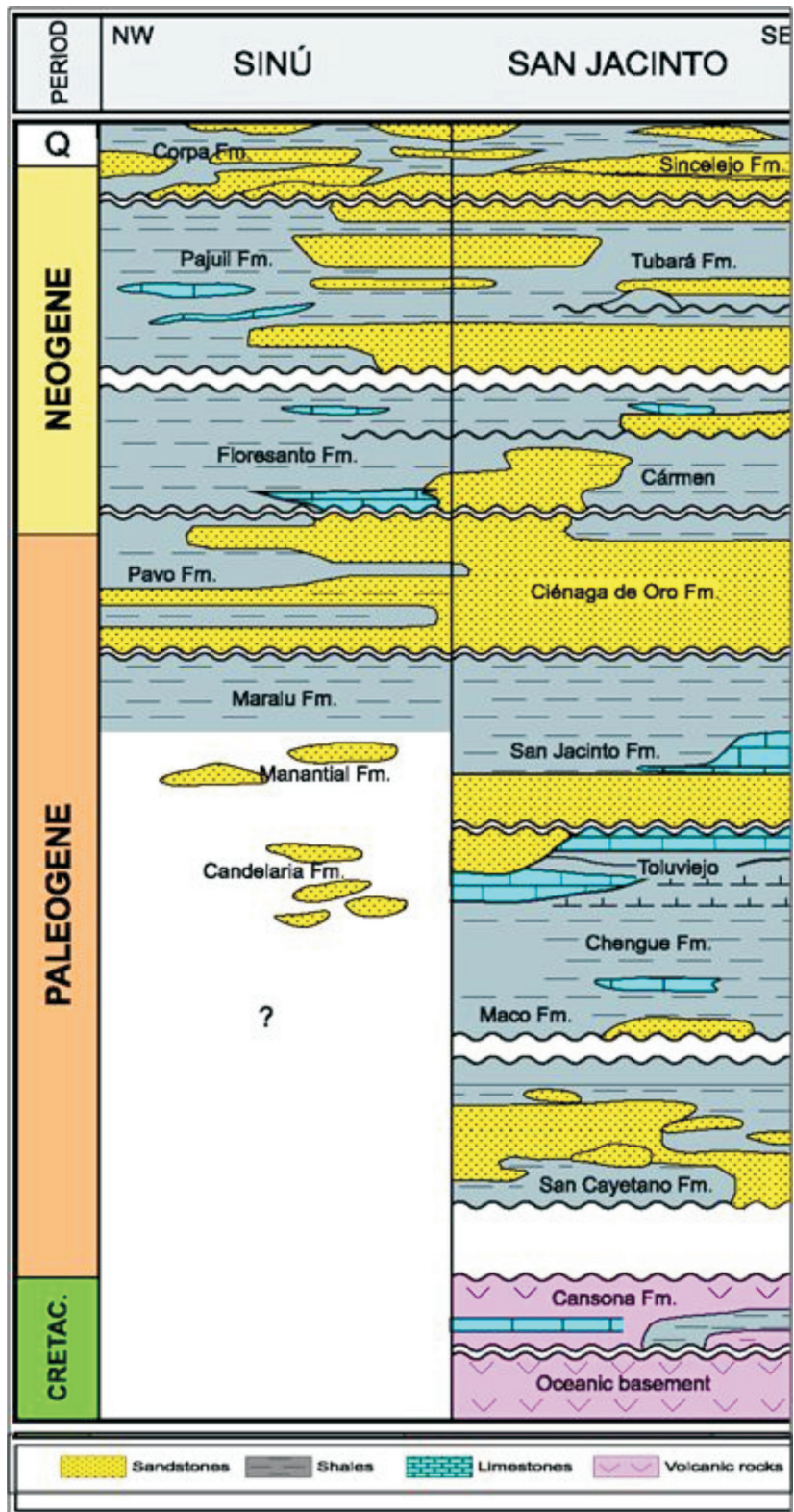


Figura 3. Columna Estratigráfica General de las cuencas de Sinú (NW) y San Jacinto (NE) modificada de Barrero *et al.* (2007).
Figure 3. General Stratigraphic Column Sinú (NW) and San Jacinto (NE) Basins modified from Barrero et al. (2007).

Sinclinal de Palmito: Es una de las estructuras de mayor longitud, aunque en la mayor parte de su extensión está cubierto por sedimentos recientes. Es un pliegue simétrico cuyo eje varía de dirección de N30°E en el sur a N45°E en el norte. Su núcleo está constituido por lodolitas de la Formación Carmen.

Anticlinal de Toluvejo: Es la estructura principal del Acuífero de Toluvejo, aunque su trazo es discontinuo. Tiene una longitud de 30 km, que continúa hacia el sur, en la Plancha 52. Es un pliegue asimétrico, invertido en el sur (al oriente de Palmito), fallado en el norte y fraccionado por fallas transversales. Varía en dirección de N30°E a N45°E. Su núcleo está constituido por areniscas, lodolitas y conglomerados de la Formación San Cayetano.

Falla de Palmito: Aflora al sureste del municipio del mismo nombre, afecta rocas de la Formación Toluvejo. Es de ángulo alto (60° – 70°E) y rumbo N30°E. Aunque no se observa planos de fricción, su relación con pliegues anticlinales invertidos parece indicar que se trata de una falla inversa, con buzamiento al SE.

Falla de Toluvejo: Recibe el nombre de esta población por la cual pasa su trazo. Se extiende desde Toluvejo hasta los límites con la Plancha 37. Es una falla de cabalgamiento de ángulo alto (60° – 80°) de rumbo N60° – 50°E y buzamiento al este. Coloca en contacto rocas de la Formación Toluvejo sobre las de la Formación San Cayetano.

Prospección Geoeléctrica e Interpretación de Líneas Sísmicas

La información geofísica utilizada en el modelamiento del subsuelo del Acuífero de Morrosquillo se obtuvo a partir de 28 Sondeos Eléctricos Verticales, SEV, proporcionados por CARSUCRE y 5 líneas sísmicas compiladas por la Universidad Nacional de Colombia.

Para llevar a cabo la medición de resistividades se empleó un arreglo colineal, el cual consiste en una configuración

de electrodos que permitió obtener variaciones de resistividad bajo cada punto de sondeo. Al efecto, se empleó una fuente externa para generar corriente I que se introdujo al subsuelo a través de 2 electrodos A y B; esta corriente creó un campo eléctrico, cuyas diferencias de potencial V se midieron entre los otros 2 electrodos M y N. La profundidad investigada está relacionada con la apertura de los electrodos de corriente. A mayor apertura ($AB/2$) mayor penetración en profundidad. Las lecturas de corriente y de potenciales permiten calcular, mediante la Ley de Ohm, la resistencia (R) de los materiales del subsuelo. Posteriormente, con la ayuda del coeficiente geométrico (K), que depende de las distancias del arreglo, se calcula el valor de la resistividad aparente (ρ_a) el cual se grafica en papel bilogarítmico contra los valores de distancia media de apertura de electrodos de corriente ($AB/2$), obteniéndose así las curvas de campo de los SEV (Keary & Brooks, 1992; Telford *et al.*, 1990; Lowrie, 2007).

Para la adquisición de datos de SEV se utilizó un equipo digital de resistividad eléctrica marca AZ. El arreglo de electrodos utilizado fue de tipo Schlumberger con abertura $AB/2$ de 250 m. El procesamiento de datos se llevó a cabo con la ayuda del programa IPIwin, el cual está basado en la metodología de “aproximaciones sucesivas”. Esta metodología permitió comparar curvas de campo con curvas teóricas generadas a partir de modelos hipotéticos, comparación que se realizó hasta cuando las curvas de campo y las sintéticas alcanzan un ajuste predeterminado de bajo error. Se obtuvieron 28 curvas de SEV, las cuales muestran básicamente la distribución de valores de resistividad bajo los puntos de medición, a partir de los cuales se puede correlacionar claramente con arcillas, arenas y gravas con agua dulce gradante a salobre y salada en profundidad.

El modelo geoeléctrico está representado por la variación del espesor del acuífero dentro del área medida, la delineación de la cuña de agua salada y la distribución de resistividades a 10, 25, 50, 75, 100 y 125 m de profundidad (Figs. 4(a) - 4(f)), respectivamente.

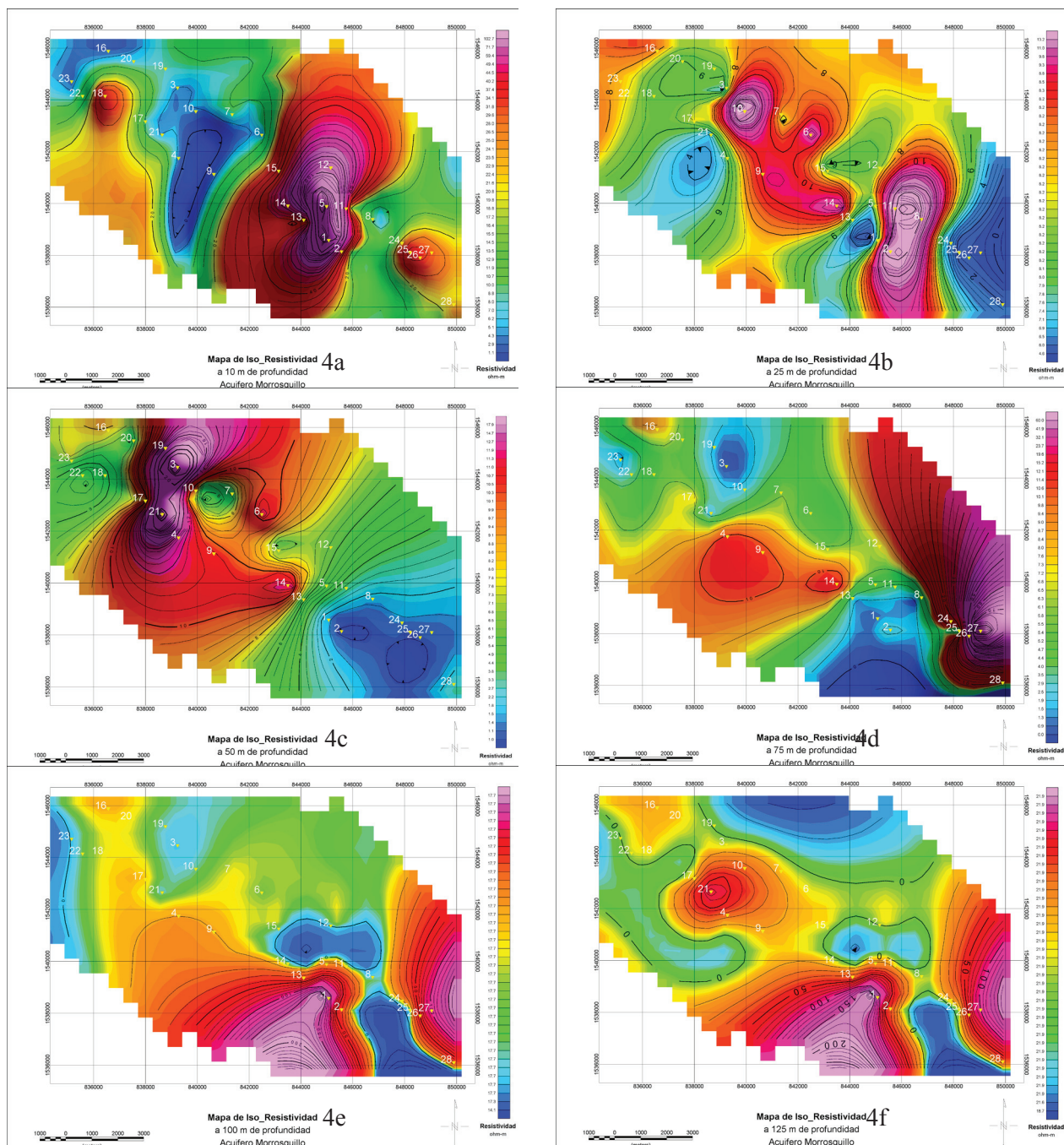


Figura 4. (a) Mapa de iso-resistividad a 10 m de profundidad del Acuífero de Morrosquillo, con resistividades entre 1.1 y 102 ohm-m. Se resaltan las mayores resistividades hacia la parte central del acuífero. (b) Mapa de iso-resistividad a 25 m de profundidad del Acuífero de Morrosquillo, con resistividades entre 4.6 y 13.2 ohm-m. Se diferencian dos zonas de mayor resistividad hacia la parte central del acuífero. (c) Mapa de iso-resistividad a 50 m de profundidad del Acuífero de Morrosquillo con resistividades entre 1.0 y 17.9 ohm-m. Las mayores resistividades se ubican hacia la parte occidental del acuífero. (d) Mapa de iso-resistividad a 75 m de profundidad del Acuífero de Morrosquillo con resistividades entre 0 y 60 ohm-m. Se resaltan las mayores resistividades hacia la parte oriental del acuífero. (e) Mapa de iso-resistividad a 100m de profundidad del Acuífero de Morrosquillo con resistividades entre 14.1 y 172 ohm-m. Se resaltan las mayores resistividades hacia la parte central del acuífero. (f) Mapa de iso-resistividad a 125 m de profundidad del Acuífero de Morrosquillo con resistividades entre 18.2 y 219 ohm-m. Se destaca el predominio de bajas resistividades a esta profundidad.

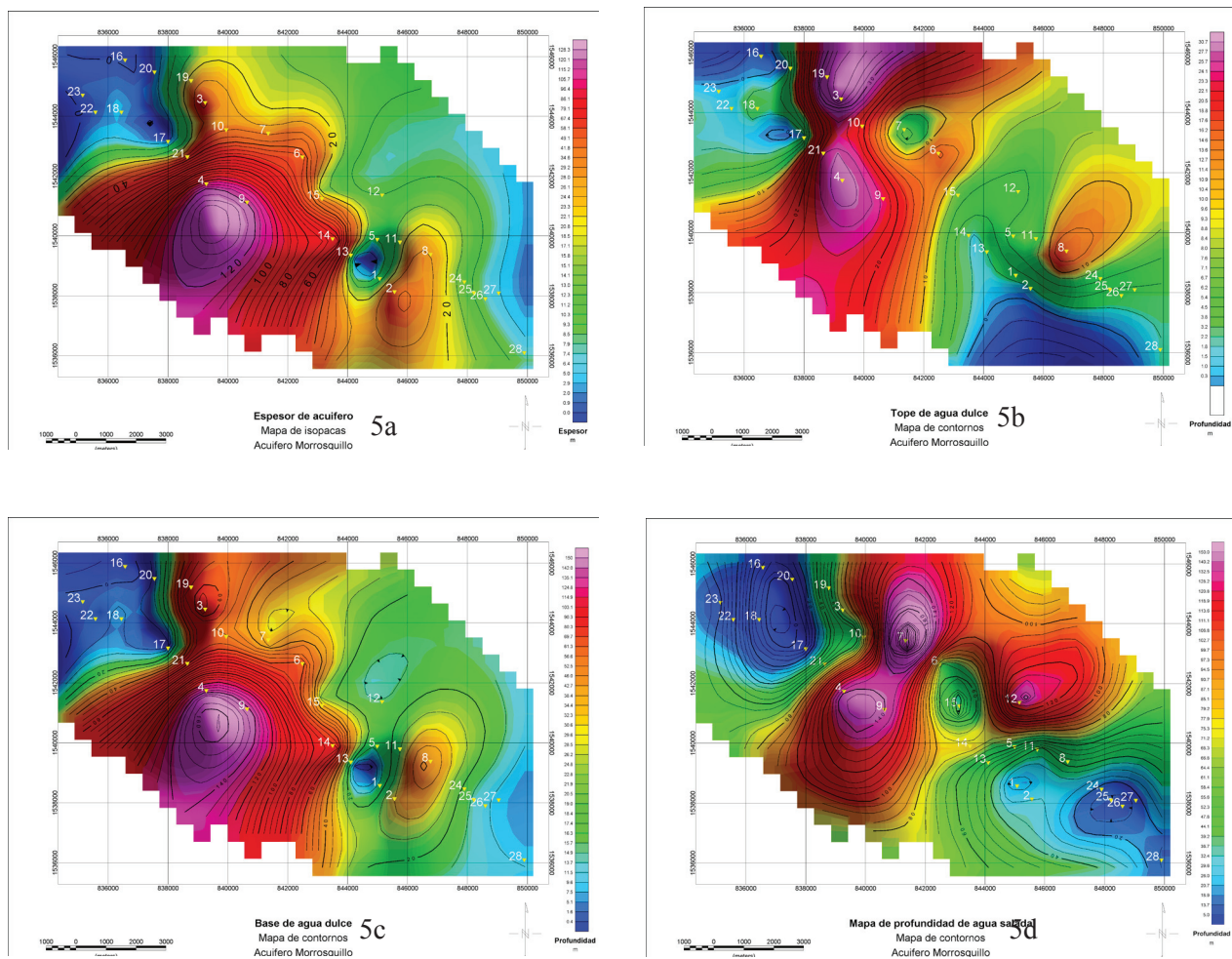


Figura 5. (a) Mapa de espesor del Acuífero de Morrosquillo, con valores de 0 a 128.3 m. Al SE se aprecia un mayor espesor en la región central del acuífero y es muy delgado o inexistente cerca a la línea de costa y el sector más oriental (b) Mapa de contornos de profundidad del tope de agua dulce del Acuífero de Morrosquillo, con valores entre 5 y 150 m. El tope del agua salada está a mayor profundidad en la región central del acuífero y es muy somero cerca a la línea de costa y el sector más suroriental (c) Mapa de contornos de profundidad de la base de agua dulce del Acuífero de Morrosquillo, con valores entre 0.4 y 150 m. La base de agua salada esta a mayor profundidad en la región central del acuífero y es muy somero cerca a la línea de costa y el sector más suroriental. (d) Mapa de contornos de profundidad del tope de agua salada del Acuífero de Morrosquillo, con valores entre 5 y 150 m. El tope del agua salada esta a mayor profundidad en la región central del acuífero y es muy somero cerca a la línea de costa y el sector más suroriental.

Dentro del sector de las mediciones realizadas, el espesor es variable desde unos pocos metros hasta más de 120 m. Para poder observar dicha variación se elaboró un mapa de isópacas con líneas de contornos cada 5 m (Fig. 5a). El mayor espesor se localiza alrededor de los SEV 4 y 9 hacia la parte intermedia entre las poblaciones de Tolú y Tolviejo y los menores espesores hacia los SEV 16, 17, 18, 20, 22 y 23, cerca a la línea de costa y a la población de Tolú. El tope de agua dulce en la zona medida se encuentra a diferentes profundidades que oscilan entre menos de 2 y 30 m. Esto sugiere la existencia de diferentes niveles saturados con agua subterránea desde la superficie hacia profundidad, dentro de los depósitos inconsolidados de edad reciente. Para poder visualizar esta situación se elaboró un mapa de contornos, con líneas cada 2 m, de las diferentes profundidades a las que se encuentra el techo del agua dulce, (Fig. 5b) a base del agua dulce en la zona medida se encuentra entre menos de 5 m de profundidad y algo más de 160 m bajo la superficie. Para observar esta variación se elaboró un mapa de contornos, cada 5 m, de la base del agua dulce (Fig. 5c). Las mayores profundidades se encuentran alrededor de los SEV 4 y 9, coincidiendo con el mayor espesor del acuífero. La presencia de agua salada es notoria muy cerca de la línea de costa y en la superficie, aunque si se avanza hacia el oriente va desapareciendo progresivamente al yacer bajo depósitos de agua salobre y dulce, tal situación está representada en el mapa del tope del agua salada, en donde se muestra la profundidad en la que se encuentra agua salada en el área estudiada en metros. El mapa se

elaboró con líneas de contorno cada 5 m y se muestra en la Figura 5d donde la mayor profundidad se encuentra hacia los SEV 4 y 9 y las menores profundidades cerca de los SEV 16, 17, 18, 20, 22 y 23, pudiéndose delimitar en superficie el límite agua dulce-agua salada (cambio de color azul a verde). A partir de los 28 SEV interpretados se elaboraron dos perfiles geoelectrónicos A-A' y B-B', orientados en dirección perpendicular a las tendencias estructurales del área (Fig. 6).

El Perfil A-A' (Fig. 6) está orientado con dirección NW-SE con una extensión de 17.4 km, incluyendo de oeste a este los centros de medición de los SEV 23, 22, 18, 17, 21, 4, 9, 14, 1, 2 y 28. Se ha modelado una profundidad cercana a los 160 m. Hacia la base de este perfil se identifica una zona geoelectrónica de muy baja resistividad, asociada a la presencia de aguas salobres y saladas, con valor a 2 ohm-m. Esta zona está muy cerca a la superficie en vecindades del Golfo de Morrosquillo y en la parte más oriental del perfil y logra su mayor profundidad en vecindades de los SEV 4 y 9. El perfil B-B' (Fig. 6) está orientado con dirección NW-SE, paralelamente al perfil anterior, con una extensión de 15.7 km, incluyendo de oeste a este los centros de medición de los SEV 16, 20, 19, 3, 10, 7, 6, 15, 5, 11, 8, 24, 25, 26 y 27. Se ha modelado una profundidad cercana a los 140 m. Hacia la base de este perfil se identifica una zona geoelectrónica de muy baja resistividad, asociada a la presencia de aguas salobres y saladas, con valor a 3 ohm-m.

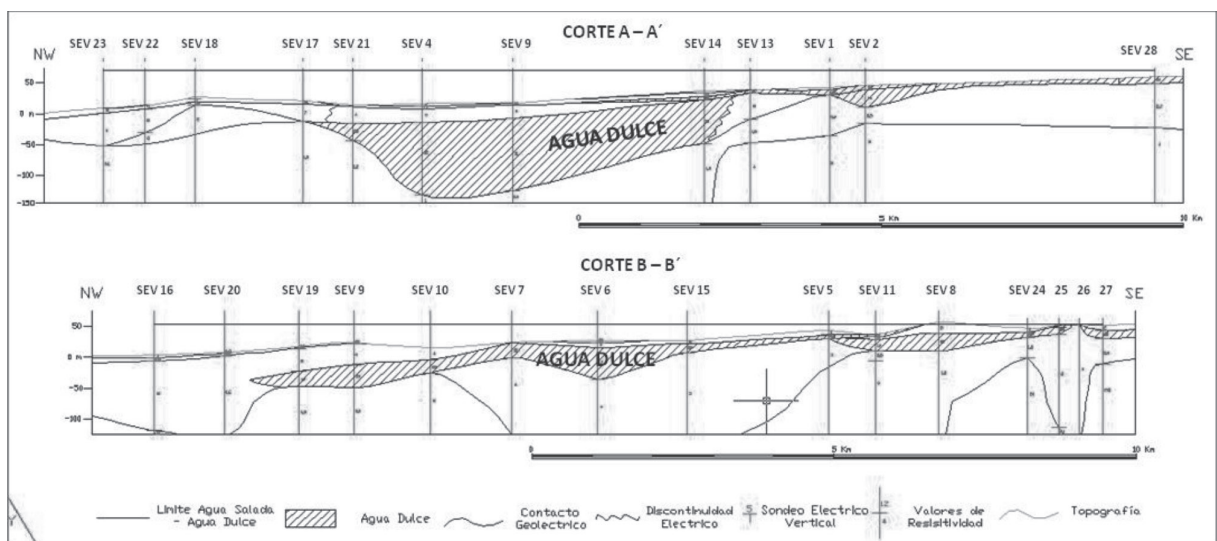


Figura 6. Perfiles A-A' y B-B' orientados con dirección NW-SE del Acuífero de Morrosquillo, en donde se representa la geometría irregular de la interface de agua dulce – agua salada (línea verde) evidenciando un mayor potencial del acuífero en los sectores intermedios.

Figure 6 Profiles A-A' and B-B' oriented with direction NW-SE the Morrosquillo aquifer, where it represents the irregular geometry of the interface of fresh water - salt water (green line) showing a greater potential of the aquifer in the intermediate sectors.

A partir de la información disponible de líneas sísmicas en la región del Golfo de Morrosquillo se complementó la interpretación estructural del subsuelo. Se compilaron las siguientes líneas sísmicas disponibles en la Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH. La línea LMV-1992-101 (Figs. 7 a 10) muestra una tectónica compresiva relacionada con el sistema de Fallas de Romeral. Hay truncaciones de los niveles de acuíferos asociados a los eventos extensivos y compresivos de la cuenca. Hay niveles del acuífero que se cierran en su convergencia hacia la Falla de Romeral. Se pueden delimitar una serie de bloques, con movimientos verticales diferenciales, con altos de basamento.

La Línea ANH-2005-08 (Fig. 7) presenta pliegues compresivos asociados a la Falla de Romeral. Las formaciones estratigráficas han sido truncadas por acción de las fallas compresivas asociadas al cinturón plegado en donde se aprecian rellenos de canal de valles profundos.

La Línea GT-1982-05 (Fig. 8) presenta una tectónica de bloques con fallas de alto ángulo inclinadas hacia el este. Las formaciones estratigráficas han sido truncadas por acción de estas fallas compresivas que continúan en la región al norte del Golfo de Morrosquillo.

La Línea LMV 1992-101 (Fig. 9) presenta pliegues suavizados hacia el este y fallas de ángulo medio a alto asociados a sistemas de fallas orientadas N30E.

La línea ST-1995-1320 (B) (Fig. 10) con orientación NNE – SSW, a lo largo de la línea de costa del Golfo de Morrosquillo, muestra una tectónica compresiva, afectando el basamento oceánico y las formaciones cretácicas y terciarias asociadas a los acuíferos de Tolviejo y Morrosquillo, las cuales están afectadas por sistemas de fallas orientadas perpendicularmente al sistema de Fallas de Romeral. Se aprecian rellenos de canal de valles profundos.

En general, en las líneas sísmicas se identifican las unidades estratigráficas desde el Cretácico Superior hasta el reciente. Las formaciones Cansona y San Cayetano se ubican sobre el basamento oceánico y están separadas por la inconformidad del Paleoceno. Estas unidades presentan una respuesta sísmica muy caótica debido a la alta complejidad estructural. La Formación San Jacinto corresponde a areniscas deltaicas, que producen reflexiones moderadas a discontinuas, reduciendo su espesor hacia el este. La Formación Cerrito está conformada principalmente por areniscas. Esta unidad se reconoce por sus continuos reflectores de amplitudes medias y altas. La Formación Sincelejo es similar a la Formación Cerrito, sin embargo, los reflectores sísmicos permiten identificar una inconformidad angular entre estas unidades en vecindades de los paleo altos del basamento. La parte superior de la Formación Sincelejo presenta una respuesta sísmica muy pobre debido a su exposición en superficie. Es sencillo identificar una inconformidad entre la Formación Sincelejo inferior y las unidades infrayacentes.

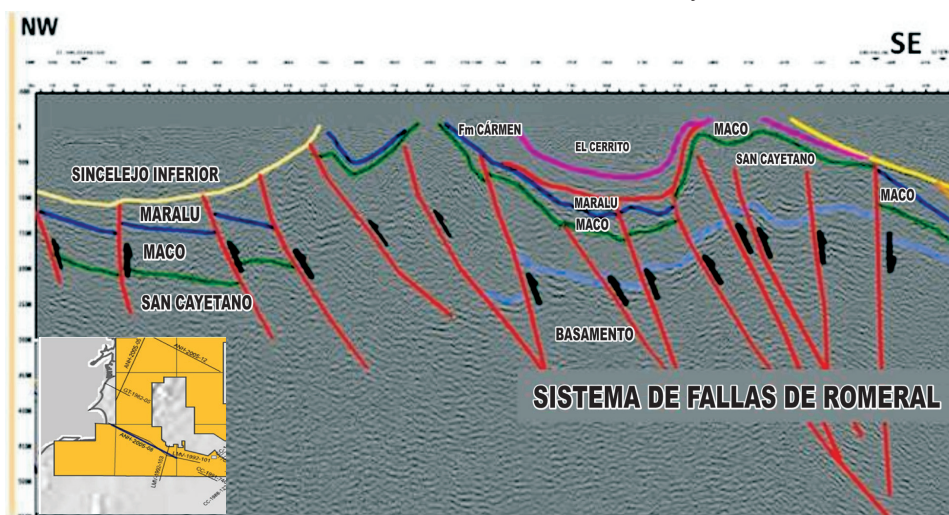


Figura 7. Interpretación de la margen Occidental de la línea ANH-2005-08 con rumbo NW-SE en la parte central del Golfo de Morrosquillo en donde se actualiza la interpretación del subsuelo, con una tectónica compresiva más compleja afectando el basamento oceánico y las formaciones del Cretácico superior hasta el Reciente, asociada al sistema de fallas de Romeral (Modificado de www.anh.gov.co, 2010).

Figure 7. Interpretation of the Western margin of line ANH-2005-08 with course NW-SE in the central part of the Gulf of Morrosquillo where the interpretation of the subsoil is updated, with a more complex tectonic compression affecting the oceanic basement and the Cretaceous Superior to Recent formations, associated to the Romeral faults system (Modified from www.anh.gov.co, 2010).

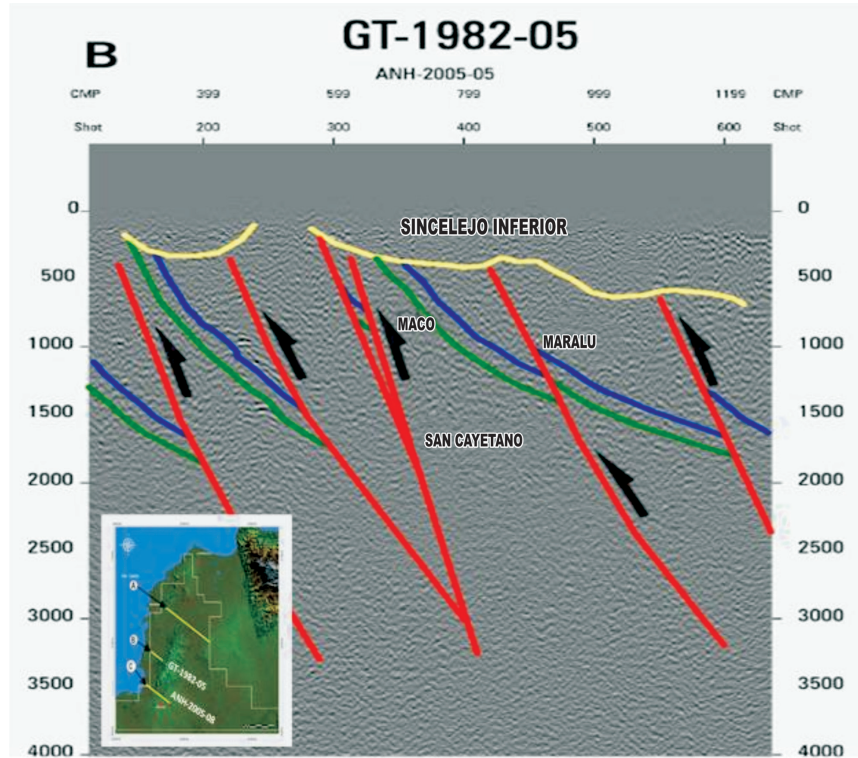


Figura 8. Interpretación de la línea GT-1982-05 con rumbo NW-SE en la región centro del Golfo de Morrosquillo observándose una tectónica compresiva, afectando el basamento oceánico y las formaciones cretácicas y terciarias (Modificado de www.anh.gov.co, 2010).

Figure 8. Interpretation of the line GT-1982-05 with course NW-SE in the central Gulf of Morrosquillo region, where is observed a compressive tectonic, affecting the oceanic basement and the Cretaceous and Tertiary formations (modified from www.anh.gov.co, 2010)

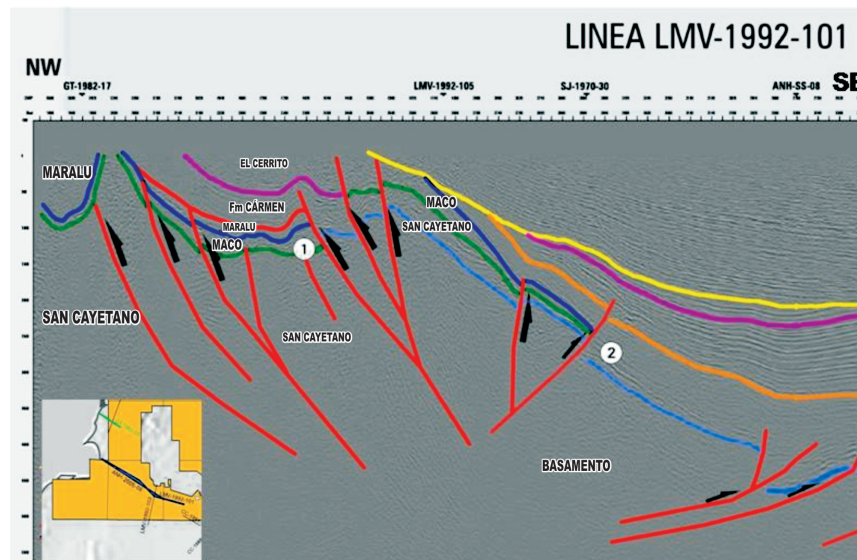


Figura 9. Interpretación de la margen occidental de la línea LMV-1992-101 en la parte central del Golfo de Morrosquillo en donde se observa una tectónica compresiva afectando el basamento oceánico y las formaciones del Cretácico superior hasta el Reciente (Modificado de www.anh.gov.co, 2010).

Figure 9. Interpretation of the Western margin of line LMV-1992-101 in the central part of the Gulf of Morrosquillo, where is observed a compressive tectonic, affecting the oceanic basement and the Cretaceous to Recent formations (modified from www.anh.gov.co, 2010)

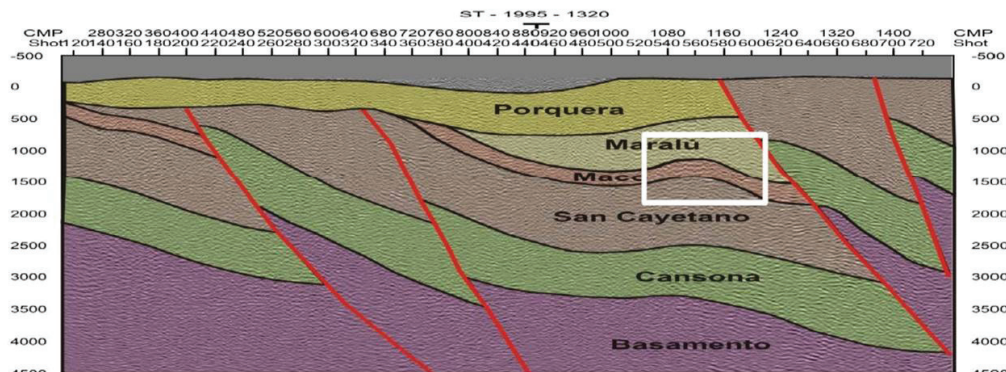


Figura 10. Interpretación de la línea ST-1995-1320 (B) con orientación NNE – SSW, a lo largo de la línea de costa del Golfo de Morrosquillo, observándose una tectónica compresiva, afectando el basamento oceánico y las formaciones cretácicas y terciarias y sistemas de fallas orientadas perpendicularmente al sistema de Fallas de Romeral (modificado de www.anh.gov.co, 2010)

Figura 10. Interpretation of the line LMV-1992-101 ST-1995-1320 (B) with the course NNE – SSW, along of the coastal line of the Gulf of Morrosquillo, where is observed a compressive tectonic, affecting the oceanic basement and the Cretaceous and Tertiary formations and the fault systems oriented perpendicularly to the Romeral Fault system (modified from www.anh.gov.co, 2010)

Conclusiones

A partir de la cartografía geológica y análisis de la información estratigráfica y descripción estratigráfica, se ha realizado la actualización del mapa geológico del Acuífero de Toluviejo y su aplicabilidad en la exploración de aguas subterráneas. La información geológica ha sido complementada con la interpretación de líneas sísmicas, en las cuales se identifican las unidades estratigráficas desde el Cretácico Superior hasta el reciente. Las formaciones Cansona y San Cayetano se ubican sobre el basamento oceánico y están separadas por la inconformidad del Paleoceno. La Formación San Jacinto produce reflexiones moderadas a discontinuas, reduciendo su espesor hacia el este. La Formación Cerrito presenta continuos reflectores de amplitudes medias y altas. La parte superior de la Formación Sincelejo presenta una respuesta sísmica muy pobre debido a su exposición en superficie. Es sencillo identificar una inconformidad entre la Formación Sincelejo inferior y las unidades infrayacentes. Las columnas estratigráficas presentadas a lo largo del Cinturón de San Jacinto comienzan con la Formación Cansona, determinando así esta unidad como la formación más antigua aflorante en la Cuenca Sinú - San Jacinto. También se aprecia claramente la discontinuidad del Paleoceno inferior.

El modelo geoelectrico del Golfo de Morrosquillo está representado por la variación del espesor del acuífero dentro del área medida, la delineación de la cuña de agua salada y la distribución de resistividades a diferentes profundidades, desde unos pocos metros hasta más de 120 m.

El tope de agua dulce en la zona medida se encuentra a diferentes profundidades que oscilan entre menos de 2 y 30 m, evidenciando niveles saturados con agua subterránea desde la superficie hacia profundidad, dentro de los depósitos inconsolidados de edad reciente; la base en la zona medida, se encuentra entre menos de 5 m de profundidad y algo más de 160 m bajo la superficie.

La presencia de agua salada es notoria muy cerca de la línea de costa y a la superficie, aunque si se avanza hacia el oriente va desapareciendo progresivamente al yacer bajo depósitos de agua salobre y dulce.

Agradecimientos

Este artículo ha sido realizado gracias a la colaboración de la Corporación Autónoma Regional de Sucre, CARSUCRE, la empresa Tecnología, Equipos y Procesos, TEP Ltda, la División de Extensión del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia y a los dos evaluadores del presente artículo.

Referencias

- CLAVIJO, J. & BARRERA, R. (2001): Geología de las planchas 44 Sincelejo y 52 Sahagún, Escala 1:100.000. Memoria Explicativa Ingeominas, Bogotá.
- CHENEVART, CH. (1963): Les dorsales transverses anciennes de Colombie et leurs homologues d'Amérique latine. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, **56** (2): 907-927.
- DOUGLAS & HEITMAN (1989): Slope and basin benthic foraminifera of the California borderland. En: Doyle, L. J.; Pilkey, O. H. (eds.). *Geology of Continental Slopes*. Soc. Eco. Paleont. Miner. Sp. Publ., **27**: 231- 246.
- DUEÑAS, H. & DUQUE, H. (1981): Geología del Cuadrángulo F-8 (Planeta Rica). *Bol. Geol. Ingeominas*, **24** (1): 11-16. Bogotá, Colombia.
- DUQUE – CARO, H. (1980): Geotectónica y evolución de la región noroccidental de Colombia. – *Boletín Geológico Ingeominas*. **23** (3): 4-35, Bogotá, Informe 936. Bogotá.
- GUZMÁN, G., CLAVIJO, J., BARBOSA, G. & SALAZAR, G. (1998): Mapa Geológico de las Planchas 36-37 María La Baja, escala 1:100.000. Ingeominas.
- KEARY, P. & BROOKS, M. (1992): *An introduction to exploration geophysics, second edition*, Blackwell series, London, 254 p.
- LOWRIE, W. (2007): *Fundamentals of Geophysics, second edition*, Cambridge University Press, New York, USA.
- NOTESTEIN, F.B., HUBMAN, C.W. & BOWLER, J.W. (1944): *Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia*. Geological Society of America, *Bulletin*, **55**: 1155-1218.
- PINDELL, J. L (1998): *The Colombian Hydrocarbon Habitat: Integrated Sedimentology, Geochemistry, Paleogeographic Evolution, Geodynamics, Petroleum Geology, and Basin Analysis*. Tectonic Analysis Inc. West Sussex.
- READING, H. (1982): *Sedimentary environments and Facies*. Elsevier, 316 p. New York.
- REYES, G. & ZAPATA, G. (2001): Geología de las Planchas 24 Sabanalarga Escala 1:100.000. Memoria Explicativa. Ingeominas.
- REYES, G., GUZMÁN, G., BARBOSA, G. & ZAPATA, G. (2001): Geología de las Planchas 23 Cartagena y 29 - 30 Arjona Escala 1:100.000. Memoria Explicativa. Ingeominas.
- TELFORD, W.M. GELDART, L.P. & SHERIFF, R.E. (1990): *Applied Geophysics, Second Edition*, Cambridge University Press, USA
- UNIVERSIDAD DE CALDAS. (2009): Inventario, interpretación y evaluación de la información geológica disponible, elaboración de los paquetes técnicos y promocionales y acompañamiento en la ronda de áreas abiertas 2009. Área reservada Sinú - Urabá. Reporte interno a la ANH.
- WERENFELS, A. (1926): A stratigraphical section through the Tertiary Toluviejo, Colombia. *Ecl. Geol. Helv.*, **20** (1):79- 83. Basel.

Página web: <http://www.anh.gov.co/>