

MODELAMIENTO GEOFÍSICO DE UN ÁREA DE LA ZONA DE CERRITOS, MUNICIPIO DE PEREIRA (RISARALDA)

Por

Lina María Serna, Luis Montes & Carlos Vargas¹

Resumen

Serna, L.M., L. Montes & C. Vargas: Modelamiento geofísico de un área de la zona de Cerritos, municipio de Pereira (Risaralda). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(123): 157-169, 2008. ISSN 0370-3908.

Mediante el convenio CARDER – Universidad Nacional, se realizó una campaña geofísica en el área de Cerritos, zona rural de la ciudad de Pereira. Esta campaña consistió de la adquisición, procesamiento, modelamiento e interpretación de datos gravimétricos, magnéticos, geoeléctricos, y sísmicos en un área de 210.75 km². A partir de la implementación de las diferentes medidas geofísicas y estudios anteriores, se definió que la zona de estudio contiene un acuífero de tipo libre a semiconfinado definido por la Formación Pereira (Tqp) de edad Plio-Pleistoceno, la cual se caracteriza por presentar capas con heterogeneidad lateral, y se integra de dos secuencias principales, la superior de cenizas volcánicas, y la inferior de flujos volcanoclásticos, cuyo espesor alcanza los 750m, está siendo controlado por las Formaciones Cartago y Barroso, que a su vez están siendo afectadas por la actividad tectónica de la zona, donde las fallas inversas ayudan a producir levantamientos del basamento y cambios de espesor de la Formación Pereira, lo cual puede afectar el sistema de circulación de las aguas subterráneas, manifestados por los cambios de resistividad eléctrica en el subsuelo.

Palabras clave: acuífero, prospección geofísica, gravimetría, magnetometría, sísmica, tomografías eléctricas, Formación Pereira, inversión, propiedades geofísicas.

Abstract

A geophysical project was developed in Cerritos area, near Pereira city, where gravity, magnetic, electrical and seismic data were acquired over a 210.75 km² area. The data were processed and interpreted according the geological information acquired and also available; as result a free to confined aquifer was defined in the Plio-Pleistocene Pereira formation (Tqp), that is characterized

¹ Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Ciencias - Geofísica, Departamento de Geociencias.

by non-homogeneous lateral layers and constituted by a superior sequence of volcanic ashes and an inferior of volcano-clastic flows which reaches 750 m thick. The Pereira fm is controlled by the tectonic controlled Cartago and Barroso formations, with inverse faults that indicate uplift of the basement and variations of the Pereira formation thick, affecting the underwater circulation system and expressed by variations in the electric resistivity of the subsoil.

Key words: acuífer, geophysical prospecting, gravimetry, magnetometry, seismic, electrical tomography, Pereira formation, investment, geophysical properties.

Introducción

La Corporación Autónoma Regional de Risaralda, CARDER, desde el año 2001 ha venido desarrollando el proyecto para la formulación del “Plan de Manejo Integral de las Aguas Subterráneas en Pereira, PPMIASP”, el cual propone adquirir las herramientas técnicas, sociales y administrativas que permiten gestionar el uso racional y sostenible de las aguas subterráneas, propendiendo por garantizar a generaciones actuales y futuras su conservación en términos de calidad y cantidad (CARDER, 2007). Con base en esta formulación se creó el convenio administrativo entre la Corporación Autónoma Regional de Risaralda – CARDER, y la Universidad Nacional de Colombia, con el fin de conocer y modelar las propiedades geofísicas del subsuelo para ser dirigido hacia un modelo geológico-geofísico que permitiera refinar el modelo hidrogeológico conceptual del Acuífero de Pereira. Mediante este convenio se realizó una campaña de prospección geofísica en la zona de Cerritos, sector occidental de la ciudad de Pereira.

Los métodos geofísicos (tomografías eléctricas, gravimetría, magnetometría, sísmica) aplicables a estudios hidrogeológicos destacan la estimación de la estructura del subsuelo y profundidad de formaciones impermeables, la continuidad lateral de las unidades, espesores de estratos, detección de zonas de fracturamiento o de fallas, y conformación de un basamento. Características que ayudan a estructurar y planificar la riqueza hídrica del área, a partir de la implementación de un arreglo instrumental de medidas geofísicas, sobre un área aproximada de 210.75 km².

Informes de otros trabajos realizados en la zona estimaban la profundidad del basamento localmente con un espesor no mayor a la profundidad alcanzada por los sondeos eléctricos verticales y en otros no se identificaba el basamento. Este estudio suministra información cuantitativa más confiable sobre un territorio más extenso, permitiendo así determinar los distintos espesores que conforman las unidades geológicas, la profundidad de las capas impermeables y el espesor del estrato saturado. Por tal razón, se considera que la integración de métodos

geofísicos contribuye de una manera significativa en la definición del modelo del subsuelo para un amplio sector de Cerritos, siendo además una excelente herramienta para mejorar el entendimiento sobre los acuíferos de esta zona, la cual permite evaluar y planificar la riqueza hídrica del área y estimar el potencial de los recursos hídricos subterráneos, considerados la más importante fuente de abastecimiento de agua potable para la población.

Descripción del área de estudio

El estudio se desarrolla en la región de Cerritos, área rural de la ciudad de Pereira, localizada al oeste de esta ciudad, perteneciente al departamento de Risaralda (Figura 1). A su vez, este departamento está situado en el centro occidente de Colombia en la denominada región cafetera. Comprende un área aproximada de 210.75 km², y está entre las latitudes: 4°41'18.66"N - 4°52'7.73"N, y longitudes: 75°54'33.57"W - 75°38'19.08"W.

La zona de estudio es controlada estructuralmente por fallas con orientación general N-S y NNE-SSW de actividad reciente, y se conforma principalmente por unidades cretácicas y terciarias: como la Formación Barroso (Kvb), la cual está compuesta por diabasas, basaltos y en menor proporción espilitas; Cartago (Toc) compuesta por una secuencia de limolitas azul-grisáceas levemente carbonosas, intercaladas con areniscas de grano medio de color café verdoso, arcósicas y algunos niveles tobáceos (Cardona y Ortiz, 1993). Esta unidad conforma el Sinclinal de Miravalles, y está expuesta hacia el sur-occidente de la ciudad de Pereira; y la Formación Pereira (Tqp), la cual es la unidad de mayor interés hidrogeológico, por poseer las características más favorables para el transporte y acumulación de aguas subterráneas, además de su gran extensión, y potente espesor. Se caracteriza por su falta de secuencialidad y carácter heterogéneo, donde su origen se atribuye a erupciones generadas en la cima de la Cordillera Central. Esta unidad de edad Plioceno –Pleistoceno, se divide en dos miembros, el miembro inferior, conformado en un alto porcentaje por depósitos de flujos de escombros, intercalados por depósitos de corrientes trenzadas,

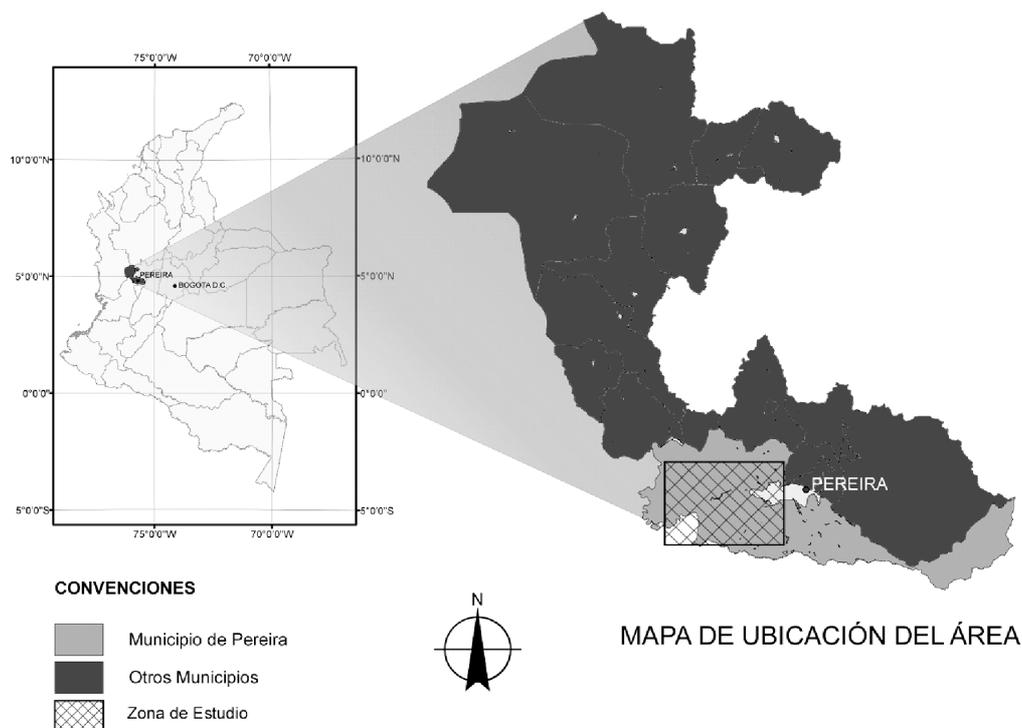


Figura 1. Localización del área de estudio.

corrientes de baja sinuosidad y en menor proporción con depósitos de llanuras de inundación o lagunares; también se presentan tobas de caída y flujos piroclásticos; y un miembro superior conformado por tobas de caída y localmente arcillas tobáceas de ambiente lagunar (Cardona y Ortiz, 1993) (Figura 2).

Metodología

A partir de la compilación y análisis de información geológica y geofísica, se obtuvo un marco de referencia acerca del comportamiento de las unidades litológicas de la zona y el control estructural de las mismas, con el fin de diseñar estratégicamente la ubicación de las estaciones. A partir de este procedimiento se realizaron cinco perfiles magnéticos y gravimétricos de dirección preferencial Este-Oeste, diez tomografías eléctricas distribuidas ampliamente en la zona de estudio, y una línea sísmica de orientación Este-Oeste ubicada sobre el área de La Carmelita (Figura 3). De forma alterna se recolectaron muestras de roca de las Formaciones Barroso y Pereira, y se tomaron registros visuales de otras unidades aflorantes en la zona. En total se adquirieron 200 puntos de gravimetría y magnetometría, diez secciones tomográficas con extensiones que alcanzan los 150 metros, y dos kilómetros de línea sísmica

correspondientes a 93 fuentes por cada 25 metros de desplazamiento, tomando como base cartográfica los mapas 1:25000 y 1:5000 de la zona, elaborados por Ingeominas y CARDER.

Este trabajo de campo comprende diferentes actividades dependiendo del método geofísico a emplear, como se describe en la tabla 1.

La reducción de los datos gravimétricos fue referida al NP44 de la línea TW2, de la Red Gravimétrica de Tercer Orden, ubicado en el Puente Mosquera de Pereira, con un valor de gravedad observada de 977732.73 mGal. A partir de los datos de gravedad observada se hacen las reducciones de los datos gravimétricos con el fin de obtener la anomalía total de Bouguer, usando como referencia para el cálculo de la gravedad teórica, la ecuación internacional de WGS 1984. La corrección topográfica fue calculada a partir de modelos digitales de terreno generados por las cartografías 1:5000 y 1:25000 de la zona de estudio. En el cálculo de la corrección de Bouguer, se usó una densidad de 2.758 g/cm³, estimada a partir de pruebas de laboratorio, obteniendo las anomalías de aire libre y total de Bouguer.

En la reducción de datos magnetométricos se eliminan las variaciones del campo magnético debidas a causas no

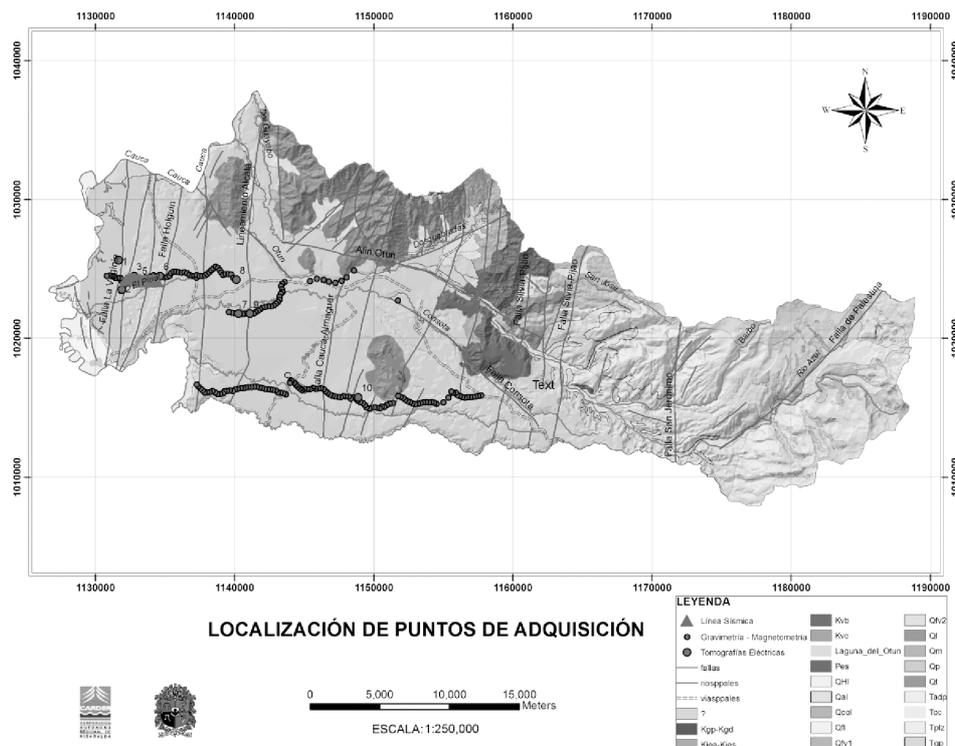


Figura 2. Geología de la ciudad de Pereira (Modificado de CARDER, 2004). La zona de estudio se encuentra influenciada por las Formaciones Pereira (Tqp), Cartago (Toc), y Barroso (Kvb).

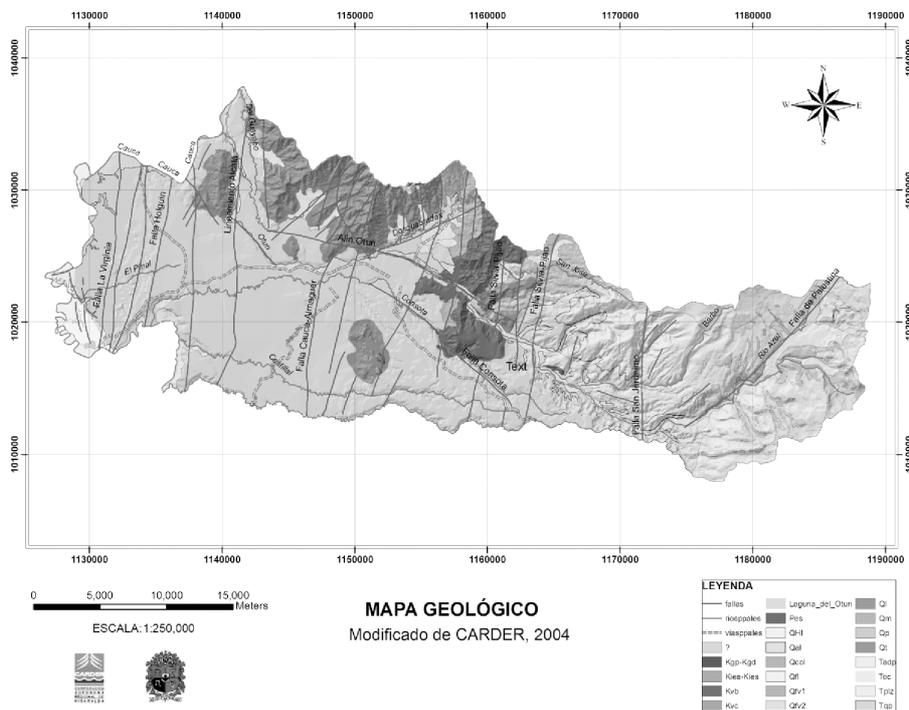


Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio y localización de los puntos de adquisición. Magneto-gravimetría (puntos púrpura), línea sísmica (triángulos azules), tomografías eléctricas (puntos rojos).

Tabla 1. Métodos geofísicos usados en hidrogeología.

Métodos	Principios	Parámetros obtenidos
Geoeléctrico	Conductividad o resistividad eléctrica	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral, propiedades de las formaciones (arena-arcilla), salinidad del agua, plumas de contaminación.
Sísmica de Refracción	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Depósitos secos-saturados, espesores de diferentes estratos y detección de zonas de fracturamiento.
Sísmica de Reflexión	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Zonas de fallas, cartografías de estructuras de recubrimiento.
Gravimetría	Densidad	Relleno-basamento.
Magnetometría	Susceptibilidad Magnética	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral.

geológicas como la variación diurna, y la presencia de ruidos culturales al ajustar los datos de campo con el comportamiento general del campo magnético de la estación base, para hacer la corrección del IGRF (International Geophysical Reference Field), y obtener el valor de anomalía de campo total. Estas anomalías pueden ser reducidas a “anomalías en el polo magnético” si la dirección del campo magnético de la tierra y la dirección de magnetización del objeto se conoce, donde los valores promedio de declinación e inclinación magnética para esta zona son de -4.4204 grados, y 30.754 grados, respectivamente.

Para tener una estimación real de la magnetización de las rocas en el área de estudio se realizaron mediciones de susceptibilidad magnética de varias muestras de la Formación Barroso, compuesta principalmente por diabasas, basaltos, y en menor proporción espilitas. El valor de susceptibilidad magnética obtenido se comparó con otros valores medidos sobre la misma Formación en un estudio magnetométrico realizado entre los límites de los departamentos de Caldas y Antioquia, por la unión temporal Dunia-ATG, 2005. Se calculó un promedio para los basaltos de la Formación Barroso de 0.000435 cgs, con el fin de realizar los modelos geológicos a partir de los datos magnéticos observados.

Los datos generados a partir de las tomografías eléctricas son datos de resistividad aparente a partir de un arreglo tipo Wenner, donde se aplicó un proceso de inversión por mínimos cuadrados realizando una grilla a partir de diferencias finitas con el fin de establecer modelos en dos dimensiones de resistividad verdadera del subsuelo.

En el método de sísmica de reflexión se obtienen sismogramas a partir de la campaña de adquisición, los cuales son procesados hasta una migración en tiempo. Este procesamiento consiste básicamente en asignar una geo-

metría, realizar una deconvolución, en la cual se da un mejoramiento en la resolución de los datos. Posterior a éste, se hace la corrección en tiempo o corrección Normal Moveout con ayuda de una función de velocidad para alinear cada traza a la forma de la estructura, y por último se hace la migración de los datos la cual busca colapsar las difracciones presentes que actúan como fuentes secundarias y mueve los eventos buzantes a su posición original. Al obtener la sección sísmica, se realiza la interpretación de ésta, la cual busca caracterizar geológicamente los horizontes reflejados.

Resultados

De los cinco perfiles magneto-gravimétricos modelados mediante la aproximación por láminas del método de Talwani (Talwani *et al.*, 1959, y Talwani and Heirtzler, 1964), los perfiles 1 (San Felipe), y 2 (Jordán) son presentados aquí, por estar ubicados en los extremos occidental y oriental del área, respectivamente. El perfil de San Felipe tiene una longitud de 10928.7 metros, con una dirección preferencial W-E. Se ubica sobre la Formación Pereira, y está cortando fallas de dirección N-S y NNE-SSW, como la Falla La Virginia, y la Falla Holguín.

En la Figura 4, correspondiente al perfil de San Felipe, se identifica en el primer recuadro la curva de datos observados (puntos) de anomalía de campo total reducida al polo, contra la curva de anomalía magnética teórica (línea continua). El siguiente recuadro muestra la curva de gravedad observada (puntos), contra la gravedad teórica (línea), y el recuadro inferior corresponde al modelo geológico que mejor se ajustó a los datos. Este modelo es interpretado en un programa de dibujo para detallar el movimiento de las fallas, donde se aprecia que la Formación Cartago se encuentra infrayaciendo los depósitos fluviales y glaciovolcánicos

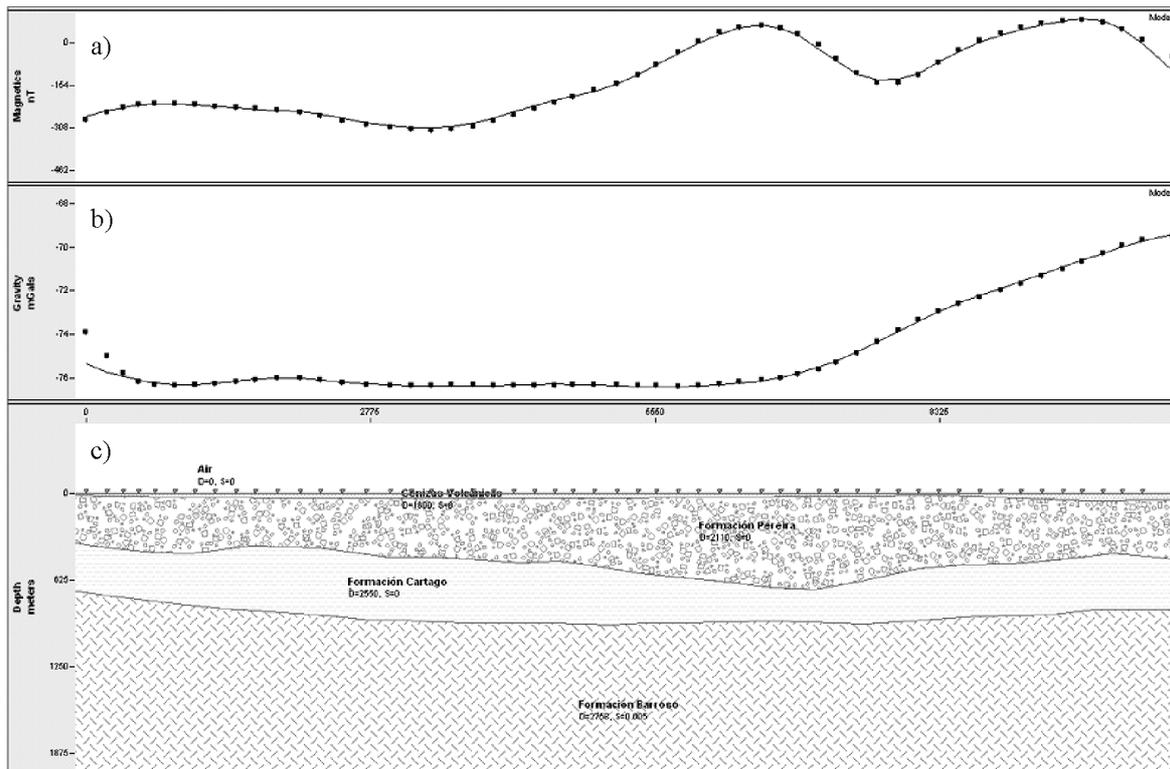


Figura 4. Sección del perfil 1 (San Felipe), computado por el modelamiento 2D de datos gravimétricos y magnéticos. (a) Datos observados (puntos) y datos teóricos (línea continua) de la anomalía de intensidad magnética total reducida al polo, en nanoTeslas. (b) Anomalía observada (puntos) y teórica (línea continua) total de Bouguer, en miliGales. (c) Sección geológica con propiedades geofísicas de cada bloque, D = densidad (kg/m^3), S = susceptibilidad magnética (SI).

de la Formación Pereira a partir de 350m (Figura 5). La Formación Barroso presenta profundidades entre 740 y 950m, disminuyendo constantemente hacia el oriente. De otra forma, se identifica la influencia de las fallas inversas de ángulo bajo, las cuales ayudan a controlar el ascenso del basamento hacia la parte más oriental.

Para el perfil El Jordán (Figura 6), la Formación Pereira incrementa su espesor hacia el oriente a medida que se aleja del basamento aflorante, alcanzando espesores de 595m. La Formación Barroso está en contacto probablemente fallado en el sector más oriental con el Stock Gabrónico de Pereira, el cual refleja altos valores de anomalía magnética, alrededor de 100 nanoTeslas (Figura 7). Estos altos valores magnéticos para esta unidad cretácica pueden indicar una zona económicamente prospectiva por concentración de minerales ferromagnesianos.

De forma general, el basamento cretácico es mucho más profundo en la parte más occidental de la zona, alcanzando profundidades máximas de 991m. A medida que se avanza hacia el oriente de la zona se produce un adelgazamiento

de los sedimentos, y una mayor influencia de las fallas que ayudan a levantar el basamento. Los tres perfiles ubicados al sur de la zona de estudio (perfiles La Palmerita, El Agrado, y El Jordán), muestran un alto de basamento cretácico asociado al cuerpo que aflora en este sector, básicamente en el perfil El Agrado (Figura 8). La tabla 2 muestra la variación de profundidad de la Formación Cartago y de la Formación Barroso para cada modelo obtenido.

Tabla 2. Estimación de la profundidad de los tope de los basamentos Terciario y Cretácico, a partir de los modelos geológicos obtenidos a partir de la inversión magneto-gravimétrica.

Perfil	Tope Basamento Terciario (m)	Tope Basamento Cretácico (m)
1 San Felipe	376-689	739-949
2 El Tigre		559-825
3 Palmerita	105-537	562-991
4 El Agrado		122-629
5 El Jordán		178-345

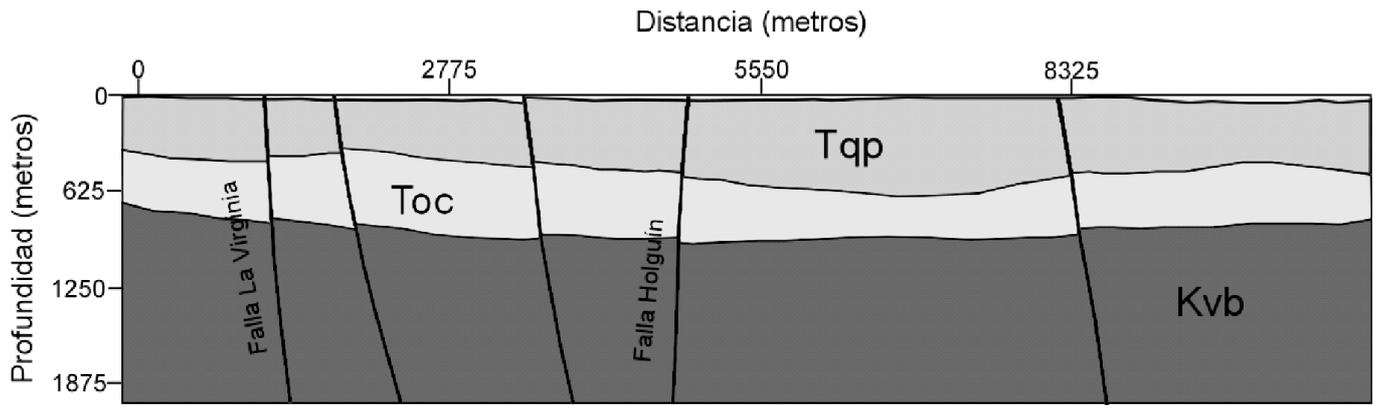


Figura 5. Sección geológica interpretada del perfil 1 (San Felipe). En general, muestra la dirección y actividad de las fallas (líneas rojas), que producen leves desplazamientos de las unidades geológicas (Tqp = Formación Pereira, Toc = Formación Cartago, y Kvb = Formación Barroso).

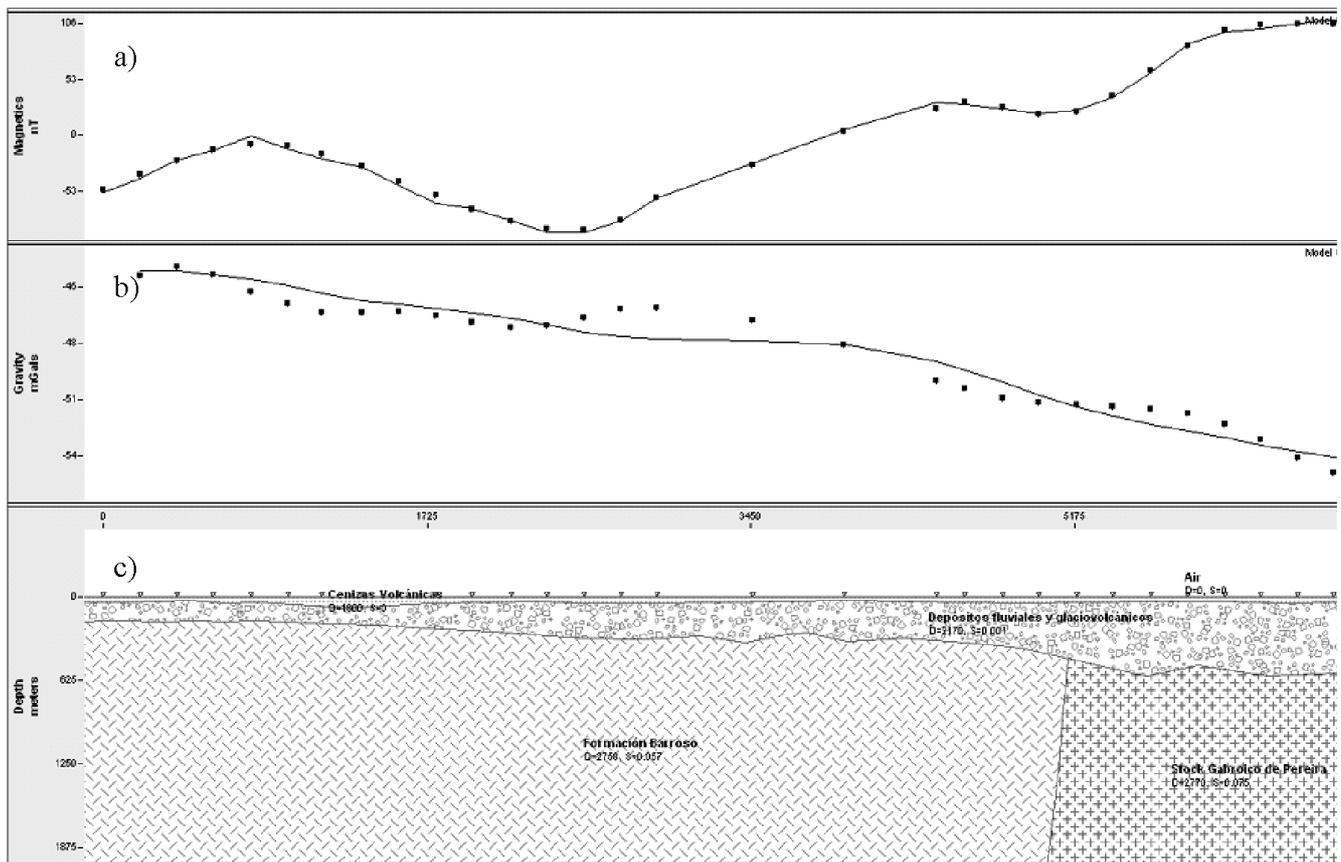


Figura 6. Sección del perfil 5 (El Jordán), computado por el modelamiento 2D de datos gravimétricos y magnéticos. (a) Datos observados (puntos) y datos teóricos (línea continua) de la anomalía de intensidad magnética total reducida al polo, en nanoTeslas. (b) Anomalía observada (puntos) y teórica (línea continua) total de Bouguer, en miliGals. (c) Sección geológica con propiedades geofísicas de cada bloque, D = densidad (kg/m^3), S = susceptibilidad magnética (SI).

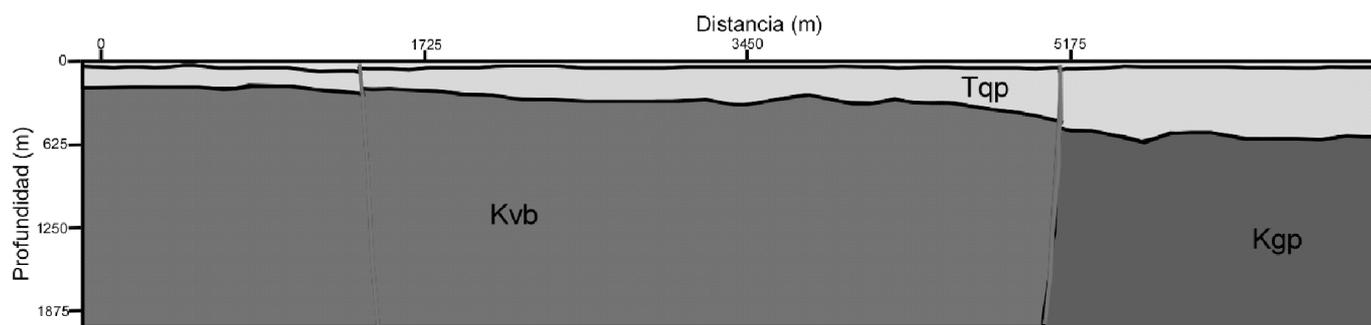


Figura 7. Sección geológica interpretada del perfil 5 (El Jordán). La Formación Pereira incrementa su espesor hacia el oriente a medida que se aleja del basamento aflorante, alcanzando espesores de 595m. La Formación Barroso está en contacto fallado en el sector más oriental con el Stock Gabrónico de Pereira, el cual refleja altos valores de anomalía magnética, alrededor de 100 nanoTeslas, según la figura 6.

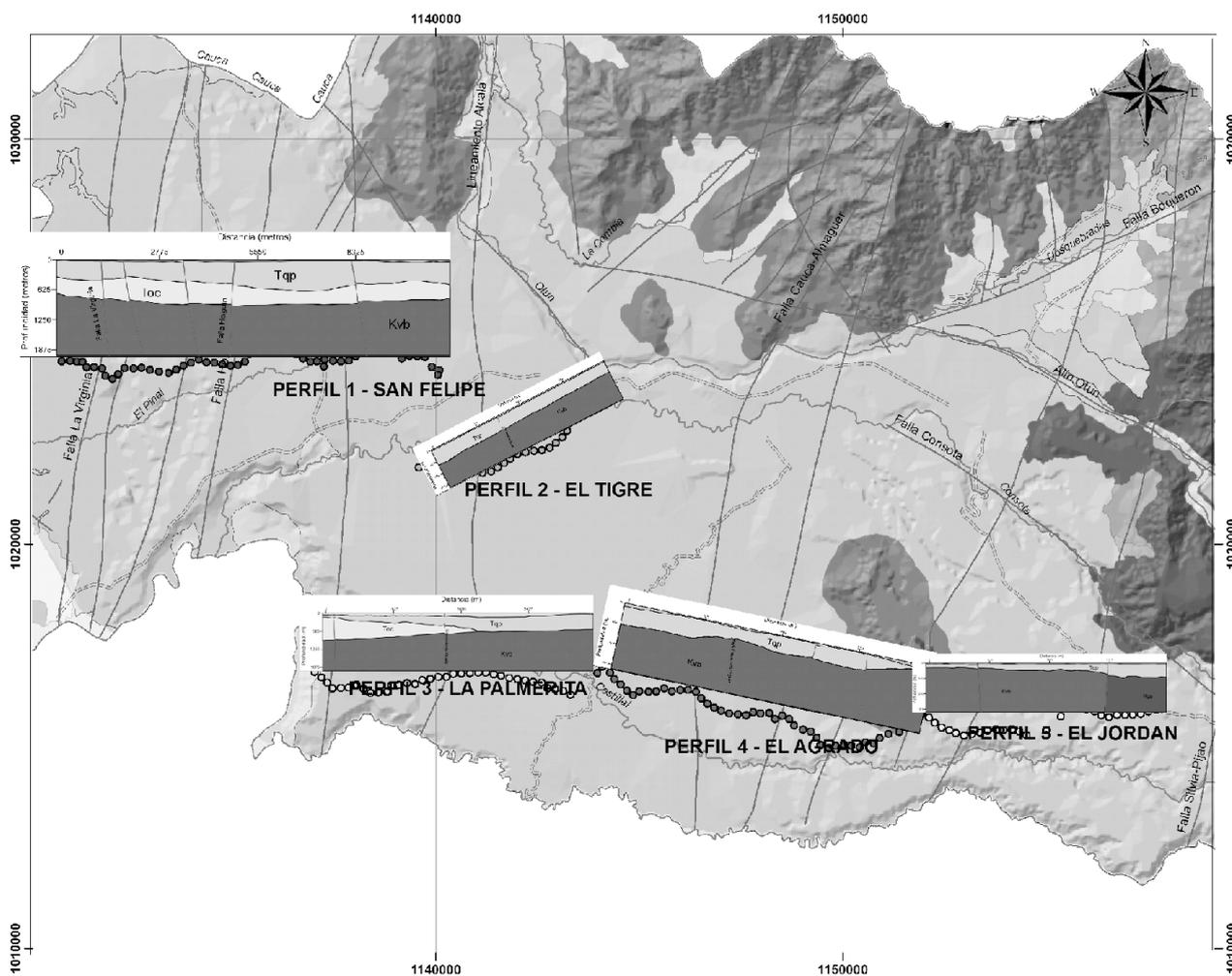


Figura 8. Distribución espacial de los modelos geológicos obtenidos a partir de la inversión magneto-gravimétrica. En los perfiles más occidentales (San Felipe, El Tigre, y La Palmerita), se aprecia la alta influencia de las fallas que ayudan a levantar el basamento cretácico. Por otra parte, los modelos restantes (El Agrado y El Jordán) muestran el adelgazamiento de la Formación Pereira a medida que se acerca al cuerpo aflorante de la Formación Barroso.

La Figura 8 indica la posición de los modelos magneto-gravimétricos sobre el mapa geológico de la zona, mostrando en general un aumento de espesor de la Formación Pereira hacia el sector occidental, a medida que se aleja de los cuerpos cretácicos. También es notable la influencia de las fallas, principalmente sobre los perfiles San Felipe, El Tigre, y La Palmerita, las cuales ayudan a producir un relativo levantamiento del basamento cretácico.

De acuerdo a los resultados de inversión de las 10 tomografías eléctricas, se escogieron las tomografías 4 y 6, ya que definen muy bien el número de capas del subsuelo.

Según el modelo de inversión para la tomografía 4 (Figura 9), con una profundidad alcanzada de 19.2m, se aprecia la capa 1 (C1) a partir de 3m hasta 6m de profundidad, con resistividades entre 60 y 120ohm-m. En la parte somera se observa bajos valores de resistividad entre 18 y 31ohm-m, probablemente debido a filtraciones de agua lluvia.

En el modelo obtenido para la tomografía 6 (Figura 10), se aprecian fuertes variaciones de resistividad, caracterizando dos capas diferentes, en la parte somera una capa de altas resistividades (90 – 150 ohm-m), y a partir de 7m de profundidad una capa de bajas resistividades entre 35 y 67 ohm-m.

En general, se identifica en las diez tomografías dos capas, donde la primera capa se asocia a una zona de altas resistividades que oscilan entre 60 y 300 ohm-m con una

profundidad promedio de 10m, y la segunda capa a una zona de bajas resistividades entre 3 y 60 ohm-m, alcanzando una profundidad máxima de 20 metros. Teniendo en cuenta el rango de resistividades antes mencionado, la estratigrafía de la zona de estudio, y los registros de pozos cercanos a las tomografías, se establece que tanto la Capa 1 como la Capa 2 se asocian al miembro superior de la Formación Pereira, constituida principalmente por cenizas volcánicas. Sin embargo, los resultados de las tomografías dividen esta capa en una capa con alta resistividad, posiblemente debido a saturación de agua, y una capa con resistividad baja subyacente a la anterior. Para el caso de las tomografías 7, 8, y 9, la capa 1 presenta resistividades mucho mayores que oscilan entre 100 y 300 ohm-m, y para la capa 2 las resistividades bajas se encuentran en un rango de 20 a 90 ohm-m.

En la Tabla 3 se presentan las características más importantes interpretadas para cada tomografía eléctrica.

A partir de las correlaciones realizadas entre cada una de las tomografías, e información de pozos, se puede decir que la capa más somera definida por la capa 1, consiste de una capa de altas resistividades (60-300 ohm-m), la cual alcanza una profundidad de 17m, compuesta principalmente por arcillas y limos en ocasiones con presencia de arenas. La segunda capa está asociada a rocas más gruesas, principalmente arenas gruesas, brecha, grava y guijarros en matriz arcillosa. Esta capa presenta un rango de resistividades bajas, entre 3 y 90 ohm-m.

Tabla 3. Principales características obtenidas a partir de las tomografías eléctricas.

Tomografía	Capa	Profundidad (m)	Mínima resistividad observada	Máxima resistividad observada
1	1	2-13	80	300
	2	10-	3	27
2	1	5-17	60	160
	2	17-	7	20
3	1	2-13	60	190
	2	13-	4	23
4	1	3-15	60	120
	2	15-	4	15
5	1	3-19	60	100
6	1	1-7	90	150
	2	7-16	35	67
7	1	1-13	100	230
	2	13-	50	90
8	1	1-10	75	250
	2	10-	34	70
9	1	1-17	100	330
	2	10-	19	40
10	1	0.5-7	300	600
	2	7-	25	70

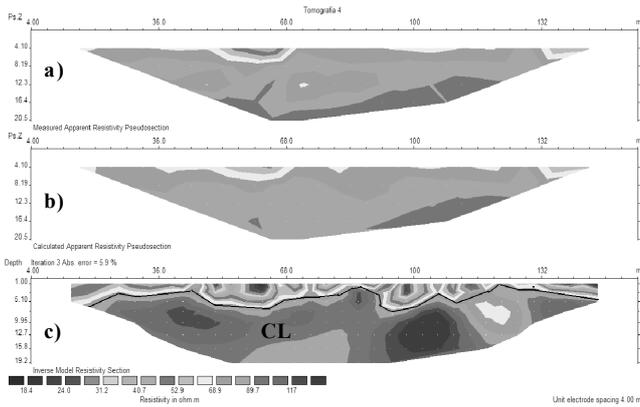


Figura 9. Modelo de inversión para la tomografía 4. (a) resistividad aparente medida, (b) modelo de resistividad aparente calculado y (c) modelo de inversión. La línea negra representa la separación entre zonas de resistividad. La zona de altas resistividades corresponde a la capa geoelectrónica 1 (C1).

La Figura 11 ilustra los modelos de resistividad obtenidos por la inversión de las tomografías eléctricas ubicados en el mapa geológico de la zona de estudio, donde se aprecia la relativa continuidad de una capa de altas resistividades a profundidades muy someras.

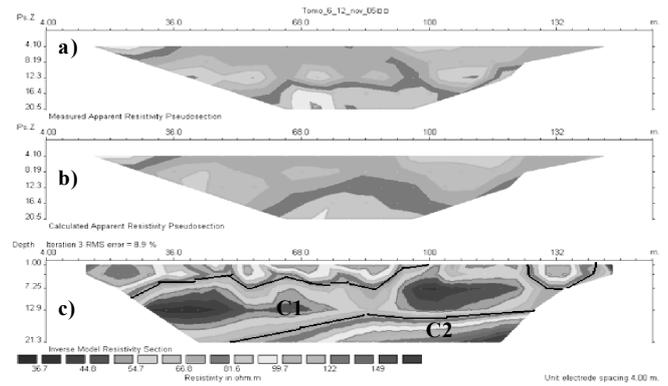


Figura 10. Modelo de inversión para la tomografía 6. (a) resistividad aparente medida, (b) modelo de resistividad aparente calculado y (c) modelo de inversión. La línea negra representa la separación entre zonas de resistividad. C1 corresponde a la capa 1 de bajas resistividades y, C2 a la capa de altas resistividades.

A partir de la línea sísmica procesada se realizó la interpretación en tiempo, la cual permitió constatar el régimen compresivo de la zona y una actividad tectónica moderada, donde el movimiento entre bloques es bajo. Las fallas inversas que buzan hacia el oeste

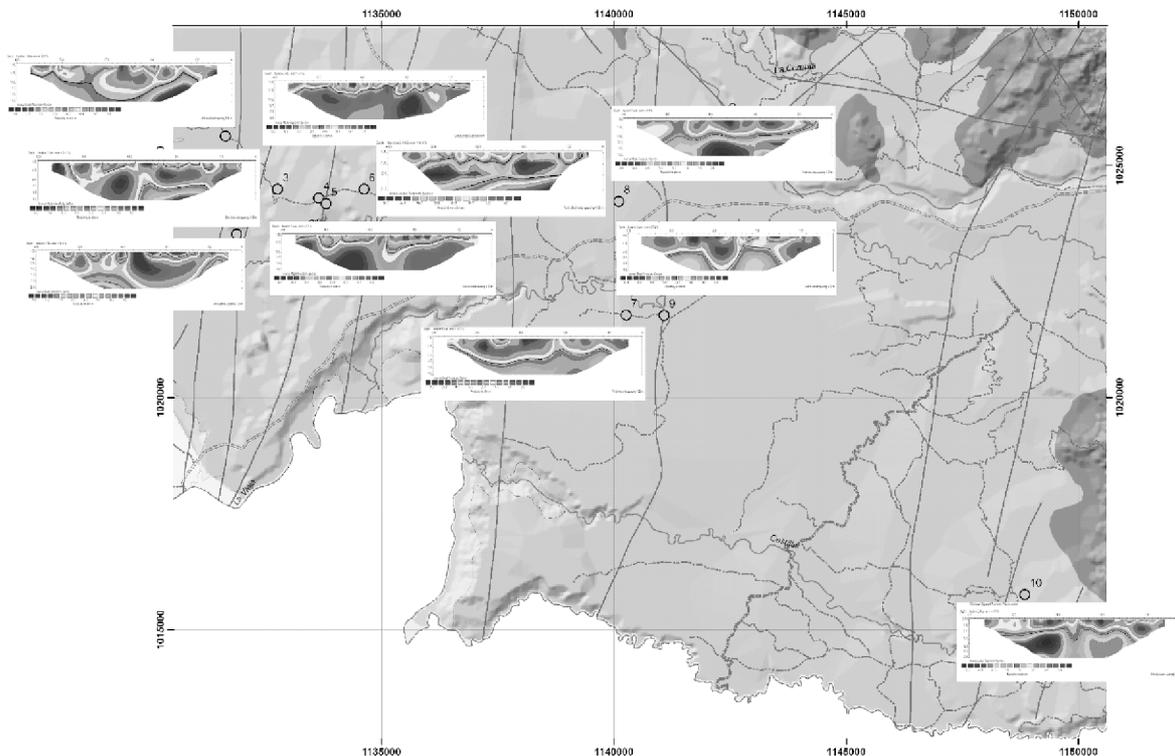


Figura 11. Localización de los modelos de resistividad eléctrica obtenidos a partir del proceso de inversión. En general, se aprecia la continuidad lateral de una capa superficial de altas resistividades que contrasta fuertemente con una capa de bajas resistividades

visualmente afectan hasta 1 segundo las diferentes unidades (figura 12).

Desde el punto de vista estratigráfico se interpretaron cuatro secuencias, donde el horizonte más inferior corresponde a la discordancia al tope del basamento, que por sus características de continuidad y alta amplitud se puede asociar a basaltos estratificados, asociados a los basaltos de la Formación Barroso, seguido está una unidad de bajas amplitudes y reflectores discontinuos considerada una zona muda, asociada a las arcillas de la Formación Cartago. Sobre esta secuencia yace discordantemente una secuencia más espesa y variable en composición, ya que hay alternancia en las amplitudes de los reflectores, donde las más altas se asocian a los estratos de arenas y conglomerados del nivel inferior de la Formación Pereira, y las más bajas a las intercalaciones con arcillas. Sobre esta unidad yace discordantemente una unidad menos potente en espesor, de bajas amplitudes y de edad reciente, que generan estructuras de downlap, chocando sobre el nivel inferior de la Formación Pereira.

A partir de los modelamientos realizados con cada método geofísico, y teniendo en cuenta la geología de la zona de estudio se definieron los parámetros geofísicos para cada unidad geológica (Tabla 4).

Discusión y conclusiones

A partir de la integración de los métodos geofísicos, registros de pozos, información de aljibes, y estudios anteriores, se pueden definir tres niveles de la Formación Pereira, correspondientes de techo a base, a un suelo arcilloso y limoso, con espesores hasta 17m y resistividades altas, una segunda capa compuesta principalmente por ceniza volcánica con espesores promedio de 30 metros, que pueden alcanzar valores de 120m según los modelos magneto-gravimétricos, y una tercera capa compuesta por flujos de escombros, flujos piroclásticos, conglomerados, y arena en matriz arcillo-arenosa, con profundidades variables, de acuerdo a la geología subyacente. En general, los estudios hechos en el área evidencian una gran poten-

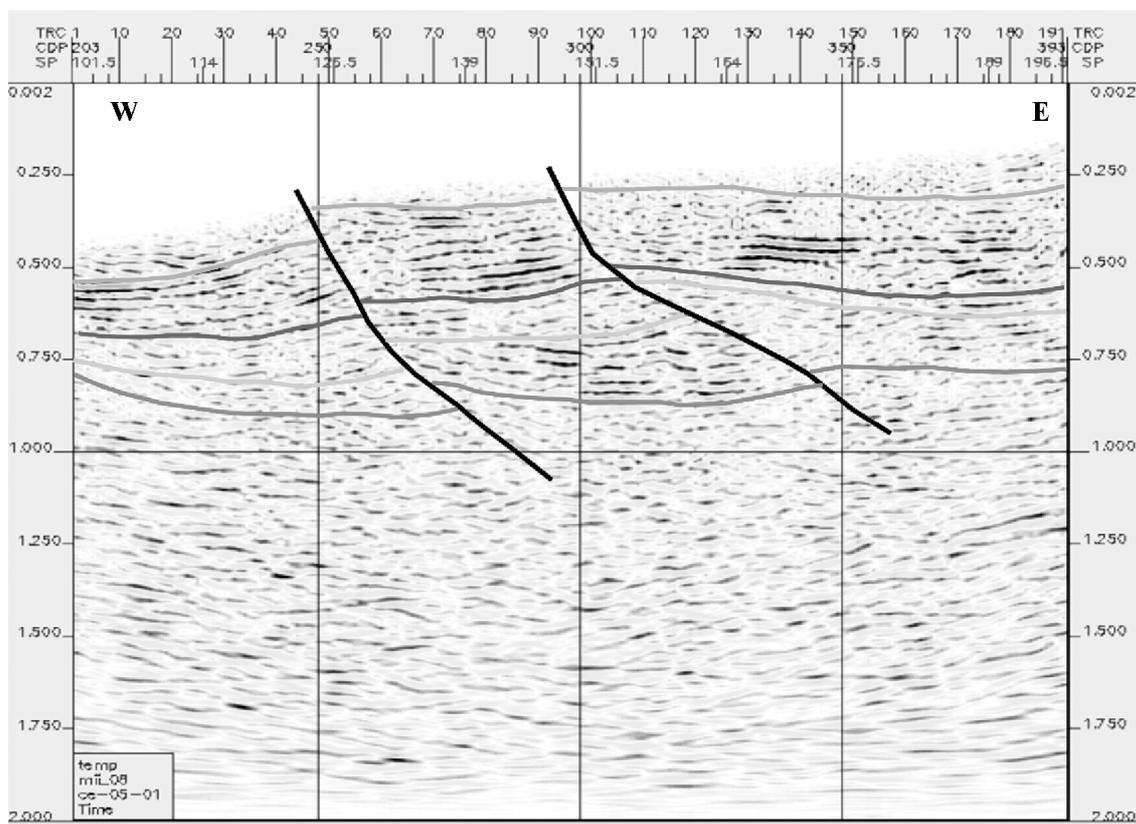


Figura 12. Interpretación geológica de la sección sísmica procesada. Los cuatro horizontes están siendo levemente desplazados por fallas inversas, afectando los espesores de cada unidad interpretada. Cada horizonte representa una unidad o evento geológico diferente, representando disconformidades entre sí.

Tabla 4. Características geofísicas de las unidades geológicas de la zona de estudio.

Unidad geológica	Edad	Tipo de roca	Densidad (gr/cm ³)	Susceptibilidad magnética SI	Velocidad onda P (m/s)	Resistividad eléctrica (ohm-m)
Formación Barroso	Mesozoico	Diabasas, basaltos.	2.76	0.005466 - 0.0056549	5000-5600	>400
Stock Gabríco de Pereira	Mesozoico	Gabro.	2.77-2.8	0.005466 - 0.0075398		
Formación Cartago	Cenozoico	Limolitas intercaladas con arenitas.	2.4 - 2.5	0.000176 - 0.000226	2600	
Formación Pereira (Nivel Inferior)	Cenozoico Plioceno-Pleistoceno	Depósitos de Flujos de escombros, corrientes trenzadas, llanuras de inundación.	2-2.2	0.000163 - 0.000226	1000	11.5 - 694
Formación Pereira (Nivel Superior)	Cenozoico Pleistoceno-Holoceno	Tobas de caída, localmente arcillas tobáceas.	1.8	0.000163 - 0.000226	1000	3 - 300

cia de la Formación Pereira, cuyo espesor está siendo controlado por el afloramiento de la Formación Cartago, y la Formación Barroso. A su vez, la unidad de interés está cubierta por un depósito de cenizas con un espesor promedio de 30m, la cual en sus primeros 10m se encuentra saturada de agua. Esta cobertera de cenizas presenta resistividades entre 60 y 300 ohm-m, lo cual demuestra la variación de la conductividad cerca de la superficie por el contenido de humedad en el subsuelo.

Desde el punto de vista tectónico, la zona de estudio está dominada por un régimen compresivo, con alguna componente en rumbo, la cual ayuda a producir un leve levantamiento de un basamento y un cambio progresivo en el espesor de la Formación Pereira, lo cual puede afectar el sistema de circulación de las aguas subterráneas. Efecto explicado por los significativos cambios entre bajas y altas resistividades entre los sectores occidental y oriental de la zona, validados por la geoeléctrica, las variaciones de las anomalías magnéticas que justifican la dirección general de las fallas, y los registros de pozos.

Cada una de las herramientas geofísicas utilizadas en el área de estudio permitió aclarar desde el punto de vista geológico y tectónico la conformación del acuífero, donde la unidad de interés hidrogeológico presenta un espesor variable, alcanzando los 750 metros. Esta variación está siendo controlada por una cinemática regional asociada a movimientos inversos con alguna componente en rumbo.

A partir de las inversiones realizadas para cada una de las tomografías adquiridas, se apreció claramente dos capas asociadas al miembro superior de la Formación Pereira,

determinadas por un fuerte contraste vertical de resistividades bajas y altas. La capa superior que cuenta con un rango de altas resistividades, y una capa inferior con un intervalo de resistividades bajas.

En el sector de La Camelia donde se realizó la línea sísmica, se estimó la profundidad promedio del basamento terciario en 750m, y se consideró que corresponde a una unidad sedimentaria por tener velocidad promedio de 2600m/s, y bajas amplitudes asociadas a paquetes de arcillas, equivalente a la Formación Cartago (Toc), la cual yace discordantemente sobre los basaltos de la Formación Barroso. Los cuatro horizontes interpretados están siendo desplazados por dos fallas inversas con buzamiento hacia el este, que ayudan a modificar la continuidad lateral del horizonte de interés.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al personal técnico de la CARDER, especialmente a Liliana Otálvaro, Gabriel Arias, y Olimpo García; por el suministro de información. Al Grupo de Geofísica de la Universidad Nacional, por su colaboración en la adquisición geofísica y el procesamiento de las tomografías eléctricas, especialmente al profesor Luis Ochoa, y al estudiante Juan Guillermo Restrepo. Y a Luis Vásquez de Ingeominas, por compartir su conocimiento en campos potenciales.

Bibliografía

- Barrero, D.** 1979. Geology of the Central Western Cordillera, West of Buga and Roldadillo, Colombia. Publ. Geol. Esp., Ingeominas, 4, 75 p.

- BID, Banco Interamericano de Desarrollo. 1997. Estudio Hidrogeológico de la Cuenca Alta del Río Otún.
- Burger, R.** 1992. *Exploration Geophysics of the shallow subsurface*. Prentice Hall.
- Cardona, F. y Ortiz, M.** 1993. Aspectos estratigráficos de las unidades del Plioceno-Holoceno entre Pereira y Cartago. Propuesta para la definición de la Formación Pereira. Tesis de Grado. Universidad de Caldas – CARDER.
- CCEDI ambientales, 1996. Estudio geológico con énfasis en hidrogeología para el aprovechamiento de aguas subterráneas en los corregimientos de Tribunas y La Bella, Municipio de Pereira: CARDER.
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda y Canadá. 1994. Inventario de pozos y aljibes dentro de la cuenca baja del río Risaralda. Memoria técnica interna No 216-30. Bogotá: CARDER.
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda y AGC. 1995. Prospección geofísica en los corregimientos de Tribunas, La Bella y Altagracia, Municipio de Pereira. Bogotá: CARDER.
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda, Prospección geofísica para el agua subterránea al suroeste del municipio de Pereira, corregimiento de Morelia. Bogotá: CARDER, 1997.
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda. Geología y Geomorfología. 2004. Proyecto plan de manejo integrado del agua subterránea de Pereira, Informe técnico por Arias, G. F.
- Dobrin, M., and SAVIT, C.** 1988. *Introduction to geophysical prospecting*, Fourth edition, McGraw-Hill book company.
- GEOEX Ltda. 1996. Estudio hidrogeológico con énfasis en hidrogeología para el aprovechamiento del agua subterránea en los corregimientos de Tribunas y La Bella. Pereira: CARDER.
- González, H. & Núñez, A.** 1991. Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Quindío, escala 1:100.000, Memoria Explicativa, 42 p., INGEOMINAS, Bogotá.
- Graterol, V.** 2000. *Basic principles and applications of the gravity and magnetic exploration methods*.
- Guzmán, J., Franco, G., y Ochoa, M.** 1998. Evaluación Neotectónica. Plan de acción ambiental Pereira Centro Occidente. Proyecto para la mitigación de riesgo sísmico.
- IGAC – Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 1998. Red Gravimétrica Nacional de Colombia, Bogotá,
- INGEOMINAS. 1994. Exploración del recurso hídrico subterráneo en el municipio de La Tebaida, Departamento del Quindío. Bogotá: Ingeominas.
- Iah. Struckmeier, W. F. and Margat, J.** 1995. *Hydrogeological Maps: A Guide and a Standard Legend*. Vol 17. Verlag Heinz Heise. Hannover. 177 p.
- James, M.** 1986. Estudio sismotectónico en el área del Viejo Caldas. Ingeominas, Medellín, p. 80-90.
- Jiménez, J.D. y Olarte, J.** Caracterización hidrogeológica preliminar del Abanico Pereira-Armenia a escala 1:200.000, 2004. Trabajo de grado (Geólogo). Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Geología.
- Lalinde C. P. y Toro, G. E.** 2003. Estudio de Neotectónica en Algunos de los Segmentos de Falla que Afectan el Abanico Pereira – Armenia, Colombia. Universidad EAFIT, Maestría en Ciencias de la Tierra.
- MAGPICK, 2004. *Magnetic map and profile processing, user guide*.
- MC Court, W. J.** 1984. *The geology of the Central Cordillera*, Departments of Valle del Cauca, Quindío and NW Tolima. Ingeominas –Misión Británica (British Geological Survey). Report 8. Cali.
- Mejía, H.** 1996. Estudio Geológico con énfasis en hidrogeología para el aprovechamiento de agua subterránea en los corregimientos de Morelia y La Palmilla. Pereira: CARDER, CEDI Ambientales.
- Mosquera, D.** 1978. Geología del Cuadrángulo K-8 (preliminar), Ingeominas, Medellín.
- Nettleton, L.L.** 1971. *Elementary gravity and magnetics for geologists and seismologists*. Number 1. Monograph series. Society of exploration geophysicists.
- Ospina, G.** 2002. Proyecto de protección integral de aguas subterráneas en Pereira. CARDER. Pereira.
- Otálvaro, D.L., Arias, G.F., Vélez M.E., García, P.** 2005. Modelo hidrogeológico conceptual preliminar acuífero de Pereira. Plan de manejo integral del agua subterránea. Subdirección de Gestión Ambiental Territorial, CARDER, Pereira, Risaralda.
- Orellana, E.** 1982. Prospección Geoelectrica por campos variables. Paraninfo.
- Samper, J. M. y Zuluaga, G. L.** Estudio hidrogeológico preliminar al N-W de Pereira (Risaralda), 1996. Trabajo de grado (Geólogo). Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Geología.
- Talwani, M., and Heirtzler, J. R.** 1964. Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional bodies of arbitrary shape, in Parks, G. A., Ed., *Computers in the mineral industries*, Part 1: Stanford Univ. Publ., Geological Sciences, 9, 464-480.
- Talwani, M., Worzel, J. L., and Landisman, M.** 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone: *J. Geophys. Res.*, 64, 49-59.
- Udías A. y Mezcua, J.** 1986. *Fundamentos de Geofísica*. Universidad de Alhambra. Páginas: 234, 237, 255, 298, 304, 307, 308, 310. Párrafo 1. Páginas. 298 Párrafo 2. Páginas: 298, 255, 237 Párrafo 3. Páginas. 255 Párrafo 4. Páginas. 234 Párrafo 5. Páginas. 304, 310 Párrafo 6. Páginas. 307, 308.
- Unión Temporal DUNIA-ATG. 2005. Complementación geológica, geoquímica y geofísica (magnetométrica) de las planchas 166, 167, 186, y 187.
- Valdés M, y Durán, J. P.** 2004. Reproceso de información gravimétrica en 170 puntos del estudio geofísico 'Proyecto de Mitigación del Riesgo Sísmico de Pereira'. CARDER.

Recibido: 22 de noviembre de 2007

Aceptado para su publicación: 7 de julio de 2008