

Modelación geológico-geofísica con fines hidrogeológicos en los municipios Corrales y Gámeza, Colombia

Geological-geophysical modeling with hydrogeological purposes in Corrales and Gámeza municipalities, Colombia

Fredy A. Fonseca-Benítez

Sede Sogamoso. Grupo de Investigación INGEOFÍSICA Universidad Pedagógica y Tecnológica, Colombia. frefonseca@yahoo.com

Resumen

El propósito del estudio fue evaluar, en las litologías de formaciones geológicas de Boyacá y Casanare, el comportamiento de propiedades físicas como resistividad aparente y la intensidad gamma natural, con fines de localización de zonas favorables para la extracción de agua. A partir de la interpretación de los datos aportados por los métodos de perfilaje eléctrico, sondeo eléctrico vertical y radiometría se elaboraron cortes geológico-geofísicos que revelaron para ambos sectores condiciones favorables para la extracción de aguas subterráneas, ya que los valores más bajos de resistividades se asocian a las areniscas saturadas. Se recomienda verificar estos resultados mediante perforaciones y la toma de registros eléctricos.

Palabras clave: modelación geofísica; sondeo eléctrico vertical; perfilaje eléctrico dimétrico; intensidad gamma natural; aguas subterráneas; Colombia.

Abstract

The purpose of the study was to evaluate in the lithologies of geological formations of Boyacá and Casanare, the behavior of physical properties such as apparent resistivity and natural gamma intensity, in order to locate favorable zones for water extraction. From the interpretation of the data provided by the methods of Electric Profiling, Vertical Electrical Probe and Radiometry geological-geophysical sections were developed that revealed for both sectors favorable conditions for the extraction of groundwater, since the lowest values of resistivities were they associate with saturated

sandstones. It is recommended to verify these results by drilling and taking electrical records.

Keywords: geophysical modeling; Vertical Electric Probe; Symmetrical Electric Profiling; natural gamma intensity; groundwater; Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos geofísicos han cobrado gran aplicación en Colombia para resolver problemas relacionados con la prospección y exploración de yacimientos minerales y materiales de construcción, estudios de deslizamientos, así como la búsqueda de objetos arqueológicos. El incremento de su aplicación ha sido notable en la búsqueda de aguas subterráneas, debido a la gran escasez de este recurso en diferentes regiones del país. En tal sentido, el altiplano boyacense se encuentra entre las zonas prioritarias para el Programa de Exploración de Aguas Subterráneas del Instituto Colombiano de Geología y Minería.

En el año 2007 se realizó un proyecto hidrogeológico con investigación geofísica (INGEOMINAS–UPTC) como resultado del cual se establecieron modelos hidrogeológicos de la zona centro y norte en Boyacá, no obstante, la información geofísica fue escasa y estuvo basada en la realización de puntos de sondeo eléctrico vertical (SEV), con el fin de obtener cortes geológicos-geofísicos (Fonseca 2009).

El proyecto “Caracterización geológica-geoeléctrica de litologías presentes en sectores de la zona centro del departamento de Boyacá” se llevó a cabo en el año 2015, cuando se levantaron nuevos puntos de SEV y se realizaron líneas de perfilaje eléctrico simétrico (PES). De este modo se ubicaron las zonas más relevantes para estudios detallados con los métodos geofísicos (Fonseca 2015). El presente trabajo contiene los resultados de investigaciones realizadas desde 2015-2016, en varios proyectos llevados a cabo por el grupo de investigación INGEOFÍSICA en convenios de colaboración con diferentes empresas y entidades.

Debido a que el departamento de Boyacá presenta gran variedad de tipos litológicos en diferentes formaciones geológicas se planteó el presente estudio detallado, con el fin de estudiar las litologías y evaluar en ellas el comportamiento de propiedades físicas como resistividad aparente (ρ_a) y la intensidad gamma natural (I_γ). Se aplicaron los métodos geofísicos de sondeo eléctrico vertical (SEV), perfilaje eléctrico, (PE) y radiometría (I_γ), adelantando de esta forma estudios que permitan crear una base de datos para la realización de proyectos futuros.

Se escogieron los sectores Gámeza y Corrales, que ocupan una extensión de 3,6 km² (Figura 1). Su principal vía de acceso es desde la ciudad de Duitama, que comunica con la capital del departamento (Tunja).

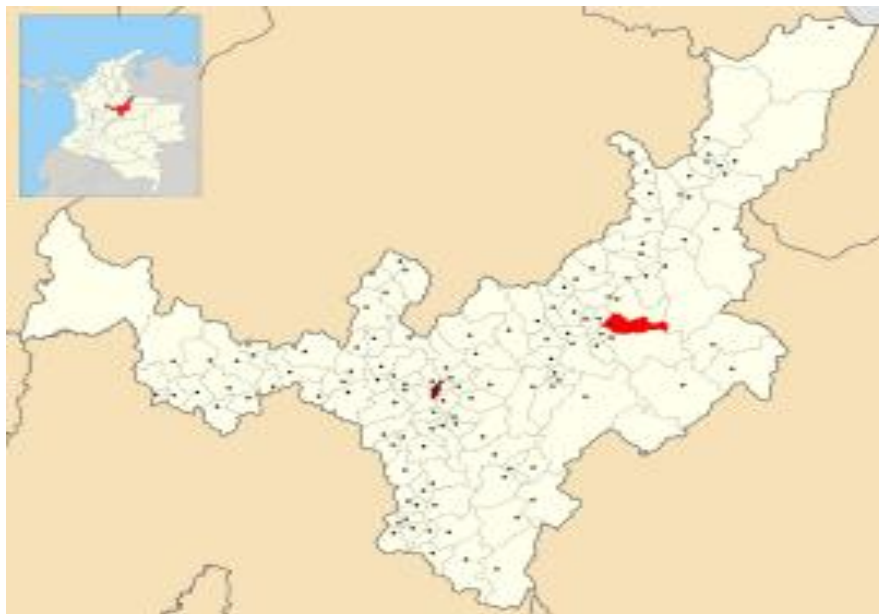


Figura 1. Ubicación de los sectores de estudio, destacados en color rojo.

El municipio Corrales está ubicado en la provincia de Tundama, del departamento de Boyacá. El territorio del municipio se halla sobre el altiplano Cundiboyacence. Por su parte, Gámeza se ubica en la provincia de Sugamuxi, en el departamento de Boyacá. Está situado a unos 18 km de la ciudad de Sogamoso. El municipio tiene una superficie de 88 km², limita por el norte con los municipios de Tasco y Corrales, con Socotá por el este, por el oeste con Tópaga y Corrales y por el sur con Tópaga y Mongua. Por su extremo occidental contacta con el río Chicamocha, con su tributario, el río Gámeza, el cual recorre el límite sur del territorio. Cuenta con dos quebradas importantes: el Turmal y el Centro, y varias lagunas en la región de Páramo: la Negra, Larga, el Casadero, Tirones, Patos y la Verde.

1.1. Marco geológico

En general, en las zonas de estudio se encuentran rocas del Cretácico, Paleógeno y Cuaternario, representadas por las siguientes unidades estratigráficas formales fundamentales: formación Labor y Tierna (Ksit), formación Guaduas (Kpg), formación areniscas de Socha (Pgars), formación arcillas de Socha (Pgas), formación Picacho (Pgp), formación Concentración (Pgc), depósito cuaternario (Q), de origen aluvial y coluvial (Figura 2).



Figura 2. Vista panorámica geológica del área de estudio. Corrales (izq.) y Gámeza (der.)

En el municipio de Corrales se distingue la formación Concentración (Pgc), la cual presenta arcillolitas y limonitas intercaladas con areniscas. En la parte posterior se divide la formación Picacho (Pgp), la cual en su mayoría consta de areniscas de manera predominante, aunque a veces presenta intercalaciones con arcillolitas.

De igual forma, se observa un depósito cuaternario reciente, el cual es disectado por el río Chicamocha. El depósito cuaternario es de origen aluvial y está compuesto por bloques que van de redondeados a semirredondeados, embebidos en una matriz areno-arcillosa (Figura 3). Se encuentra discordantemente sobre la formación Concentración.



Figura 3. Detalle del depósito cuaternario aluvial.

La formación Areniscas de Socha (Figura 4) suprayace en contacto normal a la formación Guaduas e infrayace a la formación Arcillas de Socha (Pgas) en forma concordante.



Figura 4. Formación Areniscas de Socha, cerro Peña Las Águilas, vía Gámeza.

Tectónicamente, los plegamientos más importantes son el anticlinal de Motua, anticlinal El Bujio, sinclinal de San Antonio. Por otro lado, la falla de Soapaga, de cabalgamiento, es el control estructural regional presente. Las fallas inversas presentes en el área de estudio son Tópaga, Busbanzá, de Costa Rica, El Bujio, y la de Gámeza. La falla direccional que sobresale en el área de estudio es Culatas.

La dirección de las estructuras es predominantemente NE (fallas inversas y estratos). Por su parte, las fallas de rumbo son de dirección aproximadamente perpendicular a la de las fallas inversas (Figura 5).

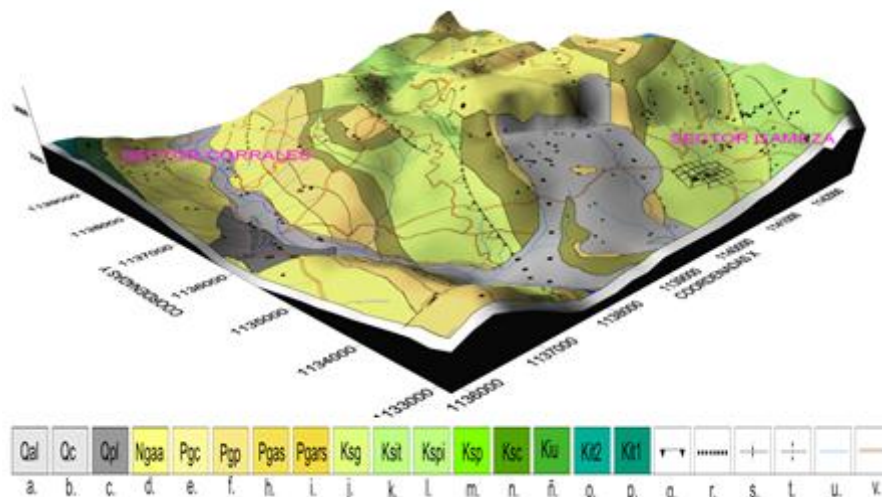


Figura 5. Modelo Digital de Elevación con cartografía geológica Local. Ubicación de las áreas de interés y exploración geofísica de detalle. (a. Cuaternario aluvial. b. Cuaternario Coluvial. c. Cuaternario Fluvio - lacustre. d. Aluvial antiguo. e. Formación Concentración. f. Formación Picacho. g. Formación Arcillas de Socha. h. Formación Guaduas. i. Formación Areniscas de Socha j. Formación Guaduas. k. Formación Labor y Tierna. l. Formación Los Pinos. m. Formación Plaeners. n.

Formación Chipaque. o. y p. Formación Tibasosa. q. Falla de Cabalgamiento. r. Estructura cubierta. s. Sinclinal. t. Anticlinal. u. Ríos y quebradas. v. Carreteras.)

2. METODOLOGÍA

Se realizó un levantamiento geoelectrico utilizando los métodos de sondeo eléctrico vertical (SEV), perfilaje eléctrico simétrico (PES) y perfilaje radiométrico gamma ($I\gamma$). Posteriormente, se realizó el procesamiento, representación e interpretación de datos de SEV, PE y radiometría $I\gamma$ para la final elaboración de cortes geológicos-geofísicos.

2.1. Sondeo eléctrico vertical

Se realizaron mediciones repetidas, en un punto central de observación, de la diferencia de potencial (ΔU) y la intensidad de corriente (I), para una sola posición de los electrodos de medición, variando la distancia entre los electrodos de alimentación (Danko y Azze 1972).

Los fundamentos físico-geológicos del SEV se basan en el estudio de la respuesta del medio geológico al paso de la corriente, a través de dos electrodos de alimentación (A y B), que mantienen un circuito cerrado (Figura 6). Esta respuesta es determinable utilizando dos electrodos de medición (M y N), (Dobrin 1961).



Figura 6. Esquema de ubicación del dispositivo de electrodos de SEV (Fonseca 2009).

Los SEV se localizaron con la ayuda de un GPS (*Global Positioning System*). El equipamiento estuvo compuesto por un resistivímetro y un energizador marca DIAPIR VP. Los datos de campo obtenidos sirvieron para calcular los valores de resistividades aparentes e interpretar las curvas de campo mediante el programa de RESIS XP. La interpretación de las curvas de SEV y sus respectivos cortes geoelectricos permitieron confeccionar los cortes geológicos-geofísicos. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de las curvas y cortes geoelectricos elaborados para cada sector de estudio.

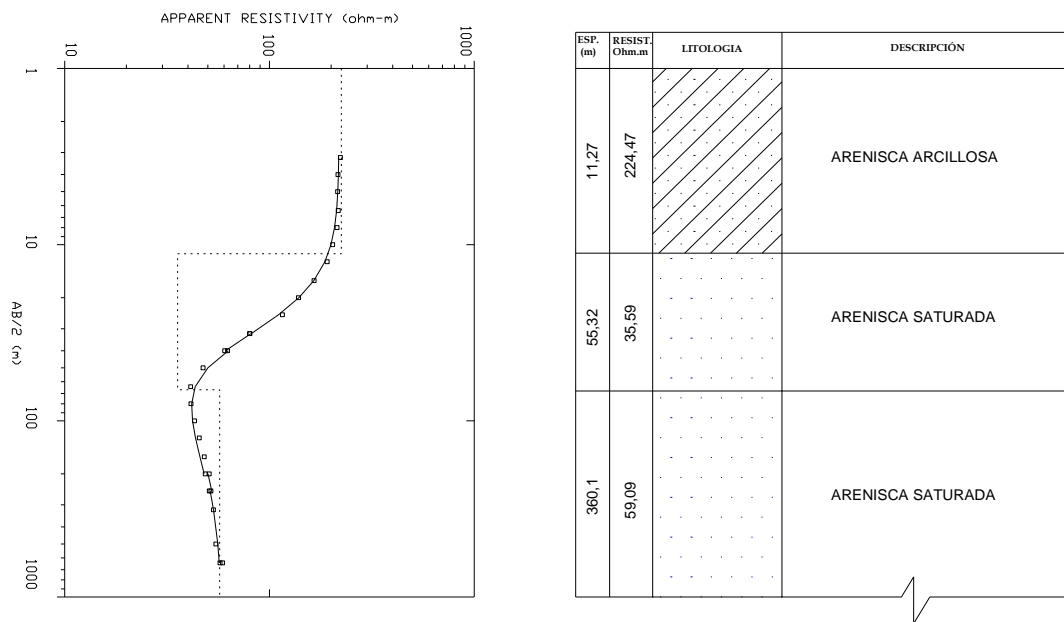


Figura 7. Curva de SEV y corte geoelectrico.

2.2. Perfilaje eléctrico simétrico

Este método de investigación horizontal permitió estudiar la distribución lateral de las resistividades y determinar los contactos verticales e inclinados. El equipamiento empleado estuvo compuesto por un energizador, un resistivímetro y demás accesorios que hacen parte del equipamiento.

La metodología de los trabajos consistió en la observación, en varios puntos, de los valores de diferencia de potencial y de la intensidad de corriente, mediante un dispositivo que mantiene fija la posición de los electrodos de alimentación y de los electrodos de medición (Figura 8), a diferencia del método de SEV (Orellana 1972).



Figura 8. Esquema de ubicación del dispositivo de electrodos de perfilaje eléctrico simétrico.

2.3. Radiometría gamma natural

Con este método de investigación horizontal se midió la radiación gamma natural (Sinitsin 1994) a lo largo de perfiles, para conocer la distribución lateral de las intensidades radioactivas gamma. Este es un método de gran utilidad en la determinación de contactos y fallas. El equipamiento utilizado estuvo compuesto por un radiómetro SRP 68-02.

Los trabajos de campo se realizaron observando en varios puntos los valores de la intensidad radioactiva gamma. Estos puntos fueron escogidos con base en la dirección de las estructuras y la información geofísica ya obtenida. En la Figura 9 se observa la distribución de los puntos de un perfil con el paso o distancia entre puntos (ΔX).

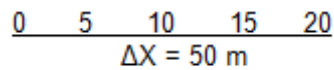


Figura 9. Paso de medición método de radiometría.

En cada sector de estudio se escogieron tres perfiles para realizar perfilaje eléctrico y radiometría. Los sondeos eléctricos verticales se distribuyeron aleatoriamente en ambas áreas (Figura 10). Los puntos de observación de SEV fueron 30 en total; de ellos 11 puntos en el sector Gámeza y 19 en Corrales. El AB máximo fue de 1 280 m. Los MN empleados fueron de 2 m, 20 m y 100 m. Se realizó un total de 31 puntos de perfilaje en el sector Gámeza y 54 en Corrales, con una distancia entre puntos de 100 m, AB máximo 50 m y MN 10 m. Se realizó un total de 60 puntos de radiometría en el sector Gámeza y 107 puntos en Corrales, a una distancia entre puntos de 50 m.

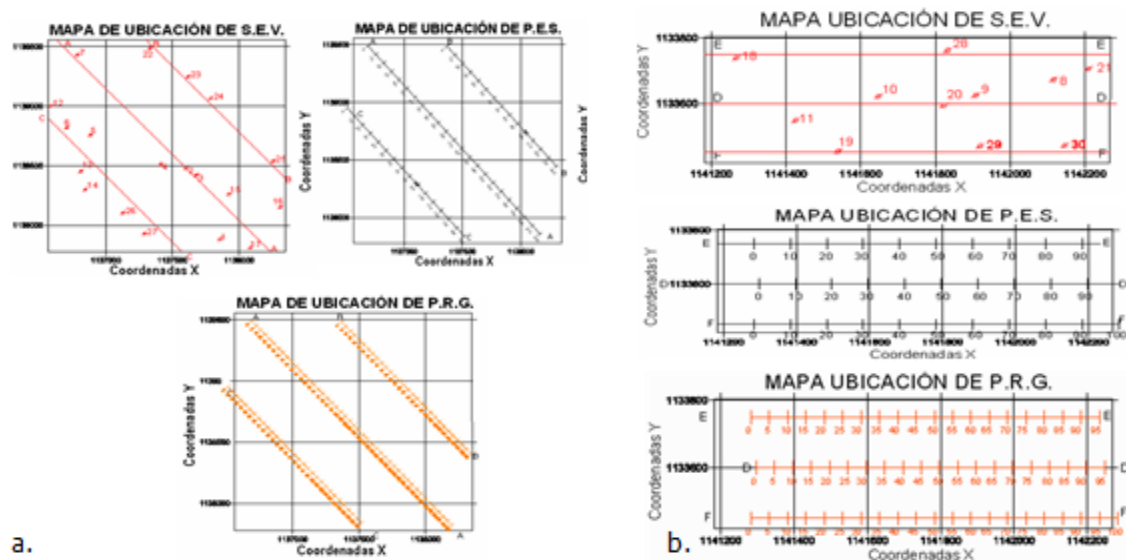


Figura 10. Mapas de ubicación de los puntos de medición geofísica. a. Sector Corrales. b. Sector Gámeza.

3. RESULTADOS

Los rangos de variación de la resistividad aparente y la intensidad radioactiva gamma I_γ para cada una de las litologías se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Rango de variación de los parámetros físicos en los sectores de estudio

Resistividad (Ohmios-m)		Correlación Litológica	
9-10		Areniscas Saturadas	
70-120		Arcillolitas	
120-300		Areniscas Arcillosas	
Sector	Formación	Correlación Litológica	IY(μr/h)
Corrales	Cuaternario Aluv. (Qal)	Areniscas Saturadas	12-15
		Arcillolitas	6-9
	Concentración (Pgc)	Arcillolitas	9-12
		Areniscas Saturadas	>15
		Picacho (Pgp)	Areniscas Arcillosas
Arcillas de Socha (Pgas)	Arcillolitas	9-12	
Gámeza	Guadas (Ksg)	Areniscas Saturadas	12-15
		Labor y Tierna (Ksit)	Areniscas Saturadas
			Arcillolitas

3.1. Mapas geológicos

Sector Corrales

Mediante la interpretación geológico-geofísica de los datos recolectados en campo se determinó la posible ubicación del contacto entre las formaciones Picacho (Pgp) y Concentración (Pgc), ubicado entre los SEV 1 y 15, 25 y 24 entre las estacas 170 y 180, 120 y 130 para PES y entre las estacas 175 y 180, 125 y 130 para radiometría; y el contacto entre Arcillas de Socha (Pgas) y Picacho (Pgp), ubicado entre los SEV 1 y 16 entre las estacas 190 y 210 para PES y entre las estacas 195 y 205 para intensidad radioactiva gamma I γ (μ R/h).

Se determinó el posible contacto entre la formación Concentración (Pgc) y el depósito Cuaternario Aluvial (Qal), ubicado entre los SEV'S 2 y 3, 23 y 24, 26 y 27 entre las estacas 130 y 140, 50 y 60, 110 y 120 para PES y

entre las estacas 135 y 140, 55 y 60, 110 y 105 para intensidad radioactiva gamma I γ (μ R/h).

Se pudo establecer la ubicación de una posible falla local (ubicada entre los SEV 5 y 7, 6 y 5 entre las estacas 50 y 70, 20 y 30 para PES y entre las estacas 55 y 65, 25 y 30 para intensidad radioactiva gamma I γ (μ R/h); y la falla de Buzbanzá ubicada entre los SEV'S 3 y 15, 24 y 25 entre las estacas 150 y 160, 100 y 110 para PES y entre las estacas 155 y 160, 100 y 105 para intensidad radioactiva gamma I γ (μ R/h), como se muestra en la Figura 11.

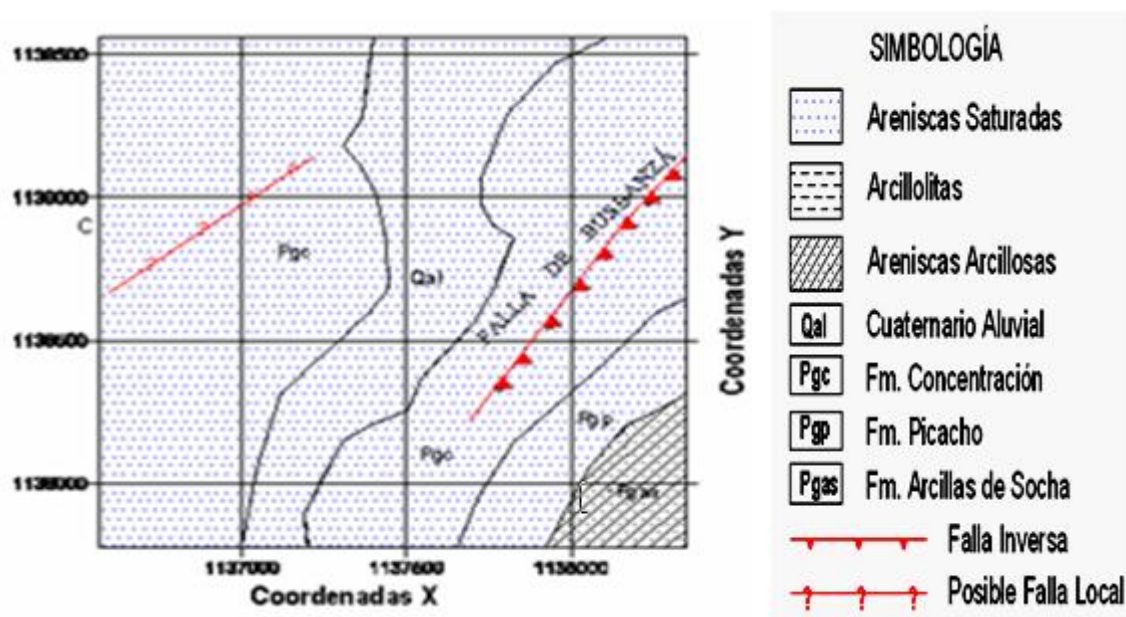


Figura 11. Mapa geológico del sector Corrales hasta los 50 m de profundidad, según SEV.

Las litologías presentes a los 50 m de profundidad corresponden a areniscas saturadas en las formaciones Concentración (Pgc), Picacho (Pgp) y en el Cuaternario Aluvial (Qal), arcillolitas en las formaciones Concentración (Pgc) y Arcillas de Socha (Pgas), y areniscas arcillosas presentes en la formación Arcillas de Socha (Pgas), las cuales presentan valores de intensidad gamma natural y de resistividad que varían de acuerdo a lo que se muestra en la Tabla 1.

Sector Gámeza

Basados en la interpretación geológico-geofísica de los datos obtenidos en campo se logró determinar el posible contacto entre las formaciones Guaduas (Kpg) y Labor y Tierna (Ksit), (ubicado entre los SEV 8 y 9, 28 y 8, 19 y 29 entre las estacas 70 y 80, 60 y 70, 30 y 40 para PES y entre

las estacas 75 y 80, 60 y 65, 35 y 40 para intensidad radioactiva gamma I_γ ($\mu\text{R/h}$), delimitado por la existencia de Falla de Tópaga.

Se pudo establecer la existencia de una falla muy localizada, ubicada entre los sondeos 9 y 8, entre las estacas 70 y 80 para PES y entre las estacas 70 y 75 para intensidad radioactiva gamma I_γ ($\mu\text{R/h}$), tal como indica la Figura 12.

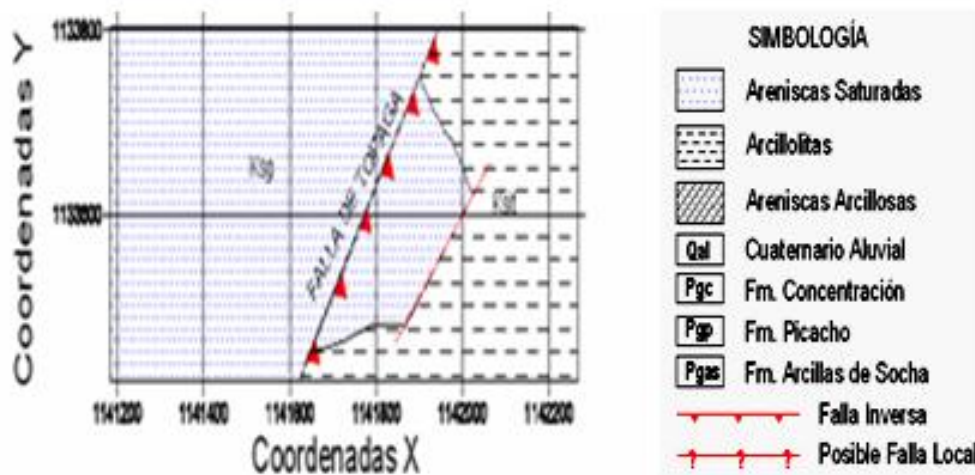


Figura 12. Mapa geológico del sector Gámeza hasta los 50 m de profundidad, según SEV.

Las litologías existentes en superficie corresponden a areniscas saturadas en la formación Guaduas y arcillolitas en la formación Labor y Tierna, las cuales presentan valores de intensidad gamma natural y resistividad que fluctúan de acuerdo con lo reflejado en la Tabla 1.

3.2. Modelación geofísica

Sector Corrales

En el mapa en alto relieve y en el modelo 4D (Figura 13) se distinguen cinco zonas homogéneas en cuanto a intensidad gamma natural: la primera comprendida entre los 3 y 6 $\mu\text{R/h}$, la segunda entre 6 y 9, la tercera entre 9 y 12, la cuarta entre 12 y 15 y la quinta zona con una intensidad gamma natural mayor a 15 $\mu\text{R/h}$.

Por otro lado, las zonas con alto gradiente señalan el trazado de las fallas. Los rangos observados, al correlacionarse con la Tabla 1, permiten relacionar un valor de intensidad gamma natural y una unidad litológica.

En el modelo 4D y en el mapa en alto relieve se pueden diferenciar tres zonas homogéneas en relación con la resistividad aparente: la primera comprendida entre los 0 y 70 $\Omega\cdot\text{m}$, la segunda entre 70 y 120 y la tercera

mayor a $120 \Omega \cdot m$. De igual manera, las zonas con alto gradiente indican la alineación de las fallas. Los rangos observados, al ser correlacionados con la Tabla 1, permiten asociar los valores de intensidad gamma natural a una unidad litológica.

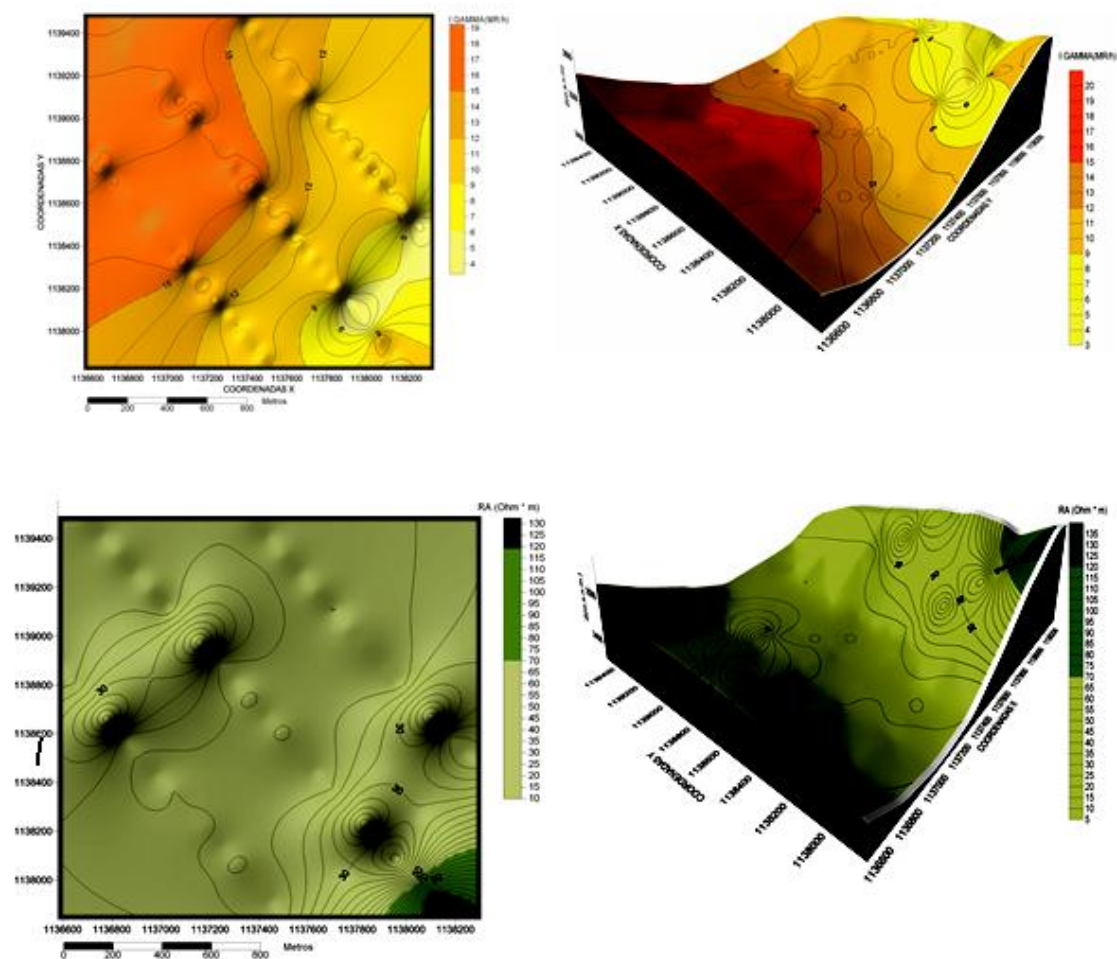


Figura 13. Modelación geofísica sector Corrales. Resistividad (arriba) e intensidad gamma natural (abajo).

Sector Gámeza

En los resultados 3D y 4D obtenidos (Figura 14) se pueden diferenciar tres zonas homogéneas en cuanto a intensidad gamma natural: la primera comprendida entre 6 y $9 \mu R/h$, la segunda entre 9 y 12 y la tercera entre 12 y $15 \mu R/h$. De la misma manera, zonas con alto gradiente indican el trazado de las fallas. Los rangos observados deben ser relacionados con la Tabla 1, con el fin de convertir los valores de intensidad gamma natural en unidades litológicas homogéneas y diferenciables entre sí.

En el modelo 4D y en el mapa en alto relieve se pueden distinguir dos zonas homogéneas en relación con la resistividad aparente: la primera

comprendida entre los 0 y 70, $\Omega \cdot m$ y la segunda entre 70 y 120 $\Omega \cdot m$. De igual forma las zonas con alto gradiente indican la alineación de las fallas. Los rangos observados en los resultados, al relacionarse con la Tabla 1, permiten la conversión de los valores de intensidad gamma natural en unidades litológicas.

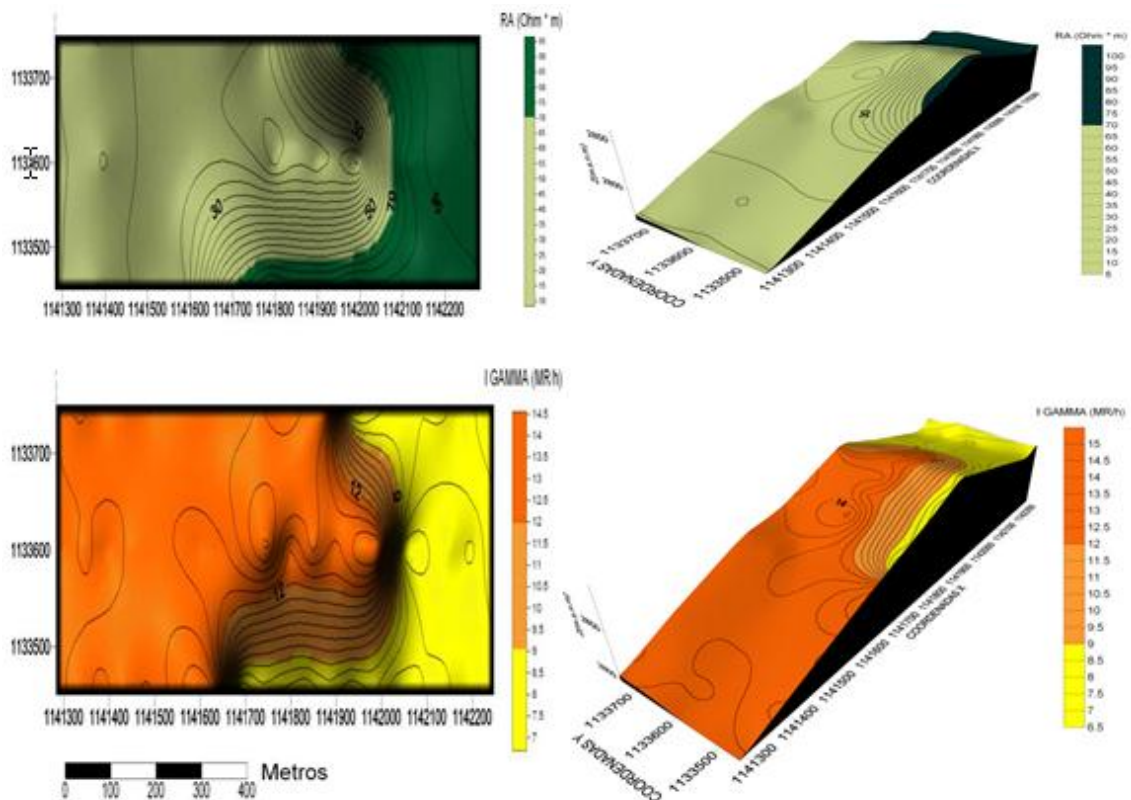


Figura 14. Modelación geofísica de sector Gámeza. Resistividad (arriba) e intensidad gamma natural (abajo).

3.3. Cortes geológico-geofísicos

Sector Corrales (A – A´)

A partir de los gráficos de resistividad aparente e intensidad gamma natural se ubicaron los posibles contactos litológicos y las fallas a través de grandes cambios en el parámetro físico medido. La pseudosección de resistividad aparente muestra las zonas con menor resistividad que corresponden a zonas con mayor saturación (Figura 15). En el corte geológico-geofísico se observa el predominio de areniscas saturadas.

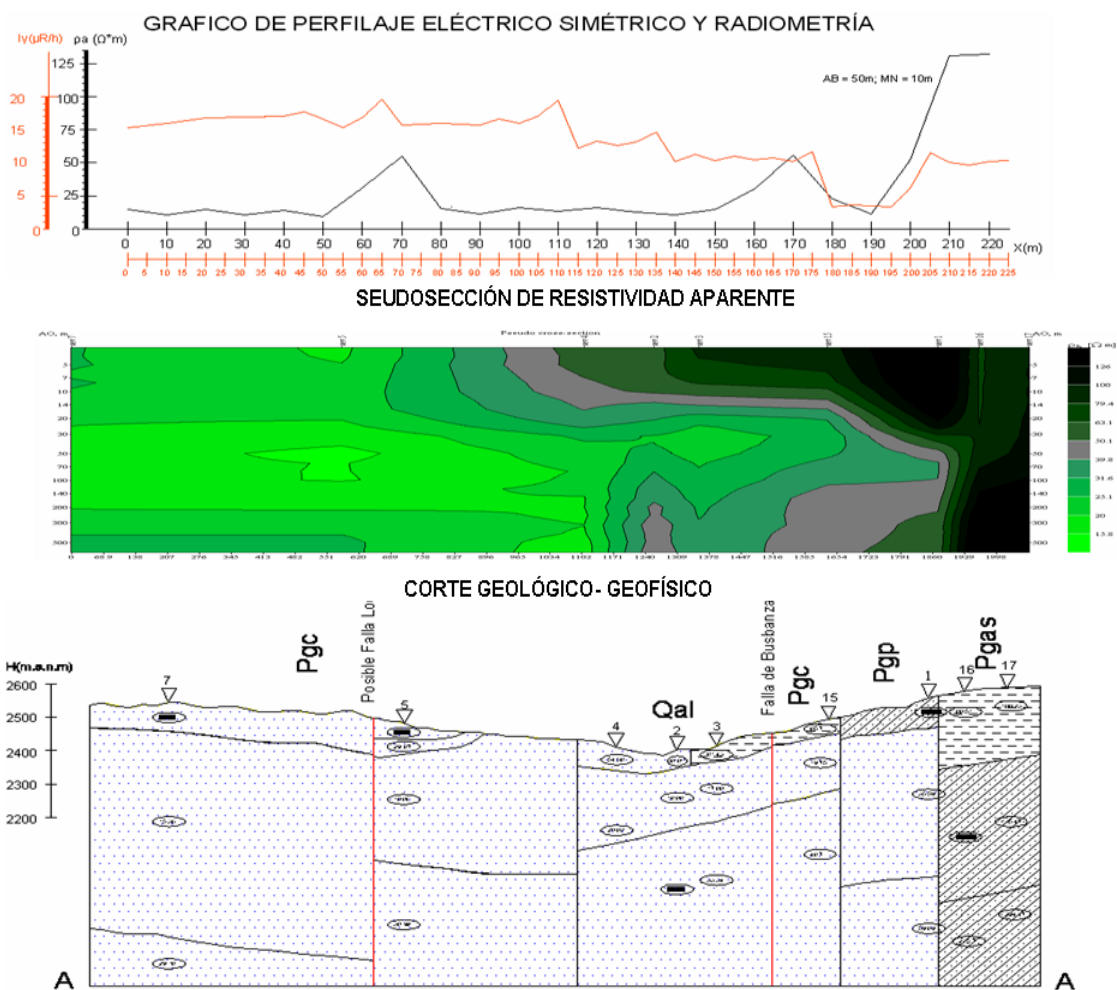


Figura 15. De arriba hacia abajo, gráfico de perfilaje eléctrico y radiometría. Pseudosección de resistividad aparente y corte geológico-geofísico A-A'. Sector Corrales.

Sector Gámeza (F-F')

La resistividad aparente y la intensidad gamma natural permitieron delimitar los posibles contactos litológicos y las fallas. La pseudosección de resistividad aparente revela las zonas con menor resistividad, las cuales corresponden a zonas de areniscas con mayor saturación (Figura 16). El corte geológico-geofísico, al igual que en el sector anterior, muestra predominio de areniscas saturadas.

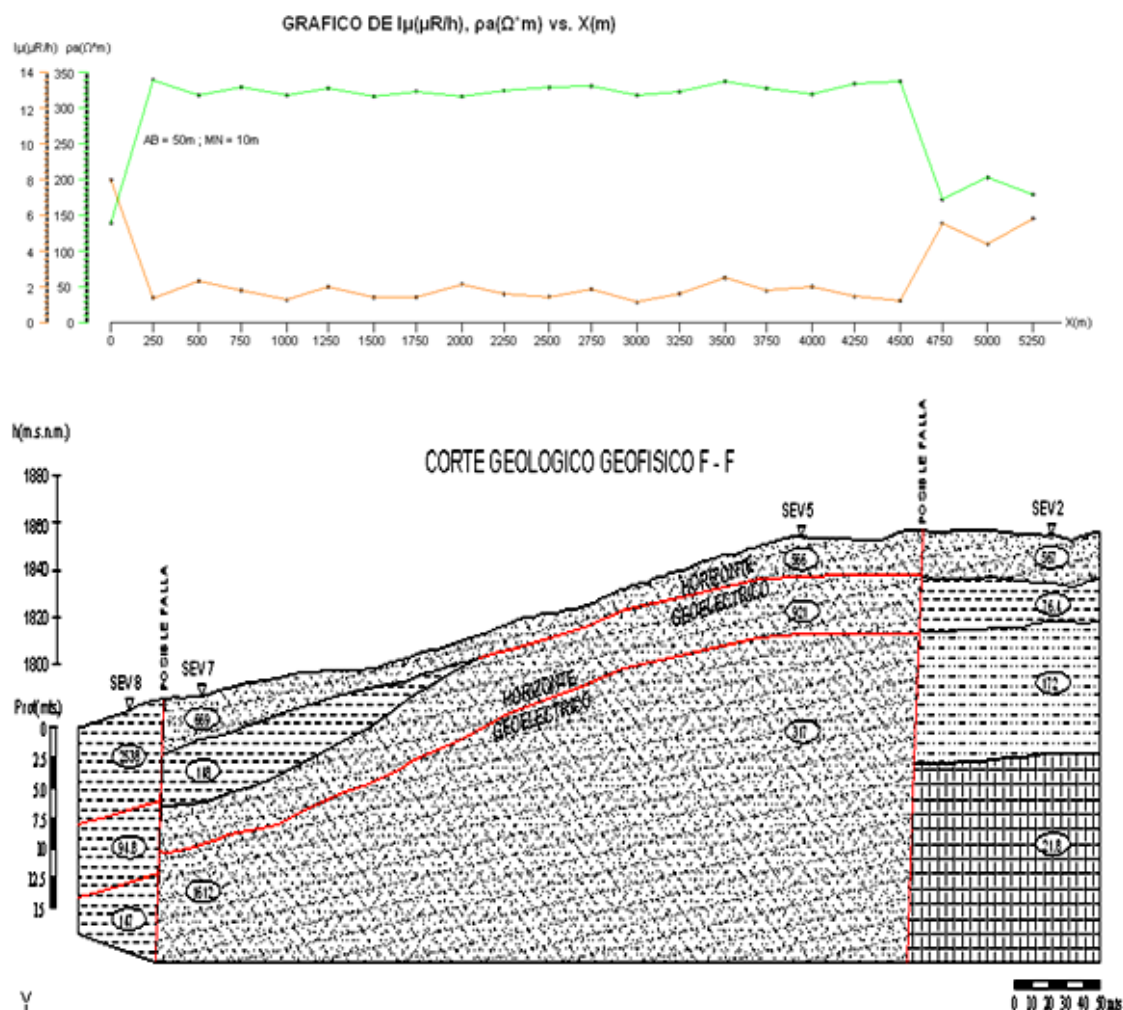


Figura 16. De arriba hacia abajo, perfilaje eléctrico, radiometría y corte geológico-geofísico F-F'. Sector Gámeza.

La aplicación del método de SEV permitió conocer la geología del subsuelo hasta una profundidad de 426 m; la aplicación combinada del perfilaje eléctrico con el método de radiometría facilitó la ubicación con mayor precisión de zonas de fallas y contactos geológicos.

La combinación del método de SEV con los métodos de perfilaje eléctrico y de radiometría hizo posible la elaboración de cortes geológico-geofísicos más precisos de una región de estudio, ya que la información obtenida con un método se enriquece con la del otro; es decir, el perfilaje eléctrico y la radiometría determinan los contactos verticales, mientras que el SEV delimita los espesores de las capas; la combinación de esta información conduce a generar un corte más completo y fiel a la realidad geológica. Se recomienda la realización de perforaciones y la toma de registros eléctricos con el fin de verificar la información geológica y geofísica obtenida.

4. CONCLUSIONES

- La combinación de los métodos geofísicos de sondeo eléctrico vertical con los métodos de perfilaje eléctrico y de radiometría facilita la elaboración de cortes geológico-geofísicos más ajustados a la realidad geológica del subsuelo.
- Debido a que los valores más bajos de resistividades se asocian a las areniscas saturadas es posible concluir que ambos sectores presentan condiciones favorables para la extracción de aguas subterráneas.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al grupo de investigación INGEOFÍSICA por su cooperación y a la empresa *Geophysical Exploration* por los aportes técnicos y operacionales durante el desarrollo de la investigación.

6. REFERENCIAS

- DANKO, I. M. B. Y AZZE, A. *Geoelectricidad I*. La Habana: Escuela de Ingeniería Geofísica, 1972.
- DOBRIN, M. B. *Introducción a la prospección geofísica*. Barcelona: Ediciones Omega, 1961.
- FONSECA, F. Modelación geológico-geofísica y análisis geoestadístico de datos en sectores de Boyacá, Colombia. *Geología Colombiana*, 37(1): 27, 2012.
- FONSECA, F. Modelación 3D y análisis geoestadístico de datos geofísicos a partir de la implementación de los softwares Oasis Montaj y Surfer 8.0, de los sectores Gámeza y Corrales, Boyacá, Colombia. Informe de Proyecto. INGEOFÍSICA. 2009.
- FONSECA, F. Caracterización geológica-geoeléctrica de litologías presentes en sectores de la zona centro del departamento de Boyacá. Informe de Proyecto. INGEOFÍSICA. 2015.
- INGEOMINAS-UPTC. Proyecto de Hidrogeología en sectores centro y norte de Boyacá y Maní-Casanare. 2007.
- ORELLANA, E. *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo, 1972.
- SINIT SIN, A. Y. *Radiometría*. La Habana: Pueblo y Educación, 1994.

Recibido: 19/07/17

Aceptado: 6/09/17

Fredy A. Fonseca-Benítez, Sede Sogamoso. Grupo de Investigación INGEOFÍSICA Universidad Pedagógica y Tecnológica, Colombia.
frefonseca@yahoo.com