

Caracterización hidroestratigráfica del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga en la
zona occidental del municipio de Bucaramanga, Santander

Javier Sebastián Ramírez Lizarazo, Omar Alberto Hernández Gómez

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

Juan Diego Colegial Gutiérrez

Geólogo, PhD

Codirector

Sully Gómez Isidro

Ingeniera civil, MSc, PhD

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A Dios, quien guía mis pasos.

A mis padres Arturo y Janeth, quienes me han inculcado los valores necesarios para ser una mejor persona y han sido un apoyo incondicional para culminar mis proyectos.

A mis hermanos, quienes me han enseñado a compartir en familia y a quienes quiero dar el mejor ejemplo.

A mi abuelo Alfredo, quien estuvo al pendiente de mis estudios y hoy en día me acompaña desde el Cielo.

Javier Sebastian Ramirez Lizarazo

Dedicatoria

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi madre Omaira Gómez Pérez.

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A mis familiares.

A mi hermana Leydy Margarita por ser el ejemplo de una hermana mayor y de la cual aprendí a superar todas las dificultades que se puedan presentar en la vida. A mis hermanos Jhon y Freddy que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

A mis maestros.

Geólogo, PhD. Juan Diego Colegial Gutiérrez por su orientación para la culminación de mis estudios profesionales; a la Ingeniera civil, MSc, PhD. Sully Gómez Isidro por impulsar el desarrollo de esta tesis.

Omar Alberto Hernández Gómez

Agradecimientos

A Dios, por permitirnos el desarrollo del trabajo.

A nuestras familias, por su paciencia y acompañamiento durante este proceso.

Al Director Juan Diego Colegial y la Codirectora Sully Gómez por la dedicación, tiempo y apoyo dado para la realización de esta investigación.

A nuestros profesores de la Escuela de Geología por brindarnos la oportunidad de adquirir conocimientos que nos servirán a nivel profesional y personal.

A los grupos de investigación GPH y GEOMATICA de la Universidad Industrial de Santander por facilitarnos el apoyo técnico.

Tabla de Contenido

	Pag.
Introducción.....	20
Justificación.....	22
1 Objetivos.....	24
1.1 Objetivo General.....	24
1.2 Objetivos Específicos	24
2 Localización.....	25
3 Marco geológico	27
3.1 Estratigrafía	27
3.1.1 Formación Girón.	27
3.1.2 Formación Bucaramanga.....	28
3.1.3 Depósitos de flujos de Escombros.	33
3.1.4 Depósitos Aluviales.....	33
3.1.5 Depósitos Coluviales o de Ladera.	34
3.1.6 Rellenos Antropogénicos.	34
3.2 Geología estructural.....	34
3.2.1 Sistema de Fallas de Bucaramanga – Santa Marta.....	35
3.2.2 Sistema de Fallas del Suárez.	36
4 Marco teórico	37
4.1 Sistema de clasificación de Facies.....	37

4.2	Generalidades de los abanicos aluviales.....	39
4.3	Tomografías de resistividad eléctrica 2D	41
4.4	Hidrogeoquímica del agua subterránea	43
4.4.1	Normatividad del agua.	43
4.4.2	Iones mayoritarios.	43
4.4.3	Clasificación del agua subterránea.....	44
4.4.4	Balance iónico.....	47
4.4.5	Metales tóxicos.....	47
4.4.6	Parámetros fisicoquímicos.	50
5	Metodología	51
5.1	Revisión bibliográfica.....	51
5.2	Cartografía	52
5.3	Levantamiento de <i>ERT</i>	53
5.3.1	Ubicación de las líneas <i>ERT</i>	53
5.3.2	Adquisición de datos.	55
5.3.3	Procesamiento de datos.	57
5.4	Hidrogeoquímica	58
5.4.1	Selección y ubicación de los puntos de muestreo.	59
5.4.2	Muestreo.....	60
5.4.3	Análisis de parámetros fisicoquímicos.....	61
5.4.4	Análisis del laboratorio.	62
6	Resultados	63

6.1	Cartografía	63
6.2	Análisis de litofacies.....	71
6.2.1	Litofacies del Miembro Órganos Superior.....	71
6.2.2	Secciones estratigráficas del Miembro Órganos Superior.	81
6.2.3	Asociación de litofacies	83
6.3	Interpretación de las tomografías eléctricas 2D (ERT).....	90
6.3.1	Tomografía DJ01.....	90
6.3.2	Tomografía IM01.	91
6.3.3	Tomografía RF02.....	92
6.4	Hidrogeoquímica del agua subterránea del Miembro Órganos Superior	94
6.4.1	Iones mayoritarios.....	94
6.4.2	Concentraciones de As y Pb.....	99
6.4.3	Parámetros fisicoquímicos.	99
7	Discusión.....	101
7.1	Iones mayoritarios del agua subterránea de Qbo.....	101
7.2	Concentraciones de As y Pb en el agua subterránea de Qbo.....	103
7.3	Parámetros fisicoquímicos del agua subterránea de Qbo	103
8	Conclusiones.....	104
9	Recomendaciones	107
	Referencias bibliográficas.....	108

Lista de Tablas

	Pag.
Tabla 1. Sistema de clasificación de Facies.....	38
Tabla 2. Facies típicas de depósitos de abanicos según Miall (1977).	40
Tabla 3. Valores típicos de resistividad para diferentes litologías.....	42
Tabla 4. Valores de referencia correspondientes a sustancias químicas y parámetros fisicoquímicos en el agua.....	43
Tabla 5. Iones mayoritarios presentes en las aguas subterráneas de acuerdo con Appelo & Postma (2005).	44
Tabla 6. Fuentes primarias de los iones mayoritarios en las aguas subterráneas.	44
Tabla 7. Localización de las tomografías de resistividad eléctrica (<i>ERT's</i>).	55
Tabla 8. Localización de los pozos profundos analizados que captan agua subterránea de la parte superior del Miembro Órganos.	59
Tabla 9. Métodos analíticos utilizados por el Laboratorio de Consultas Industriales UIS.....	63
Tabla 10. Litofacies del Miembro Órganos Superior de la Formación Bucaramanga.	79
Tabla 11. Asociación de litofacies del Miembro Órganos Superior de la Formación Bucaramanga.....	88
Tabla 12. Interpretación de las zonas geoelectricas encontradas en las tomografías.	94
Tabla 13. Correlación de las facies de Qbo con los valores de resistividad encontrados en las tomografías <i>ERT</i>	94
Tabla 14. Resultados del análisis de iones mayoritarios en agua subterránea del Miembro Órganos Superior.	95
Tabla 15. Proporciones en meq/L de iones mayoritarios de las muestras analizadas.....	96

Tabla 16. Niveles de As y Pb sobre el límite de detección en el agua subterránea del Miembro Órganos Superior.	99
Tabla 17. Parámetros fisicoquímicos medidos en campo en muestras de pozos profundos del Miembro Órganos Superior.	100
Tabla 18. Relación de CE medida en campo y Σ cationes en las muestras analizadas.	101

Lista de Figuras

	Pag.
Figura 1. Localización de la zona de estudio.....	26
Figura 2. Esquema tectónico y MDT del Área Metropolitana de Bucaramanga.....	37
Figura 3. Asociación y evolución de facies en abanicos.	41
Figura 4. Diagrama de Piper.	46
Figura 5. Diagrama de Stiff para una muestra de agua dada.	47
Figura 6. Terreno plano perteneciente a ISMOCOL.	54
Figura 7. Localización de las tomografías de resistividad eléctrica (<i>ERT's</i>).....	54
Figura 8. Equipo AGI Supersting R8 utilizado en los levantamientos <i>ERT</i>	56
Figura 9. El Odómetro es utilizado para medir la longitud de la línea <i>ERT</i>	56
Figura 10. Los electrodos se disponen en línea recta para el levantamiento <i>ERT</i>	57
Figura 11. Parámetros establecidos para la inversión en el software <i>EARTHIMAGER 2D</i>	58
Figura 12. Localización de los pozos profundos analizados en el Miembro Órganos, hacia la escarpa W del Abanico Aluvial de Bucaramanga.....	60
Figura 13. Medición in situ del pH con el equipo portátil SG23 marca <i>METTLER TOLEDO</i>	62
Figura 14. Valores de temperatura, TDS y CE medidos en campo con el equipo portátil SG23 marca <i>METTLER TOLEDO</i>	62
Figura 15. Mapa geológico del área de estudio. Escala 1:10.000.....	65
Figura 16. Formación Girón por la vía Girón-Aeropuerto Palonegro.	66
Figura 17. Capas tabulares de areniscas de la Formación Girón.	66
Figura 18. Actividad neotectónica en el Miembro Órganos, por el Barrio Carrizal, Girón.	67

Figura 19. Sucesión de capas horizontales de espesor medio y geometría tabular bien definida del Miembro Finos.....	68
Figura 20. Laminación ondulada en el Miembro Finos. Carreteable que conecta el Anillo Vial con el Barrio Porvenir.....	68
Figura 21. Contacto entre el Miembro Órganos, Miembro Finos y Miembro Gravoso de la Formación Bucaramanga.	69
Figura 22. Niveles lodosos con coloración negro, gris, pardo y rojizo en el Miembro Finos.....	69
Figura 23. Miembro Gravoso.....	70
Figura 24. Grava masiva matriz soportada. Corresponde a la porción proximal del abanico.	72
Figura 25. Grava masiva clasto soportada, embebida en litofacies Gmm.....	74
Figura 26. Estratificación cruzada en artesa en una capa de arena gravosa con geometría lenticular.	75
Figura 27. Capa gruesa de arena lodosa con estructura masiva (Sm) y geometría tabular.....	76
Figura 28. Arena lodosa con estratificación cruzada plana.	77
Figura 29. Arena lodosa con estratificación cruzada plana.	77
Figura 30. Capa muy gruesa de lodo masivo color pardo, con una capa oscura de 3 cm que corresponde a un nivel carbonoso.....	78
Figura 31. Parte de una sucesión gruesa de lodos. Facies distales del abanico.	79
Figura 32. Mapa de localización de litofacies aflorantes del Miembro Órganos.	80
Figura 33. Localización de las poligonales de las secciones estratigráficas levantadas en la parte superior del Miembro Órganos.	81
Figura 34. Correlacion estratigrafica de las secciones del Miembro Órganos Superior.....	82
Figura 35. Asociación de litofacies de abanico proximal (AL1).	84

Figura 36. Litofacies predominante del Abanico medio.....	87
Figura 37. Litofacies predominante del Abanico medio.....	87
Figura 38. Litofacies predominantes del Abanico distal.	88
Figura 39. Mapa de asociaciones de facies de la parte superior del Miembro Órganos.....	89
Figura 40. Secciones transversales de resistividad modelada del proceso tomográfico, después del proceso de inversión.....	93
Figura 41. Diagrama de Piper para muestras de agua subterránea del Miembro Órganos Superior.	97
Figura 42. Diagramas de Stiff para muestras de agua subterránea del Miembro Órganos Superior.	98

Lista de Apéndices

Apéndice A. Informe de resultados de los análisis fisicoquímicos realizados en febrero de 2016 de la muestra “Insercol”.

Apéndice B. Informe de resultados de los análisis fisicoquímicos realizados en marzo de 2017 de las muestras “Insercol” y “Prevesa”.

Apéndice C. Sección estratigráfica de la Formación Bucaramanga por la vía Campo Hermoso-Girón.

Apéndice D. Sección estratigráfica de la Formación Bucaramanga por la vía Mercado Campesino-Girón.

Apéndice E. Sección estratigráfica de la Formación Bucaramanga por el carreteable Barrio Porvenir-Anillo vial.

Apéndice F. Balances iónicos de las muestras de agua subterránea analizadas.

Apéndice G. Mapa geológico del área de estudio en escala 1:10.000.

Nota: Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la Biblioteca UIS.

Resumen

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA DEL MIEMBRO ÓRGANOS DE LA FORMACIÓN BUCARAMANGA EN LA ZONA OCCIDENTAL DEL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA, SANTANDER (UIS)*.

AUTORES:

JAVIER SEBASTIAN RAMIREZ LIZARAZO**

OMAR ALBERTO HERNÁNDEZ GÓMEZ**

Palabras claves: Hidroestratigrafía, facies, acuífero, Miembro Órganos Superior, hidrogeoquímica.

En este estudio se realizó una caracterización hidroestratigráfica del Miembro Órganos Superior de la Formación Bucaramanga en la zona occidental del municipio de Bucaramanga, Santander. Para ello, se estudió la distribución de facies sedimentarias, se obtuvieron datos de resistividad del subsuelo a lo largo de tres perfiles *ERT* levantados en el área de estudio y se analizó la química del agua, específicamente el contenido iónico, As y Pb en pozos profundos que captan agua subterránea del Miembro Órganos. El análisis de facies permitió identificar siete litofacies, que comprenden tres asociaciones de litofacies: abanico proximal, abanico medio y distal. Estas litofacies son el producto final de procesos de transporte particulares, principalmente de tipo gravitacional y transporte de lecho. Los perfiles *ERT* obtenidos del Miembro Órganos Superior muestran en general un perfil saturado del subsuelo con distintas zonas geoeléctricas. Se identificaron zonas geoeléctricas con geometrías lenticulares que se asociaron a cuerpos canaliformes de litofacies St-Sp-Sm (40-110 Ohm-m) y Gcm (160-500 Ohm-m) que están saturados y ocurren como cuerpos permeables aislados en una matriz saturada pero impermeable de litofacies Fm y Fl. En cuanto a los análisis químicos se tienen aguas bicarbonatada cálcica y clorurada sódico-magnésica. La presencia del ion cloruro como facies hidroquímica dominante puede estar relacionado con una fuente antrópica en el Abanico Aluvial de Bucaramanga. El análisis de metales pesados deja ver que los niveles de Pb en las muestras analizadas representan un riesgo de contaminación para agua de consumo humano y de uso pecuario.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología UIS. Director: Geólogo Juan Diego Colegial.

Abstract

TITLE: HYDROTHROGRAPHICAL CHARACTERIZATION OF THE MEMBER ORGANS OF THE BUCARAMANGA FORMATION IN THE WESTERN ZONE OF THE MUNICIPALITY OF BUCARAMANGA, SANTANDER (UIS) *.

AUTHORS:

JAVIER SEBASTIAN RAMIREZ LIZARAZO **

OMAR ALBERTO HERNÁNDEZ GÓMEZ **

Keywords: Hydrostratigraphy, facies, aquifer, Upper Órganos Member, hydrogeochemistry.

In this study, a hydrostratigraphic characterization of the Upper Órganos member of the Bucaramanga Formation was carried out in the western area of the municipality of Bucaramanga, Santander. The distribution of sedimentary facies was studied and subsoil resistivity data were obtained along three ERT survey in the area of study. Additionally, water chemistry was analyzed, specifically the ionic content, and Pb in wells that pump groundwater from the Órganos member. The analysis of facies allows for the identification of seven lithofacies, which includes three associations of lithofacies: proximal, medium and distal alluvial fan. These lithofacies are the final product of certain transport processes, mainly of the gravitational type and bed transport. ERT surveys of the Member Organs Superior shows in general a saturated subsoil profile with geoelectric areas. We identified geoelectric zones with lenticular geometries that were associated with channel bodies of lithofacies St-Sp-Sm (40-110 Ohm-m) and Gcm (160-500 Ohm-m) that are saturated and occur as isolated permeable bodies in a matrix saturated but impermeable of lithofacies Fm and Fl. As for the chemical analysis, bicarbonated calcium and sodium-magnesium chlorinated waters were identified. The presence of the chloride ion as dominant hydrochemical facies may be related to an anthropic source in the Bucaramanga Alluvial Fan. According to the analysis of heavy metals, we can assure that the Pb levels in the analyzed samples exceed the concentration limits for drinking water and for livestock use.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología UIS. Director: Geólogo Juan Diego Colegial.

Introducción

Estudios previos realizados en el Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga han podido reconocer rasgos geológicos favorables que permiten el flujo y almacenamiento de agua subterránea, los cuales le confieren un interés hidrogeológico (Vásquez y De Bermoudes, 2004). Adicionalmente, se conoce que el agua subterránea en el área metropolitana de Bucaramanga ha sido utilizada por diversas industrias, lavaderos de carros y estaciones de servicio, e incluso para consumo humano en algunos casos (Gómez *et al.*, 2011).

Este Proyecto de grado pretende realizar un análisis integral del Miembro Órganos, específicamente en su sección superior, de la Formación Bucaramanga, por medio de un análisis de facies que constituyen el medio físico por el que circula el agua subterránea, así como del análisis de la química de sus aguas. Para conocer las características del medio físico, se ha realizado geología de campo y uso de métodos geofísicos, en concreto el uso de tomografías eléctricas. La aplicación de tomografías de resistividad eléctrica es un método que permite estudiar las propiedades físicas del subsuelo definiendo zonas de saturación de acuerdo con el cambio en la resistividad del subsuelo, tales zonas son correlacionadas con la geología del área de estudio, lo cual contribuye a determinar la presencia de litofacies saturadas en el Miembro Órganos Superior.

Por otro lado, el estudio de la química del agua subterránea del Miembro Órganos Superior permite evaluar la interacción fluido-acuífero en términos de intercambio iónico, así como determinar posible contaminación por metales pesados ya sea de origen antrópico o natural. Para ello, se determina el contenido iónico mayoritario y metales pesados As y Pb en muestras de

agua subterránea del Miembro Órganos Superior. También se comparan las características químicas del agua analizada con estándares de potabilidad para delimitar el uso de este recurso.

Justificación

El agua subterránea constituye un recurso del subsuelo que brinda oportunidades de desarrollo a la sociedad, además de servir como alternativa para consumo humano en las zonas con demanda y ser útil para llevar a cabo proyectos industriales. En el Área Metropolitana de Bucaramanga, aunque el abastecimiento de la población proviene principalmente de aguas superficiales por los ríos Suratá, Tona y río Frío, el agua subterránea ha sido utilizada desde el año 2000 por diversas industrias, lavaderos de carros y estaciones de servicio, e incluso para consumo humano en algunos casos (Gómez *et al.*, 2011). El conocimiento del recurso hídrico subterráneo permite a la sociedad implementar medidas para su correcta preservación y manejo.

De acuerdo con estudios previos realizados en los depósitos Cuaternarios de la Formación Bucaramanga, se han podido reconocer rasgos geológicos favorables que permiten el flujo y almacenamiento de agua subterránea en la parte superior del Miembro Órganos de esta formación, los cuales le confieren un interés hidrogeológico (Vásquez y De Bermoudes, 2004).

En general, el Miembro Órganos no ha tenido un desarrollo importante en cuanto a su caracterización como un sistema hidroestratigráfico que comprenda la integración de análisis de litofacies, resistividades reales obtenidas mediante *ERT*, e hidrogeoquímicos. En ese sentido, se pretende contribuir en el conocimiento geológico realizando una caracterización hidroestratigráfica del Miembro Órganos Superior definiendo el medio físico y analizando muestras de agua de los pozos existentes con fines de obtener información hidrogeoquímica, y así conocer su importancia y funcionalidad como sistema acuífero. Hacemos énfasis en la parte superior del Miembro Órganos debido a que es la parte que aflora del Miembro Órganos y la

profundidad de investigación de las tomografías eléctricas no abarca la totalidad del Miembro Órganos.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar hidrogeológicamente el Miembro Órganos Superior de la Formación Bucaramanga a partir de análisis de litofacies, resistividades reales obtenidas mediante *ERT*, e hidrogeoquímicos.

1.2 Objetivos Específicos

- Cartografiar geológicamente a escala 1:10.000 las unidades aflorantes en la parte occidental del Abanico Aluvial de Bucaramanga, en un área limitada al Norte por el río Suratá, al Occidente por la falla del Suárez, al Sur por el río Frío y al Oriente por las laderas y escarpes que constituyen la parte occidental del Área Metropolitana de Bucaramanga.
- Diferenciar las características litológicas, los cambios faciales, y los límites con las unidades que lo suprayacen e infrayacen inmediatamente.
- Generar e interpretar tomografías de resistividad eléctrica 2D (*ERT*), y determinar las litofacies saturadas del Miembro Órganos Superior.
- Determinar las facies hidroquímicas del agua subterránea con base en la composición de iones mayoritarios, en sitios previamente definidos.
- Evaluar la contaminación de metales pesados, As y Pb, del agua subterránea en sitios previamente definidos.

2 Localización

El área de estudio está limitada al norte por el río Suratá, al occidente por la Falla del Suárez y el río de Oro, al sur por el río Frío y al oriente por las laderas y escarpes que constituyen la parte occidental del Área Metropolitana de Bucaramanga. El área de estudio tiene una extensión aproximada de 52,5 Km², comprendida entre las coordenadas planas con Datum Magna-Sirgas y origen Central (Bogotá): X₁: 1'272.500, X₂: 1'283.000, Y₁:1'098.000 y Y₂: 1'105.000. La zona cubre parcialmente las planchas del IGAC, a escala 1:10.000, 120-II-A-2, 120-II-A-4 y 109-IV-C-4.

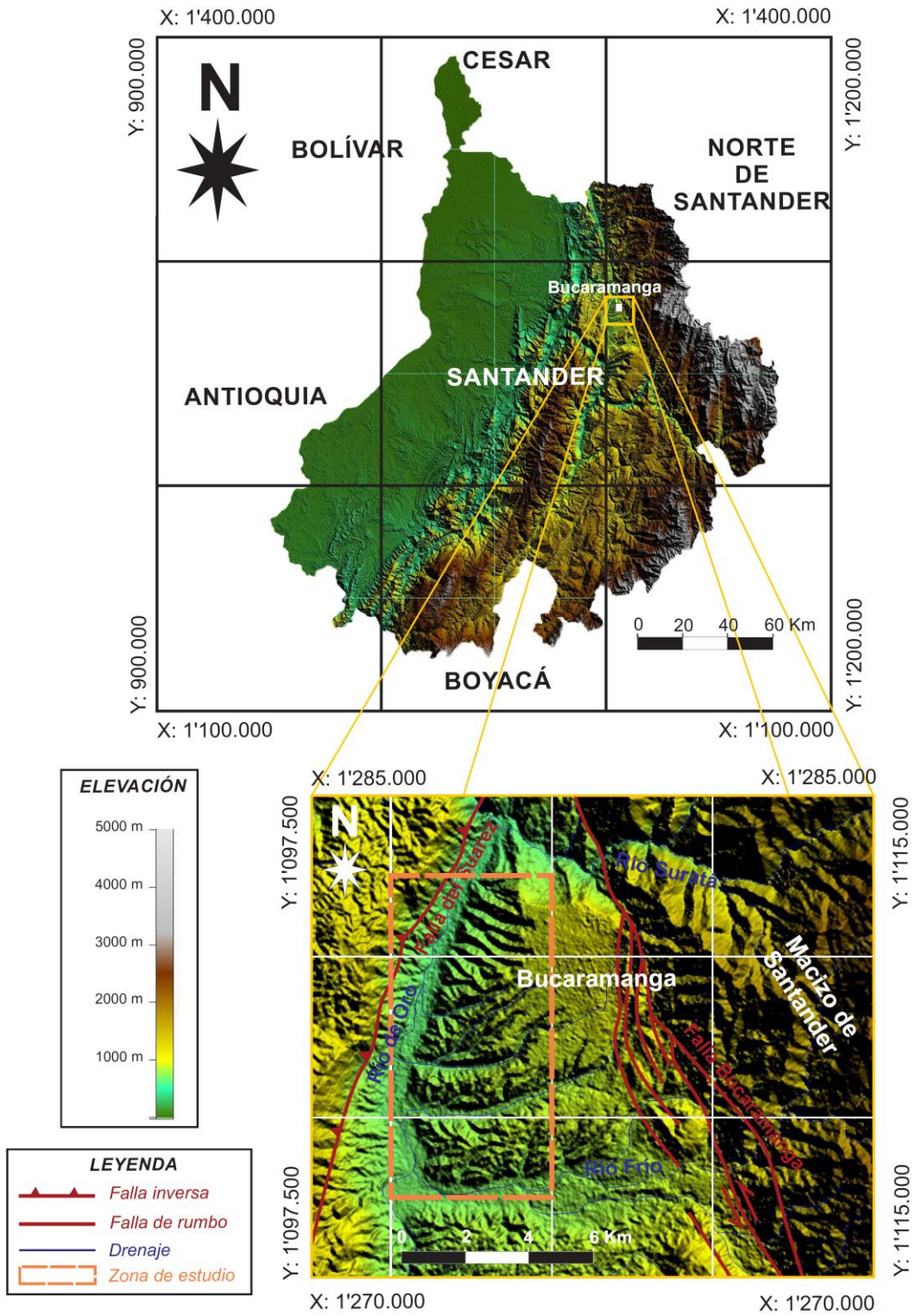


Figura 1. Localización de la zona de estudio, hacia el W del Área Metropolitana de Bucaramanga.

3 Marco geológico

3.1 Estratigrafía

A continuación, se resumen los estudios previos de la geología del área de trabajo. En ellos se describen las unidades litoestratigráficas ordenadas de la más antigua a la más joven, mencionando la litología, génesis, distribución en el área y edad de la unidad litoestratigráfica.

3.1.1 Formación Girón. Descrita inicialmente por Hettner (1892) como "*Girón Series*" en Ward *et al.* (1973), para designar una megasecuencia aflorante al occidente de Bucaramanga en los alrededores de Girón, Santander. Cediel (1968), hace un estudio detallado en la sección tipo del Río Lebrija, en donde describió y midió un total de 4650 m, divididos en ocho conjuntos litológicos (A-H), que corresponden a las formaciones Girón (Conjuntos A-G) y Los Santos (H). En general, la Formación Girón ha sido correlacionada con la Formación La Quinta del Jurásico Superior en el occidente de Venezuela (Oppenheim, 1940).

De acuerdo con Clavijo y Royero (2001), la Formación Girón reposa en discontinuidad estratigráfica sobre las formaciones Bocas y Jordán e infrayace concordantemente a la Formación Los Santos (Tambor). Según INGEOMINAS (2001b), la Formación Girón aflora principalmente en el cerro de Palonegro y otros afloramientos se encuentran al oriente del río de Oro, donde se encuentra cubierta, en su mayor parte, por la Formación Bucaramanga y otros depósitos sedimentarios de origen aluvial y coluvial. Adicionalmente, INGEOMINAS (2001b)

encuentra evidencias de la acción del sistema de Fallas del Suárez, debido a la presencia de rocas fracturadas y cizalladas.

Una descripción litológica de la Formación Girón se encuentra en Clavijo y Royero (2001) donde mencionan que está compuesta por “areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomerático, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, estratificación cruzada, en capas gruesas, con interestratificaciones de limolitas y lodolitas, de color rojo violeta, grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo hasta de 4 cm”. El ambiente de sedimentación es continental, fluvial a lacustre-fluviátil (Clavijo y Royero, 2001).

3.1.2 Formación Bucaramanga. Hubach (1952) describió por primera vez los depósitos Cuaternarios de la Formación Bucaramanga. El autor definió el nivel más potente, conglomerático y basal como Formación Órganos, y para los niveles suprayacentes que constituyen el subsuelo de gran parte de la ciudad les asignó el nombre de Formación de Bucaramanga. Posteriormente, Niño y Vargas (1992) agruparon estratigráficamente estos depósitos cuaternarios y plantearon el nombre de Formación Meseta de Bucaramanga. Los autores identificaron cinco miembros definidos de base a techo como: Calcáreo, Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos, siendo los niveles Órganos y Finos identificados y descritos originalmente por Hubach (1952), el miembro Gravoso propuesto por Niño y Vargas (1992) en su trabajo y el miembro Limos Rojos definido por Julivert (1963).

En INGEOMINAS (2001b), estos depósitos son redefinidos como Formación Bucaramanga. De acuerdo con INGEOMINAS (2001b), no existen límites estratigráficos claros que permitan separar los Miembros Órganos y Calcáreo, ya que este último no presenta una distribución lateral y se observa en forma de lentes locales en la quebrada La Picha, por lo que concluyen que el

Miembro Calcáreo forma parte del Miembro Órganos. Así, teniendo en cuenta las divisiones estratigráficas hechas por Hubach (1952) y Niño y Vargas (1992), INGEOMINAS (2001b) dividió la Formación Bucaramanga, de base a techo, en los siguientes miembros: Miembro Órganos, Miembro Finos, Miembro Gravoso y Miembro Limos Rojos. Actualmente se considera que la Formación Bucaramanga es un gran cuerpo de sedimentos que tiene todas las características de un abanico aluvial desembocando del frente montañoso controlado por la Falla Bucaramanga (INGEOMINAS, 2001b; INGEOMINAS, 2008), por lo tanto, en este trabajo también nos referimos como Abanico Aluvial de Bucaramanga a los depósitos cuaternarios de la Formación Bucaramanga.

Recientemente, Jiménez *et al.* (2015) realizaron una investigación paleomagnética en la Formación Bucaramanga y restringieron su edad mediante estratigrafía magnética, asignando una edad de 0,8 Ma. para los sedimentos más recientes.

3.1.2.1 Miembro Órganos. Este nivel es reconocido por Hubach (1952). De acuerdo con INGEOMINAS (2001b) “el miembro Órganos aflora en las laderas y escarpes de la parte occidental de la Meseta de Bucaramanga y el Área Metropolitana, en los alrededores del municipio de Girón, anillo vial, en las estribaciones de la parte norte de la mesa de Ruitoque y en los cortes de la carretera que comunica la población de Girón con la ciudad de Bucaramanga. Los mejores afloramientos donde se puede observar casi toda la secuencia se presentan en una extensa área sobre el escarpe occidental del Abanico Aluvial de Bucaramanga. Se caracteriza por erosionarse fácilmente, formando surcos, cárcavas y tierras malas que dan formas de estoraques que alcanzan alrededor de 15 m de altura y sobre él se desarrolla un drenaje dendrítico subparalelo. Los depósitos se encuentran medianamente meteorizados, presentando poca

compactación de éstos, con alta permeabilidad y son fácilmente erodables, lo que facilita el desprendimiento de bloques y cantos en las épocas de fuertes precipitaciones. El ambiente de depositación de este miembro se relaciona con flujos de escombros y flujos torrenciales, e interdigitación de facies por corrientes de canal, correspondiendo a la parte proximal y media del Abanico de Bucaramanga”.

De acuerdo con Niño y Vargas (1992) es un nivel de “capas gruesas a muy gruesas con niveles medios de espesor variable. Presenta contactos netos ondulados. Texturalmente consta de gravas matrizsoportadas (60%) y granosoportadas (40%) lodoarenosas, arenolodosas, subredondeadas a redondeadas con esfericidad baja a media y mal calibrada. Composicionalmente presentan feldspatos alterados (20%). Las gravas predominantes son de areniscas blancas silíceas 30%, ígneos y metamórficos 22%, areniscas violetas 8%, cuarzo 5%, Chert 3% y caliza 1%. Los niveles medios variables son de arcillas compactas arenosas ligeramente micáceas con trazas de materia orgánica. El ambiente de depositación del Miembro Órganos corresponde a la facies proximal de un abanico dominado por corrientes, caracterizado por flujos de escombros fluidos que llenan canales y forman barras”. Mancera y Salamanca (1993) estiman que el espesor del Miembro Órganos podría superar los 180 m.

De acuerdo con Moreno y Plata (2015), “las características sedimentológicas texturales en el Miembro Órganos se encuentran definidas por niveles conglomeráticos de tamaño grava principalmente, que se abarca desde gránulos hasta guijarros y en menor proporción cantos, muy mal calibrados y completamente desordenados sin orientación aparente, lentes de arena entre las capas, intercalaciones de niveles areno-arcillosos, de estratificación plano-paralela conjuntamente”.

En Garnica y Niño (2015) determinan tres ambientes sedimentarios en el Miembro Órganos: 1) Abanico aluvial, 2) Fluvial y 3) Fluvial-Playa. Con base en la composición mineralógica de los clastos, concluyen que estos proceden de la Formación Girón, Formación Los Santos, Formación Silgara, Complejo de Bucaramanga y el Monzogranito del Grupo Plutónico de Santander.

Lima y Medina (2015) a partir de observaciones macroscópicas en el Miembro Órganos, teniendo en cuenta aspectos tales como granulometría, fabrica y presencia de materia orgánica, reconocieron siete litofacies sedimentarias: 1) Facies Gm, gravas clastosoportadas dispuestas de manera caótica con ligera estratificación, 2) Facies P, carbonato pedogénico, 3) Facies Fr, arcillas varicoloreadas masivas con presencia de materia orgánica, 4) Facies Sh, arenas masivas con guijarros dispersos y estratificación laminar cruda, 5) Facies Gms, gravas arenosoportadas con ligeras imbricaciones, 6) Facies Gcm, gravas gravosoportadas y 7) Facies Pf, ferricreta. De acuerdo con el análisis de facies, los autores distinguen dos macroeventos cíclicos paleoclimáticos durante la depositación de los sedimentos del Miembro Órganos: 1) Precipitaciones moderadas no estacionales que generaban fluctuaciones del nivel freático y 2) Precipitaciones torrenciales estacionales que permitieron procesos tipo *debris flow*.

3.1.2.2 Miembro Finos. Este nivel fue reconocido y definido por Hubach (1952). De acuerdo con INGEOMINAS (2001b), el Miembro Finos “se ubica estratigráficamente entre el nivel inferior de la Formación Bucaramanga (Miembro Órganos) y el nivel superior (Miembro Gravoso) en contactos netos plano paralelo. Es una extensa capa lenticular horizontal, más o menos continua, de unos 15 m de espesor promedio, donde alternan niveles arcillosos, limoarenosos y arenolimosos, de colores gris verdosos”. De acuerdo con Niño y Vargas (1992),

el Miembro Finos se compone de “capas finas de geometría tabular y lenticular con cambios faciales laterales. Presentan laminación plana paralela cruzada y ondulosa paralela de continuas a discontinuas; los contactos son netos planos y suavemente ondulados. Texturalmente consta de arenas arcillosas, arcillas arenosas ligeramente micáceas, gravas, y algunas gravas arcillosas. Las gravas son subangulares a subredondeadas de esfericidad media, moderadamente calibradas. Composicionalmente presentan feldespatos alterados, *hardgrounds* de óxido de hierro perpendiculares a la estratificación, costras y lentes de óxidos de hierro y trazas de materia orgánica”.

3.1.2.3 Miembro Gravoso. Definido por Niño y Vargas (1992). De acuerdo con INGEOMINAS (2001b), el miembro Gravoso esta “ubicado sobre la escarpa occidental y norte de Bucaramanga. La morfología que presenta el Miembro Gravoso es similar a la del Órganos en los sectores de los valles de las quebradas, pero hacia la parte sur de la quebrada de la Iglesia la morfología corresponde a colinas suaves onduladas, con un drenaje dendrítico. Su espesor varía entre 8 y 30 m; presenta niveles gravosos, gravoarenosos y gravolodosos. Los cantos son, en su mayor parte, tamaño grava de diámetro promedio 15 cm y bloques de roca, en menor cantidad, hasta de 0, 8 m de diámetro, subangulares a subredondeados, en matriz areno-arcillo-limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido; en general el depósito es matriz soportado, aunque localmente se presenta clasto soportado. El contacto inferior con el Miembro Finos es neto, continuo y suavemente ondulado y el contacto superior con el Miembro Limos rojos es gradacional. Los cantos están compuestos en su mayor parte por rocas metamórficas-ígneas del Macizo de Santander, y areniscas cuarzosas, areniscas limosas y limolitas moradas de las Formaciones Girón y Jordán”.

3.1.2.4 Miembro Limos rojos. Nivel definido por Julivert (1963). De acuerdo con INGEOMINAS (2001b), “este Miembro se localiza en el sector urbanizado de Bucaramanga, aunque no en forma uniforme y se continúa hacia el sur, hasta el sector norte del municipio de Floridablanca. Está constituido por arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Suprayace al segmento gravoso y su contacto con éste es gradacional. La parte más superficial de este miembro se encuentra altamente meteorizada, formándose en algunos sectores niveles de oxidación que le ayudan a incrementar su compactación y resistencia a la erosión. El ambiente de deposición indica un dominio de flujo de lodos combinados con caídas de bloques de la pendiente del Macizo”.

3.1.3 Depósitos de flujos de Escombros. De acuerdo con INGEOMINAS (2001b), son “depósitos de piedemonte de origen aluvio-torrencial y aluvio-gravitacional, provenientes principalmente de la denudación de los materiales alternados que componen el Macizo de Santander los cuales son transportados a lo largo de los cauces de corrientes de agua que nacen en éste”.

3.1.4 Depósitos Aluviales. Según INGEOMINAS (2001b), son depósitos de material dejados por los ríos y quebradas mayores, los cuales se distribuyen de acuerdo con la altura y su posición en los valles. Se dividen en Terrazas Medias (Qal2), Terrazas Bajas (Qal1) y Depósitos Aluviales de Cauce y Llanuras de Inundación (Qal).

3.1.5 Depósitos Coluviales o de Ladera. De acuerdo con INGEOMINAS (2001b) “son depósitos acumulados, por lo general, en la base de escarpes, y provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes, por la acción de la fuerza de gravedad”.

3.1.6 Rellenos Antropogénicos. INGEOMINAS (2001b) describe estos depósitos como aquellos materiales que han sido arrojados por la actividad del hombre, sobre laderas naturales de cortes de vías, cuyo resultado final ha sido el relleno de depresiones naturales o ampliación de las zonas semiplenas para su utilización en desarrollos urbanísticos.

3.2 Geología estructural

Los sedimentos de la Formación Bucaramanga han sido acumulados en una cuenca tectónica de forma triangular que resultó de la convergencia en cuña de los sistemas de fallas de Bucaramanga – Santa Marta y del Suárez (Julivert, 1958; INGEOMINAS, 2001b). Estos dos sistemas de fallas definen tres bloques estructurales bien diferenciados entre sí (INGEOMINAS, 2001b).

El bloque oriental está limitado por el Sistema de Fallas Bucaramanga – Santa Marta y se constituye de rocas ígneo-metamórficas que conforman el Macizo de Santander. El bloque central, limitado hacia el este por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta y hacia el oeste por la Falla del Suárez, conforma la depresión tectónica rellena con los depósitos aluviales recientes de la Formación Bucaramanga, en donde se encuentra acentuada la ciudad. Este bloque central hundido ha sido descrito como una cuenca tectónica por subsidencia en una cuña entre dos fallas (INGEOMINAS, 2008). Por último, el bloque occidental, limitado por el sistema de

fallas del Suárez, está constituido por rocas sedimentarias del Jurásico (INGEOMINAS, 2001b; INGEOMINAS, 2008).

Los depósitos de la Formación Bucaramanga presentan un perfil transversal convexo y un perfil longitudinal ligeramente cóncavo, típico de la forma cónica de un abanico aluvial al pie de un frente montañoso (INGEOMINAS, 2008); en este caso el frente montañoso está controlado por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta. No obstante, el Abanico de Bucaramanga no alcanzó a desarrollar la forma típica semicircular de un abanico aluvial debido a su confinamiento en una cuenca tectónica delimitada por fallas activas con marcados escarpes que actúan como barreras topográficas. El escarpe de Palonegro/Cantalta controlado por la Falla del Suárez ha funcionado como un obstáculo para el desarrollo libre del Abanico de Bucaramanga en su parte distal (INGEOMINAS, 2008).

3.2.1 Sistema de Fallas de Bucaramanga – Santa Marta. El área de estudio se encuentra afectada por la Falla Bucaramanga, la cual corresponde a nivel regional con la sección sur del trazo del sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta (París *et al.*, 2000; INGEOMINAS, 2001a). La Falla Bucaramanga presenta un lineamiento rectilíneo excepcional de 220 Km de longitud (INGEOMINAS, 2001a) que separa rocas ígneo-metamórficas Precámbricas (Neis de Bucaramanga) y Paleozoicas, del Macizo de Santander, con rocas sedimentarias del Mesozoico-Cenozoico de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (INGEOMINAS, 2001a, Jiménez *et al.*, 2015). La Falla Bucaramanga claramente ha desplazado lateralmente a la izquierda por 2,5 km el Abanico Aluvial de Bucaramanga de 10-15 km de ancho, producido por el material transportado por el río Suratá (drenaje alimentador) desde el adyacente Macizo de Santander (INGEOMINAS, 2008; Jiménez *et al.*, 2015). Se ha establecido una tasa de deslizamiento máxima de 3 mm/año

para la Falla de Bucaramanga con base en estudios paleomagnéticos realizados en el Abanico Aluvial de Bucaramanga (Jiménez *et al.*, 2015).

3.2.2 Sistema de Fallas del Suárez. Se extiende a lo largo de los ríos Suárez y Oro, hasta interceptarse con la Falla Bucaramanga al norte de la ciudad. A escala regional la Falla Suárez es cartografiada como una sola traza, pero a escala local se diferencian varias fallas satélites subparalelas, de corta longitud, como la Falla del río de Oro (INGEOMINAS, 2001a). Delimita junto con la Falla Bucaramanga, la depresión tectónica que alberga los depósitos cuaternarios de la Formación Bucaramanga. De acuerdo con Julivert (1963) desplaza verticalmente una superficie de erosión Terciaria más o menos 600 m y afecta los depósitos aluviales de la Formación Bucaramanga. Al occidente de la ciudad de Bucaramanga, la expresión geomorfológica de este salto es el escarpe de falla de Palonegro/Cantalta controlado por el sistema de fallas de Suárez (INGEOMINAS, 2008). Sobre la margen izquierda del río de Oro, pone en contacto rocas sedimentarias de la Formación Girón y depósitos cuaternarios de la Formación Bucaramanga. Presenta evidencia neotectónica como depósitos cuaternarios fuertemente basculados al occidente de Girón (Julivert, 1963; INGEOMINAS, 2001a).

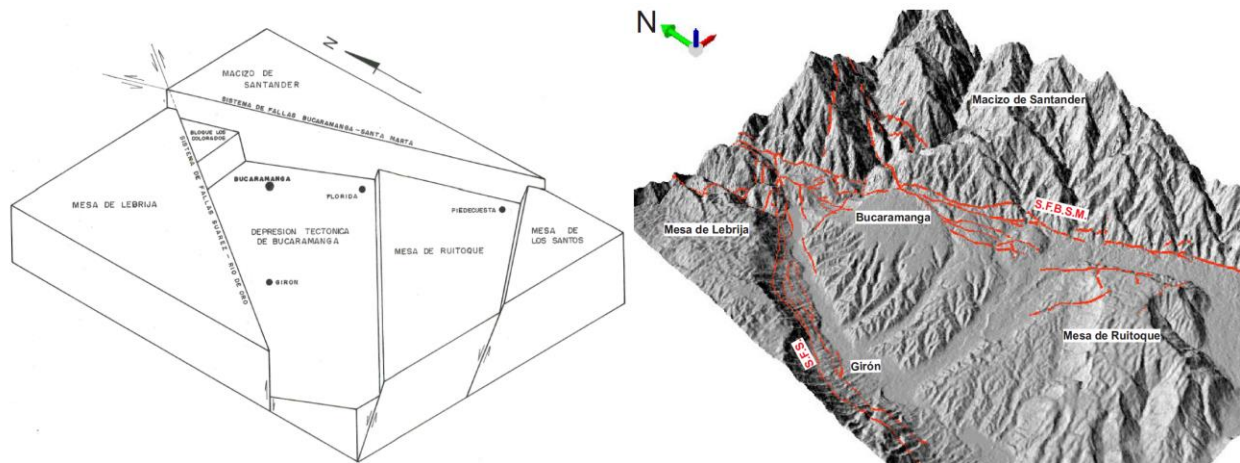


Figura 2. Esquema tectónico y MDT del Área Metropolitana de Bucaramanga. SFS: Sistema de fallas de Suárez, SFBSM: Sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta. Los trazos de las fallas mostrados en el MDT corresponden a los trazos de fallas del mapa geológico de INGEOMINAS (2001b). Tomado y modificado de Niño y Vargas, 1992.

4 Marco teórico

4.1 Sistema de clasificación de Facies

Para describir diferentes litofacies, Miall (1985) propone el uso de un sistema de códigos identificatorios de las distintas facies que pueden existir en los diferentes ambientes sedimentarios (Tabla 1):

Tabla 1.
Sistema de clasificación de Facies.

Código de facies	Facies	Estructuras sedimentarias	Interpretación
Gmm	Grava masiva, matriz soportada.	Gradaciones mal definidas.	Flujo plástico de derrubios (viscosos, alta resistencia).
Gmg	Grava matriz soportada.	Gradación inversa a normal.	Flujo plástico de derrubios (viscosos, baja resistencia).
Gci	Grava clasto soportada.	Gradación inversa.	Flujo de derrubios rico en clastos (alta resistencia), o flujo de derrubios pseudoplástico (baja resistencia).
Gcm	Grava masiva clasto soportada.		Flujo de derrubios pseudoplástico (carga de fondo inercial, flujo turbulento).
Gh	Grava con estratificación mal definida, clasto soportada.	Estratificación horizontal, imbricación.	Formas de fondo longitudinales, depósitos de <i>lag</i> , depósitos de tamiz.
Gt	Grava, estratificada.	Estratificación cruzada en artesa.	Rellenos de canal menores.
Gp	Grava, estratificada.	Estratificación cruzada planar.	Formas de fondo transversales, crecimiento deltaico a partir de antiguos barras remanentes.
St	Arena, fina a muy gruesa, puede ser guijosa.	Estratificación cruzada en artesa, solitaria o agrupada.	Dunas linguoide y de cresta sinuosa (3-D).
Sp	Arena, fina a muy gruesa, puede ser guijosa.	Estratificación cruzada planar, solitaria o agrupada.	Formas de fondo linguoide y transversales (2-D).
Sr	Arena, muy fina a gruesa.	Laminación cruzada de <i>ripples</i> .	Ondulitas (Régimen de flujo bajo).
Sh	Arena, muy fina a gruesa, puede ser guijosa.	Laminación horizontal en bandas o lineaciones en planos de estratificación, por corrientes.	Flujo de capa plano (flujo critico).
Sl	Arena, muy fina a gruesa, puede ser guijosa.	Estratificación cruzada de bajo ángulo (<15°).	Rellenos erosivos, dunas <i>humpback</i> o <i>washed-out</i> , antidunas.
Ss	Arena, muy fina a gruesa, puede ser guijosa.	amplios socavamientos superficiales.	Rellenos erosivos.
Sm	Arena, fina a gruesa.	Masiva, o laminación difusa (poco definida).	Depósitos por flujos gravitacionales de sedimentos.
Fl	Arena, arcilla, lodo.	Laminación fina, ondulitas muy pequeñas.	Llanura de inundación, canales abandonados, o depósitos por inundación creciente.
Fsm	arcilla, lodo.	Masiva.	depósitos de canal abandonado o retro-ciénaga, en llanura de inundación.
Fm	Lodo, arcilla.	Masiva, grietas de desecación.	Llanura de inundación, canales abandonados, o depósitos <i>drape</i> .
Fr	Lodo, arcilla.	Masiva, raíces, bioturbación.	<i>Root bed</i> , suelo incipiente.
C	Carbón, lodo carbonoso.	Planta, películas de lodo.	Depósitos de pantanos vegetados.
P	Paleosuelo carbonatado.	Características pedogénicas: nódulos, filamentos.	Suelo con precipitación química.

Tomado de Miall, 1985.

4.2 Generalidades de los abanicos aluviales

Los abanicos aluviales se forman adyacentes a frentes montañosos asociados a fallas regionales. Esta elevación topográfica es rápidamente denudada proporcionando los sedimentos que construyen los abanicos. En los abanicos de ambiente húmedo tropical, el clima induce la erosión química más que la mecánica generando detritos de tamaño grueso y densa vegetación que protege las laderas. La mayoría de los abanicos están dominados por materiales depositados mediante flujos acuosos, predominantemente las facies gravosas Gm (Figura 3, Tabla 2) en la parte proximal (Walker, 1984).

Los abanicos aluviales constituyen unos cuerpos muy característicos con morfología conoidal en planta. Cuando el flujo que circula por un canal principal que se halla encajado en el relieve montañoso incide en la zona de ruptura de pendiente, surge del macizo y pierde bruscamente su confinamiento, los materiales detríticos se acumulan bruscamente, produciéndose una dispersión radial del flujo principal. La pérdida del confinamiento implica un decrecimiento muy rápido de la velocidad, de la competencia y de la capacidad portante del flujo, de manera que éste tiende a depositar los materiales clásticos acarreados. La deposición rápida implica un mal desarrollo de fábricas y texturas sedimentarias específicas, de manera que los sedimentos clásticos generalmente muy angulosos, están muy mal seleccionados y muestran una dispersión radial incipiente a partir del lugar donde se efectúa la pérdida del encajamiento del canal principal del abanico (Arche, 2010).

Tabla 2.

Facies típicas de depósitos de abanicos según Miall (1977).

Facies principales	Gm	Grava comúnmente imbricada, clasto soportada con estratificación subhorizontal pobremente definida.
	Gms	Grava soportada en matriz lodosa sin imbricación o estratificación interna.
	Gt	Grava clasto soportada con estratificación cruzada en artesa.
	Gp	Grava con estratificación cruzada planar, transición desde grava clasto soportada a través de gravas matriz soportadas hasta arenas (Sp).
Facies menores	Sh	Arena con estratificación horizontal.
	St	Arena con estratificación cruzada en artesa.
	Sp	Arena con estratificación cruzada planar.
	Fm	Arena muy fina con laminación o laminación cruzada, arcilla o lodo.
	P	Carbonato concrecionado pedogénicas.

Tomado de Miall (1977).

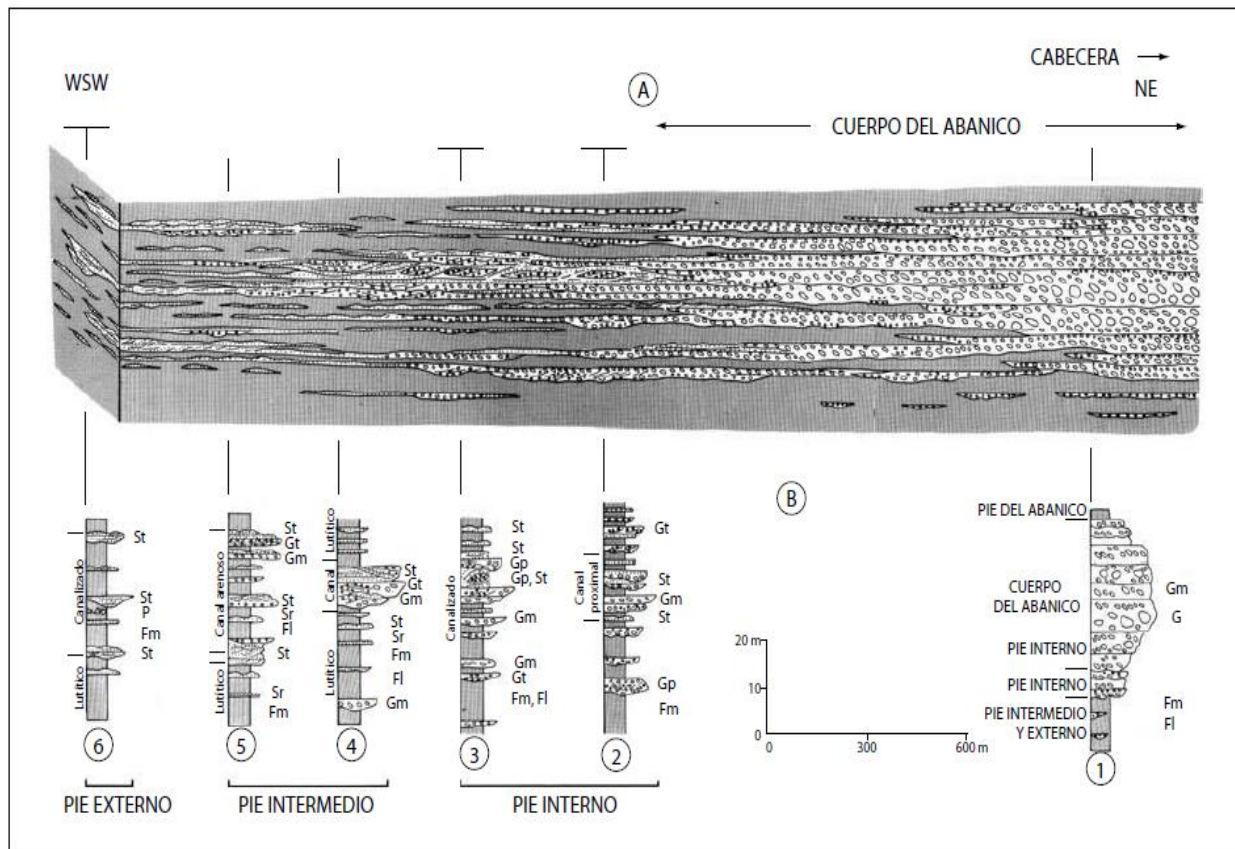


Figura 3. “Asociación y evolución de facies en abanicos. a) Sección general en la que se evidencian las equivalencias laterales entre las asociaciones de facies del cuerpo interno del abanico, hasta las asociaciones de facies del pie externo del abanico. b) Columnas sintéticas que muestran la evolución vertical de facies”(Arche, 2010). Tomado de Arche, 2010.

4.3 Tomografías de resistividad eléctrica 2D

La tomografía de resistividad eléctrica (ERT) es una de las técnicas más populares para estudiar el subsuelo superficial y se aplica para cuestiones hidrogeológicas, de ingeniería o agrícolas (Günther & Rücker, 2012). Las tomografías de resistividad eléctrica son una versión actualizada de los métodos tradicionales de resistividad. Los datos son colectados mediante un instrumento automatizado y procesados usando programas de inversión numérica. La medición de la

resistividad aparente es un valor afectado por el volumen del arreglo de todas las capas geológicas a lo largo de las cuales el flujo de corriente eléctrica es inducido. Un programa de inversión convierte los datos de resistividad aparente en una imagen bidimensional (tomograma) que muestra una distribución de los valores de resistividad reales. El contraste entre las propiedades del suelo y la roca subyacente proporciona las bases para la aplicación de esta técnica geofísica para caracterizar la roca y delinear las áreas anómalas (Assaad *et al.*, 2013). La Tabla 3 relaciona valores de resistividad con diferentes litologías:

Tabla 3.
Valores típicos de resistividad para diferentes litologías.

Litología	Resistividad (Ohm-m)
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500 a 5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente.	100 a 2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada.	1 a 1000
Gruss no saturado	500 a 1000
Saprolito no saturado	200 a 500
Saprolito saturado	40 a 100
Gravas no saturadas	500 a 2000
Gravas saturadas	300 a 500
Arenas no saturadas	400 a 700
Arenas saturadas	100 a 200
Limos no saturados	100 a 200
Limos saturados	20 a 100
Limos saturados con agua salada	30 a 40
Arcillas no saturadas	20 a 40
Arcillas saturadas	5 a 20
Arcillas saturadas con agua salada	1 a 10
Andosoles secos	1000 a 2500
Andosoles no saturados	300 a 1000
Andosoles saturados	30 a 50

Tomado de Hoyos *et al.*, 2000.

4.4 Hidrogeoquímica del agua subterránea

4.4.1 Normatividad del agua. En primera instancia, abordamos los estándares de referencia correspondientes a sustancias químicas y parámetros fisicoquímicos presentes en el agua que pueden causar efectos adversos en la salud si se exceden las concentraciones permisibles. La Tabla 4 muestra los valores de referencia establecidos por la OMS (OMS, 2003) y por la legislación colombiana con respecto a la presencia de As, Pb y otros parámetros fisicoquímicos en el agua:

Tabla 4.

Valores de referencia correspondientes a sustancias químicas y parámetros fisicoquímicos en el agua.

Parámetro	Estándares de la OMS (Agua potable) (OMS, 2003)	Estándares en la Legislación Colombiana		
		Agua potable (Resolución 2115 del 2007)	Agua para Agricultura (Decreto 1594 de 1984)	Agua para Ganadería (Decreto 1594 de 1984)
pH	6,5 - 9,5*	6,5 - 9	4,5 - 9	-
Conductividad	-	1000 μ S/cm	-	-
As	0,01 mg/L	0,01 mg/L	0,1 mg/L	0,2 mg/L
Pb	0,01 mg/L	0,01 mg/L	5 mg/L	0,1 mg/L

Nota: *La OMS (OMS, 2003) no propone ningún valor de referencia para el pH en agua de consumo basado en efectos sobre la salud, no obstante, sugiere valores óptimos entre 6,5 a 9.

4.4.2 Iones mayoritarios. Los iones disueltos en las aguas subterráneas se dividen en mayoritarios, minoritarios y trazas. Con respecto a los iones mayoritarios, la Tabla 5 muestra los cationes y aniones que normalmente se encuentran en las aguas subterráneas de acuerdo con Appelo & Postma (2005). En las aguas naturales, estas especies geoquímicas mayoritarias generalmente constituyen más del 95% de los sólidos totales disueltos, y se derivan de la meteorización mineral y la mezcla de aguas naturales (Clark, 2015). También tienen fuentes

antropogénicas en actividades industriales y agrícolas (Clark, 2015). La Tabla 6 proporciona algunas de las fuentes primarias de los iones mayoritarios.

Tabla 5.

Iones mayoritarios presentes en las aguas subterráneas de acuerdo con Appelo & Postma (2005).

Cationes	Aniones
Sodio (Na^+)	Cloruro (Cl^-)
Potasio (K^+)	Bicarbonato (HCO_3^-)
Magnesio (Mg^{2+})	Sulfato (SO_4^{2-})
Calcio (Ca^{2+})	Nitrato (NO_3^-)

Tomado de Appelo & Postma, 2005.

Tabla 6.

Fuentes primarias de los iones mayoritarios en las aguas subterráneas.

Iones mayoritarios	Algunas fuentes primarias
Calcio (Ca^{2+})	Anfíboles, feldspatos, yeso, piroxenos, aragonito, calcita, dolomita, minerales arcillosos.
Magnesio (Mg^{2+})	Anfíboles, olivino, piroxenos, dolomita, magnesita, minerales arcillosos.
Sodio (Na^+)	Feldspatos, minerales arcillosos, halita, mirabilita, desechos industriales.
Potasio (K^+)	Feldspatos, feldspatoides, algunas micas, minerales arcillosos.
Bicarbonato (HCO_3^-) / Carbonato (CO_3^{2-})	Caliza, dolomita.
Sulfato (SO_4^{2-})	Oxidación de menas de sulfuros, yeso, anhidrita.
Cloruro (Cl^-)	Rocas sedimentarias, rocas ígneas.

Modificado de BV, D. C., & Hydraulics, D., 1999a.

4.4.3 Clasificación del agua subterránea. Una manera de determinar las facies hidroquímicas es la clasificación de las aguas de acuerdo con el ion dominante, la cual nombra el tipo de agua por el anión o el catión que sobrepasa el 50% de sus sumas respectivas; si ninguno supera el 50% se nombran los dos más abundantes. El nombre se puede simplificar asignando un

número y una letra a cada ordenamiento de aniones y cationes; si conviene se puede añadir el nombre de algún ion menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta. Adicionalmente se puede añadir un tercer término a la expresión para resaltar la mineralización del agua por medio de la conductividad de la muestra (Custodio y Llamas, 1983). De acuerdo con esta clasificación, la nomenclatura para los grupos que se hacen es:

<i>Aniones</i>	<i>Cationes</i>	<i>Conductividad</i>
1: r Cl > r SO ₄ > r CO ₃ H	a: r Na > r Mg > r Ca	C1: 0–250 μS/cm a 25°C
2: r Cl > r CO ₃ H > r SO ₄	b: r Na > r Ca > r Mg	C2: 250-750 μS/cm a 25°C
3: r SO ₄ > r Cl > r CO ₃ H	c: r Mg > r Na > r Ca	C3: 750-2250 μS/cm a 25°C
4: r SO ₄ > r CO ₃ H > r Cl	d: r Mg > r Ca > r Na	C4: >2250 μS/cm a 25°C
5: r CO ₃ H > r Cl > r SO ₄	e: r Ca > r Na > r Mg	
6: r CO ₃ H > r SO ₄ > r Cl	f: r Ca > r Mg > r Na	

Esta clasificación por el ion dominante se encuentra bien adaptada al diagrama de Piper, como veremos más adelante.

4.4.3.1 Diagrama de Piper. Se utiliza para visualizar gráficamente la composición química total de las aguas subterráneas y permite una clasificación de las facies hidroquímicas con base al ion dominante. El diagrama de Piper contiene dos gráficos triangulares para representar las proporciones de cationes y aniones, expresadas en meq/L. El triángulo para cationes tiene 100% de Ca²⁺ en la esquina izquierda, 100% de Na⁺ + K⁺ hacia la derecha y el 100% de Mg²⁺ hacia arriba. La suma de las concentraciones de los tres iones, en meq/L, es recalculada a 100% y la composición relativa se representa en el triángulo. Para los aniones, el triángulo de la derecha tiene 100% de carbonato a la izquierda, Cl⁻ a la derecha y SO₄²⁻ en la

parte superior y se plotean de manera similar a los cationes. Los dos puntos de datos en los dos triángulos se unen mediante el trazado de líneas paralelas al límite exterior hasta que se unen en el rombo central (ver líneas punteadas para la muestra 1 en la Figura 4). La composición química relativa de la muestra de agua se indica entonces con un único punto en el rombo central (Appelo & Postma, 2005). En la Figura 4, el tamaño del círculo en el rombo indica la concentración de sólidos disueltos totales.

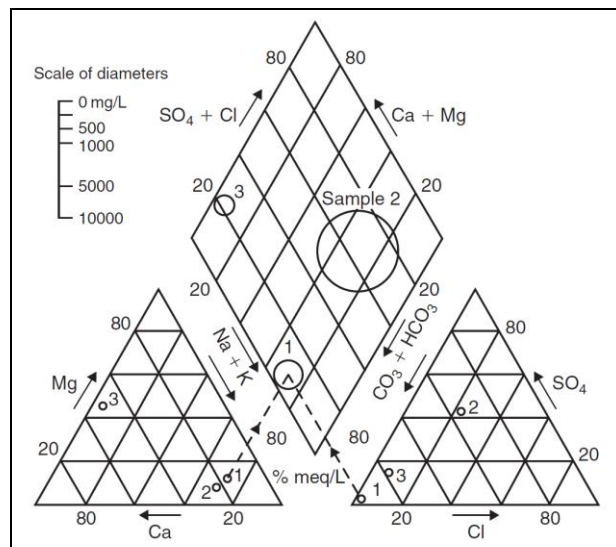


Figura 4. Diagrama de Piper. Tomado de Appelo & Postma, 2005.

4.4.3.2 Diagrama de Stiff. Es un método gráfico que muestra las características químicas de muestras individuales de agua subterránea (Figura 5). El Diagrama de Stiff se compone de tres a cuatro ejes horizontales que muestran los iones mayoritarios. En cada eje se representa un catión a la izquierda y un anión a la derecha, en meq/L. Los valores en cada eje están conectados por líneas mostrando un patrón típico para una composición de agua dada (Appelo & Postma, 2005). Al examinar el diagrama de Stiff se puede obtener una estimación visual rápida de los iones predominantes en la muestra.

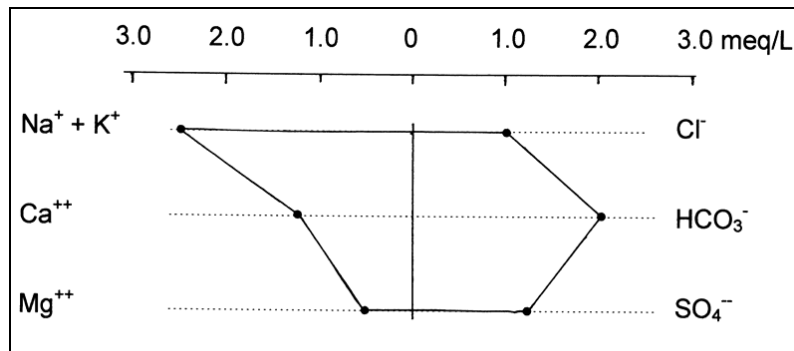


Figura 5. Diagrama de Stiff para una muestra de agua dada. Tomado de BV, D. C., & Hydraulics, D., 1999a.

4.4.4 Balance iónico. El error en un balance de iones se puede escribir con la siguiente formula (Appelo and Postma, 2005):

$$\text{Electrical Balance (E.B., \%)} = \frac{(\text{Sum cations} + \text{Sum anions})}{(\text{Sum cations} - \text{Sum anions})} \times 100$$

donde los cationes (Na⁺, K⁺, Mg²⁺ y Ca²⁺) y aniones (Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻ y NO₃) se expresan en meq/L y se introducen con su signo de carga en la formula. Para aguas subterráneas y aguas superficiales, el % de error debe ser menor que 10 (BV, D. C., & Hydraulics, D., 1999a). Si es mayor, hay que verificar los resultados y posiblemente reanalizar las muestras.

4.4.5 Metales tóxicos. Algunos metales presentes en el agua son tóxicos incluso en pequeñas concentraciones, tales como As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Ni y Zn (BV, D. C., & Hydraulics, D., 1999b). A continuación, abordamos de manera más detallada la presencia de As y Pb en las aguas subterráneas debido a que estas especies químicas fueron analizadas en este estudio.

4.4.5.1 Arsénico. El As es un elemento ampliamente distribuido en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera. En la corteza terrestre se encuentra presente en su mayoría en minerales sulfuros de arsénico, arseniatos y arseniuros metálicos. El As en el ambiente se asocia principalmente con dos fuentes: a) procesos naturales como la meteorización de minerales mena de As (OMS, 2003; Alonso *et al.*, 2014), la actividad biológica y las emisiones volcánicas y b) las actividades humanas como la minería, los procesos industriales, la fundición de metales, la producción de pesticidas y de conservantes para madera, y el uso de combustibles fósiles (Alonso *et al.*, 2014). Las concentraciones en aguas naturales generalmente son entre 1-2 $\mu\text{g/L}$, aunque pueden ser mayores (hasta 12 mg/L) en zonas con ocurrencia natural de As. Desde el 2003, la OMS ha recomendado un nivel máximo aceptable de 10 $\mu\text{g/L}$ en agua potable.

4.4.5.1.1 Ocurrencia de As en Colombia. En un artículo de revisión bibliografía sobre la ocurrencia de As en el territorio colombiano (Alonso *et al.*, 2014) se encontró que el As típicamente ocurre en forma de arsenopirita asociada con minerales mena de oro en varias partes del país que se relacionan con vulcanismo Neo-Terciario; se han reportado altos niveles de As ($> 40 \text{ mg/kg}$) en suelos y sedimentos en los departamentos de Chocó (Cordillera Occidental), Caldas y Tolima (Cordillera Central) y en Santander (Cordillera Oriental). Tales zonas donde hay ocurrencia natural de minerales que contienen As pueden ser propensas a que el agua subterránea presente contaminación mixta, es decir, tanto por los procesos de meteorización química de minerales enriquecidos en As, así como por la actividad minera. Entre los estudios en aguas subterráneas cercanos a la zona de estudio, Espinosa y Sierra (2015) analizaron el contenido de As y Pb presente en aguas subterráneas de 4 pozos profundos de la Formación

Bucaramanga. Las concentraciones de As encontradas son inferiores a 0,64 $\mu\text{g As/L}$. Por otro lado, las concentraciones de Pb en el agua subterránea fueron $<0,21 \text{ mg Pb/L}$. Tales niveles de As en el agua subterránea no superan los límites establecidos por la OMS y la legislación colombiana. Con respecto a los niveles de Pb encontrados en el agua subterránea $<0,21 \text{ mg Pb/L}$, solo hay certeza de que puede usarse para irrigación debido a que los niveles están por debajo del límite máximo de 5,0 mg Pb/L propuesto en la legislación colombiana.

4.4.5.2 Plomo. El Pb es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre. Su uso generalizado ha dado lugar a una contaminación importante. Entre las principales fuentes de contaminación ambiental destacan la explotación minera, la metalurgia, las actividades de fabricación y reciclaje y, en algunos países, el uso persistente de pinturas y gasolinas con aditivos de plomo (OMS, 2003).

Las concentraciones de Pb en el agua superficial y el agua subterránea por lo general son bajas de forma natural, debido a que la mayoría de carbonatos de Pb (por ejemplo, PbCO_3 y PbCO_4) y sulfatos de Pb tienen bajas solubilidades (Mora, 2002). Sin embargo, se han reportado niveles muy altos de Pb frecuentemente asociados con áreas de mineralización y actividad de minas antiguas (Mora, 2002). La mayoría del Pb en el agua potable proviene de fontanería domésticas que contienen Pb; y rara vez se debe a la disolución de fuentes naturales. De acuerdo con la OMS (OMS, 2003) las concentraciones de Pb en el agua potable son, por lo general, menores que 5 $\mu\text{g/L}$, aunque se han medido concentraciones $>100 \mu\text{g/L}$ en fontanerías con Pb.

4.4.5.2.1 Ocurrencia de Pb en Colombia. En Colombia existen algunos departamentos propensos a la contaminación por Pb como producto de la explotación aurífera, como es el caso de Nariño, Quindío, Chocó y Antioquia (Sarmiento, 2002). Además, en la literatura se han reportado manifestaciones de sulfuros de Pb en la Cordillera Oriental que se hallan restringidas a unidades litoestratigráficas del Cretácico (pre-Turoniano) (Sarmiento, 2002).

La presencia de Pb en el agua subterránea ha sido poco estudiada en el país. En el apartado anterior (“*Ocurrencia de As en Colombia*”) se mencionó el estudio realizado por Espinosa y Sierra (2015) quienes encontraron concentraciones $<0,21$ mg Pb/L en el agua subterránea de pozos profundos de la Formación Bucaramanga.

4.4.6 Parámetros fisicoquímicos. A continuación, se hace una breve descripción teórica de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* para las muestras de agua subterránea analizadas en este trabajo.

4.4.6.1 Conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica mide la facilidad de un agua para conducir la corriente eléctrica y su valor aumenta con el tenor de sales disueltas en forma de iones. En aguas subterráneas los valores de conductividad eléctrica se miden en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (= $\mu\text{mho}/\text{cm}$). Este parámetro aumenta con la temperatura (Collazo y Montaña, 2012). La legislación colombiana recomienda un valor máximo de $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ para el agua de consumo humano y doméstico (ver Tabla 4).

4.4.6.2 pH. Es la medida de la concentración de hidrogeniones del agua o de la solución. Es igual a $-\log(\text{H}^+)$, el logaritmo negativo de la actividad de H^+ . El pH está controlado por las

reacciones químicas y por el equilibrio entre los iones presentes. En las aguas subterráneas varía entre 6,5 y 8,5 (Hem, 1985).

4.4.6.3 Temperatura. La temperatura en las aguas subterráneas es poco variable y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar (Collazo y Montaña, 2012). En profundidad depende del gradiente geotérmico, que aumenta 1° cada 30 m de profundidad.

4.4.6.4 Sólidos totales disueltos. La concentración de las sales presentes en forma iónica en el agua se mide como *TDS (Total Dissolved Solids)*. Como una aproximación, las aguas que tienen menos de 1500 mg/L de TDS se pueden considerar aguas frescas (BV, D. C., & Hydraulics, D., 1999b).

5 Metodología

La metodología para la caracterización hidroestratigráfica del Miembro Órganos Superior se dividió en cuatro etapas. A continuación, se presenta una descripción detallada de cada etapa:

5.1 Revisión bibliográfica

Con el fin de desarrollar y alcanzar los objetivos planteados, se realiza una compilación bibliográfica de toda la información disponible, tanto en medio físico como digital. El material bibliográfico es obtenido principalmente de la base de datos de la Universidad Industrial de

Santander e INGEOMINAS. Nos enfocamos en estudios realizados en un área igual o menor a nuestra área de estudio. En esta etapa se obtiene la información de las condiciones geológicas e hidrogeológicas del área de interés. Una vez finalizada esta etapa, es posible planificar adecuadamente las siguientes etapas.

5.2 Cartografía

En el trabajo de cartografía se elaboró un mapa geológico del área de estudio a escala 1:10.000. La posición y altitud de los afloramientos se midieron utilizando un GPS manual (con una precisión estimada de $\pm 2-5$ m). Para la descripción de las rocas en el terreno se tomó como guía la metodología de trabajo del Proyecto Cretácico (Etayo, 1985). De acuerdo con esta metodología inicialmente se determina la proporción de grava, utilizando tablas comparativas de porcentajes. En nuestro trabajo se utilizaron las imágenes para la estimación del porcentaje de minerales en una muestra de Scholle (1979). De igual manera se determina la proporción arena lodo. Seguidamente, las imágenes comparativas de tamaño de grano de Miall (1990), son utilizadas para determinar el tamaño de grano de cada una de las fracciones detríticas presentes en la muestra (cada una se trata de manera independientemente). Posteriormente se determina el calibrado de la fracción grava-arena, utilizando las imágenes de calibrado de las partículas de Pettijhon (1987). Finalmente se determina la redondez de los granos teniendo en cuenta los términos de grado de redondeamiento y esfericidad de las partículas según Powers (1953).

Por otro lado, se realizó la descripción del miembro Órganos en tres secciones estratigráfica a escala 1:50 medidas por el método del bastón de Jacob y poligonal. Teniendo en cuenta el Sistema de clasificación de Facies de Miall (1985), se identificaron 7 litofacies y 3 asociaciones

de litofacies en el miembro Órganos Superior. También se identificaron las estructuras sedimentarias características y los procesos de transporte particulares.

5.3 Levantamiento de *ERT*

En esta etapa se llevó a cabo un levantamiento *ERT* para revelar la caracterización subsuperficial, en particular para investigar el posible sistema acuífero debajo del área de estudio. En consecuencia, se obtuvieron datos de resistividad 2D a lo largo de 3 perfiles en el área de estudio y los datos se invirtieron mediante una técnica de inversión tomográfica. La distribución y contrastes de los valores de resistividad eléctrica determinados tanto hacia profundidad como lateralmente, permiten la delimitación geométrica de las litofacies presentes en la parte superior del Miembro Órganos, así como su diferenciación textural y saturación.

5.3.1 Ubicación de las líneas *ERT*. Para la campaña de levantamiento de tomografías eléctricas de resistividad (*ERT*) se seleccionaron aquellos terrenos que cumplieran la condición de ser aproximadamente horizontales (Figura 6) en el sector del Anillo vial (Girón), hacia el suroccidente del Abanico aluvial de Bucaramanga. Se levantaron tres tomografías eléctricas de resistividad (*ERT's*). En la Figura 7 se muestra la localización de las líneas *ERT* en la zona de estudio y en la Tabla 7 pueden verse las coordenadas planas (Datum Magna Sirgas con origen Bogotá) y longitud de las mismas.

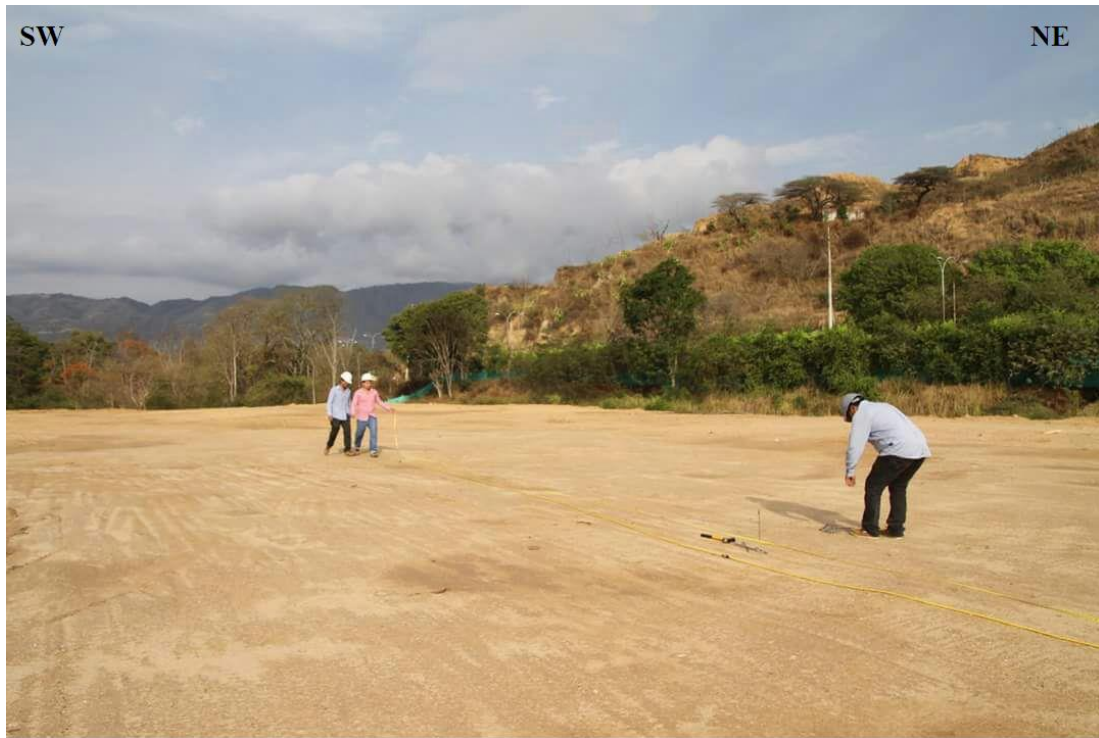


Figura 6. Terreno plano perteneciente a ISMOCOL ubicado en el Anillo Vial, en el cual se hizo un levantamiento de ERT de 550 m.

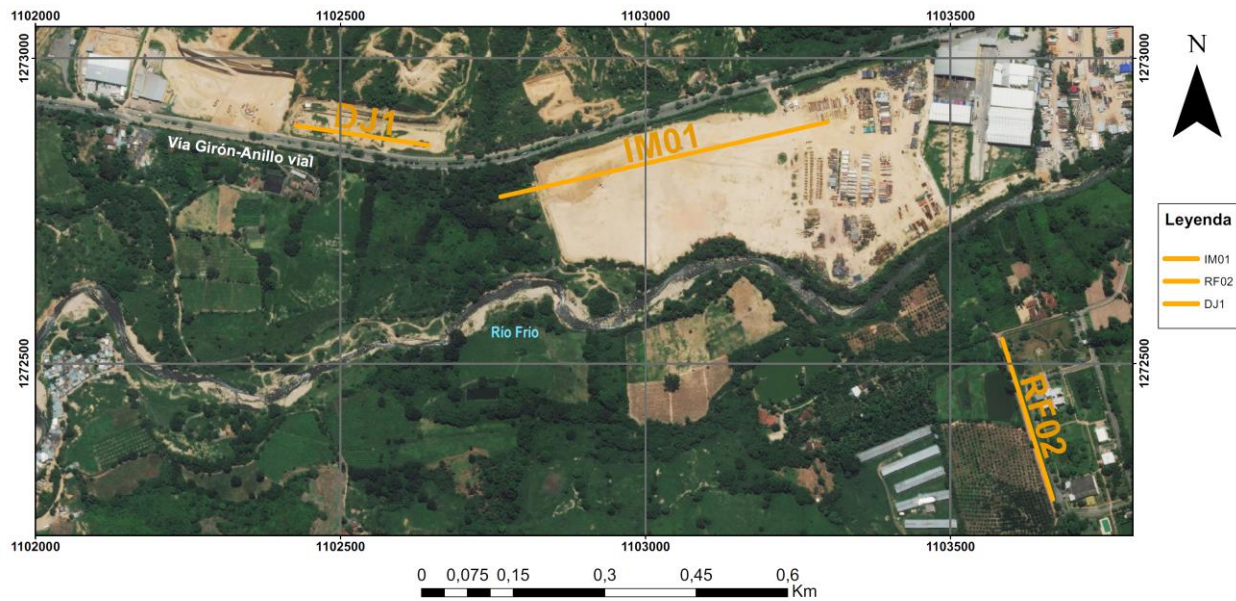


Figura 7. Localización de las tomografías de resistividad eléctrica (ERT's). Tomado y Modificado de: DigitalGlobe Basemap, 2015.

Tabla 7.

Localización de las tomografías de resistividad eléctrica (ERT's).

Línea ERT	Coordenadas planas		Longitud [m]	Espaciado de electrodos [m]
	Punto inicial (X _i , Y _i)	Punto final (X _f , Y _f)		
DJ1	1272857.39 ; 1102646.88	1272890.19 ; 1102424.62	220	4
IM01	1272894,96 ; 1103300.93	1272773.25 ; 1102763.82	550	10
RF02	1272275.12 ; 1103668.87	1272540.41 ; 1103584.91	275	5

5.3.2 Adquisición de datos. La adquisición de datos de tomografía de resistividad eléctrica se realizó por medio del equipo AGI modelo *Supersting* R8/IP (Figura 8), el cual pertenece al grupo de investigación GEOMÁTICA de la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS. Los datos de las tres líneas levantadas sobre el área de estudio fueron recolectados usando el arreglo de electrodos Wenner-Schlumberger, debido a su buena resolución horizontal y alcance en profundidad del terreno. Los datos de ERT se recolectaron a principios del mes de marzo del 2017 (inicio de la temporada de lluvias) evitando que la investigación se viera afectada por el aumento de los efectos estacionales. Los electrodos se extendieron en línea recta en los tres levantamientos. Para medir la longitud y espaciado entre los electrodos se usó un odómetro (Figura 9) y cinta métrica. Los pines se introdujeron algunos centímetros en el suelo con ayuda de un martillo para garantizar el contacto entre el suelo y los electrodos (Figura10). La línea DJ1 tiene una extensión de 220 m y espaciado de 4 m entre los electrodos, la tomografía IM01 una separación de electrodos de 10 m y una longitud de 550 m, y la tomografía RF02 un espaciado de electrodos de 5 m y longitud de 275 m.



Figura 8. Equipo AGI Supersting R8 utilizado en los levantamientos *ERT*. El equipo está compuesto por una CPU, una *switch box*, una batería 12V, 8 cables, 56 electrodos y 56 pines.



Figura 9. El Odómetro es utilizado para medir la longitud de la línea *ERT*.



Figura 10. Los electrodos se disponen en línea recta para el levantamiento *ERT*. Se puede ver el contacto entre el suelo y el electrodo a través del pin. El espaciado entre los electrodos fue de 10 m en este caso, dando una longitud de línea *ERT* de 550 m en ISMOCOL (IM01).

5.3.3 Procesamiento de datos. Los datos se procesaron utilizando el software *EARTHIMAGER 2D* de la empresa AGI (licencia de uso del grupo GEOMÁTICA-UIS), el cual utiliza una técnica de inversión tomográfica 2D, que invierte los datos de resistividad aparente medidos en campo para obtener una distribución de resistividad verdadera del subsuelo. El método de inversión utilizado fue *Smooth Model Inversion* y modelado por medio de elementos finitos, debido a que es un modelo estable, robusto y es recomendable para todos los tipos de datos (AGI, 2009). El objetivo principal del proceso de inversión es reducir el desajuste entre los datos de las mediciones de campo y los datos calculados del modelo reconstruido. El error *RMS* representa este desajuste. Por lo tanto, un valor de *RMS* bajo indica una buena concordancia

entre el modelo pronosticado de resistividad y los datos medidos. En la Figura 11 se encuentran los parámetros de inversión utilizados en el procesamiento de los datos:

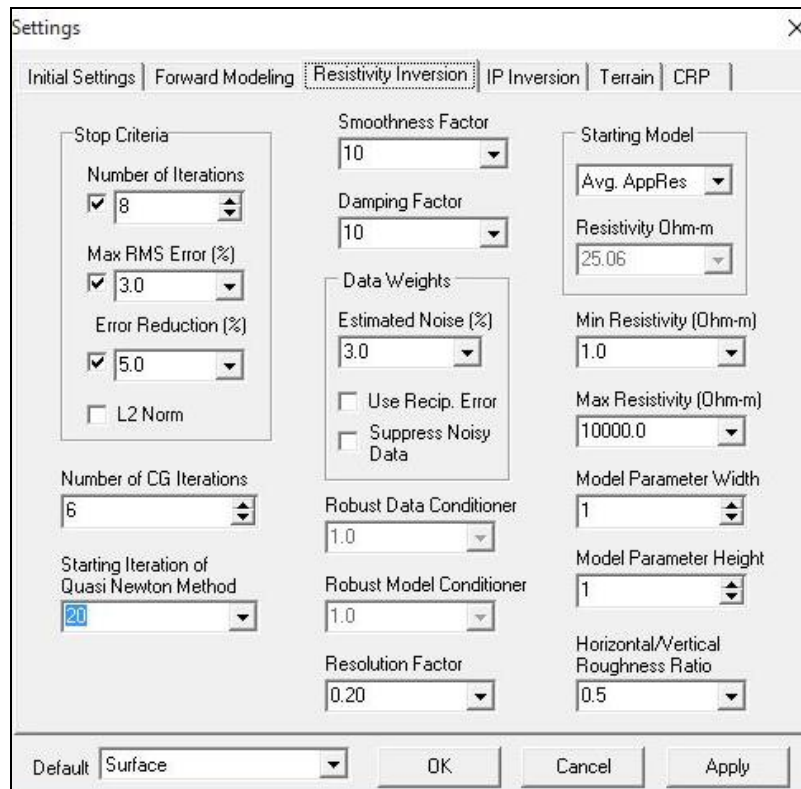


Figura 11. Parámetros establecidos para la inversión en el software *EARTHIMAGER 2D*.

5.4 Hidrogeoquímica

En esta fase describimos los procedimientos y métodos analíticos llevados a cabo para determinar la composición química de las muestras recolectadas de pozos profundos que captan agua subterránea de la parte superior del Miembro Órganos.

5.4.1 Selección y ubicación de los puntos de muestreo. Después de una revisión bibliográfica, principalmente del Inventario de puntos de agua (Rodríguez y Torres, 2011), se seleccionaron dos pozos profundos, “Prevesa” e “Insercol”, los cuales están captando agua subterránea de la parte superior del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga. Adicionalmente, estos pozos ya habían sido objeto de estudio previamente por Espinosa y Sierra (2015), sin embargo, en ese estudio únicamente se midieron los niveles de As y Pb presentes en el agua subterránea. En general, hasta el momento no se había llevado a cabo ningún estudio acerca de la hidrogeoquímica del acuífero profundo de la Formación Bucaramanga.

En la Figura 12, se puede ver que los pozos profundos se ubican hacia la escarpa occidental del Abanico de Bucaramanga. El relleno sanitario “El Carrasco” se encuentra relativamente cerca a estos dos pozos. La Tabla 8 muestra las coordenadas planas (origen Bogotá) de los pozos profundos analizados.

Tabla 8.

Localización de los pozos profundos analizados que captan agua subterránea de la parte superior del Miembro Órganos.

Pozo profundo	Este (m)	Norte (m)	Altura (m.s.n.m.)	Prof. del pozo (m)
Insercol	1100923,02	1275383,20	708,5	42
Prevesa	1103499,01	1273093,17	742,5	>57,6*

*Profundidad del nivel de la tabla de agua reportada por Rodríguez y Torres (2011).

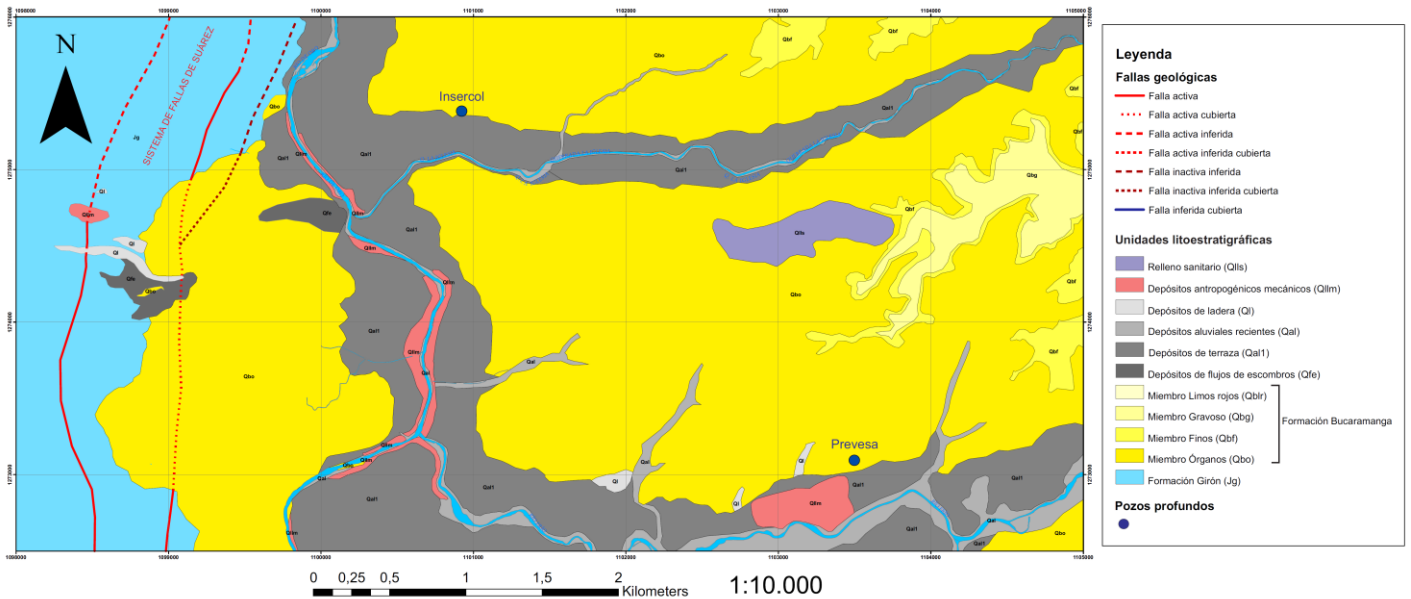


Figura 12. Localización de los pozos profundos analizados en el Miembro Órganos, hacia la escarpa W del Abanico Aluvial de Bucaramanga.

5.4.2 Muestreo. El muestreo de agua subterránea se realizó en dos campañas. El primer muestreo se realizó el 22 de febrero de 2016 en el pozo profundo “Insercol” en época de verano. El segundo muestreo fue el 16 de marzo de 2017, fecha que corresponde al inicio de la época de lluvias, en los pozos profundos “Insercol” y “Prevesa”. En total, se analizaron dos muestras de agua subterránea del pozo profundo “Insercol”, una en 2016 y otra en 2017; y una muestra que corresponde al pozo profundo “Prevesa” en 2017. Para cada muestra se midió *in situ* los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura, conductividad eléctrica y TDS con equipos portables. En cada pozo se tomaron dos muestras (la segunda como contramuestra) para posterior análisis de iones mayoritarios, As y Pb en el Laboratorio de Consultas Industriales UIS ubicado en el campus central. Para el muestreo se utilizaron botellas plásticas de 250 mL, primero se llenó con el agua a analizar, se cerró el envase y agitó con fuerza para enjuagar, por último, se desechó esta agua; este proceso se repitió 3 veces para curar el envase antes de realizar la toma

de muestra. Luego de recolectar la muestra los envases fueron rotulados con el nombre del pozo profundo, coordenadas, fecha de muestreo y la información recolectada en campo (pH, Temperatura, C.E. y *TDS*). Finalmente, las muestras fueron llevados al Laboratorio de Consultas Industriales UIS para los análisis posteriores.

5.4.3 Análisis de parámetros fisicoquímicos. Los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura, solidos totales disueltos (*TDS*, por sus siglas en ingles) y conductividad eléctrica (CE) se midieron *in situ* en los pozos muestreados.

Para la medición del pH en las muestras de agua subterránea se utilizó el medidor portátil de pH SevenGo Duo SG23 marca METTLER TOLEDO, propiedad del GPH (Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático) de la UIS. Antes de realizar las mediciones se lavó el electrodo del equipo con agua destilada. Posteriormente, cuando se estabilizaron las lecturas del equipo se registró el pH de la muestra. Por ejemplo, en la Figura 13 se puede ver como se midió el pH en el pozo profundo “Prevesa”, la lectura fue 6,56.

Los análisis de temperatura, solidos totales disueltos (*TDS*) y conductividad eléctrica (CE) se midieron con el equipo portátil de conductividad SevenGo Duo SG23 marca METTLER TOLEDO, también propiedad del GPH (Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático) de la UIS. Las mediciones se realizaron de manera similar a la del pH. En la Figura 14, se muestran los valores registrados por el equipo para estos parámetros fisicoquímicos en el agua subterránea del pozo profundo “Prevesa”. Los resultados de estas mediciones se presentan más adelante, en el capítulo de resultados “6.4. Hidrogeoquímica del agua subterránea del Miembro Órganos Superior”.



Figura 13. Medición in situ del pH con el equipo portátil SG23 marca METTLER TOLEDO.



Figura 14. Valores de temperatura, TDS y CE medidos en campo con el equipo portátil SG23 marca METTLER TOLEDO.

5.4.4 Análisis del laboratorio. Las muestras de agua subterránea fueron analizadas en el Laboratorio de Consultas Industriales de la UIS en el campus central, en Bucaramanga, Santander. El laboratorio determinó las concentraciones de Sodio, Calcio, Potasio, Magnesio, Carbonatos, Bicarbonatos, Sulfatos, Cloruros, Hidróxidos, Nitratos, Nitritos, Manganeso, Hierro, Arsénico y Plomo. Los métodos analíticos seguidos por el laboratorio se resumen en la Tabla 9.

Los resultados completos de los análisis fisicoquímicos entregados por el laboratorio para cada muestra se pueden consultar en los Apéndices A y B.

Tabla 9.

Métodos analíticos utilizados por el Laboratorio de Consultas Industriales UIS.

Parámetro	Métodos analíticos
Arsénico (As)	Absorción Atómica-Generación de Hidruros / SM 3030 F y SM 3114 C
Plomo (Pb)	Absorción Atómica /SM 3030 E y SM 3111 B
Sodio (Na)	Absorción Atómica /SM 3030 E y SM 3111 B
Hierro (Fe)	Absorción Atómica /SM 3030 E y SM 3111 B
Calcio (Ca)	Absorción Atómica/ SM 3030 E y SM 3111 D
Magnesio (Mg)	Absorción Atómica/ SM 3030 E y SM 3111 B
Manganeso (Mn)	Absorción Atómica/ SM 3030 E y SM 3111 B
Potasio (K)	Absorción Atómica/ SM 3030 E y SM 3111 B
Carbonatos (CO_3^{-2})	Titrimétrico / SM 2320 B
Bicarbonatos (HCO_3^-)	Titrimétrico / SM 2320 B
Cloruros (Cl^-)	Titrimétrico / SM 4500-Cl- B
Hidróxidos (OH^-)	Titrimétrico / SM 2320 B
Nitritos (NO_2^-)	Espectrofotométrico / SM 4500-NO2
Sulfatos (SO_4^{-2})	Turbidimétrico / SM 4500- SO4
Nitratos (NO_3^-)	Espectrofotométrico / RODIER

6 Resultados

6.1 Cartografía

El área de estudio se encuentra en la escarpa W del Abanico Aluvial de Bucaramanga. Se realizó un mapa geológico a escala 1:10.000, donde se cartografiaron 52,5 km² (Figura 15). Existen dos

unidades litoestratigráficas principales en el área de estudio, la Formación Bucaramanga y la Formación Girón.

Los afloramientos de la Formación Girón se encuentran principalmente en la parte W del área de estudio, por la vía que conecta en municipio de Girón con el Aeropuerto Palonegro. También se presenta en afloramientos sobre la vía Girón-La Costa, en cercanías al barrio Café Madrid. La Formación Girón presenta altos buzamientos y fracturamiento debido a la actividad tectónica asociada al sistema de fallas del Suárez, la intercepción entre los planos de estratificación y de fracturamiento generan movimientos en masa (Figura 16). La Formación Girón está en discordancia angular con la Formación Bucaramanga (Figura 17). Afloramientos locales permiten observar un conjunto grueso de areniscas, conglomerados y limolitas color marrón rojizo. Las areniscas se disponen en forma tabular y comúnmente presentan estratificación cruzada, plano paralela y lentes de lodolitas dentro de ellas.

La Formación Bucaramanga es un depósito subhorizontal y reposa en contacto disconforme sobre las rocas más antiguas de la Formación Girón (Figura 17).

El Miembro Órganos presenta evidencia de haber sido afectado por la neotectónica de la zona (Figura 18). Cubre ampliamente la zona de interés y es un depósito aproximadamente horizontal. Es una unidad principalmente de litofacies de grano grueso, con clastos de composiciones ígneo-metamórficas, cuya área fuente es el Macizo de Santander. La estratificación es de indiferenciada a ausente.

En cuanto a su textura se observan clastos bien redondeados y otros angulares (redondez bimodal). Presenta gradaciones inversas y normales, pasando de niveles finos a gruesos rápidamente y viceversa. Predominancia de canales de arenas de grano grueso de hasta 60 cm de

espesor, los cuales desaparecen lateralmente dentro de las gravas. Los niveles lodosos presentan un color blanco, con geometría tabular.

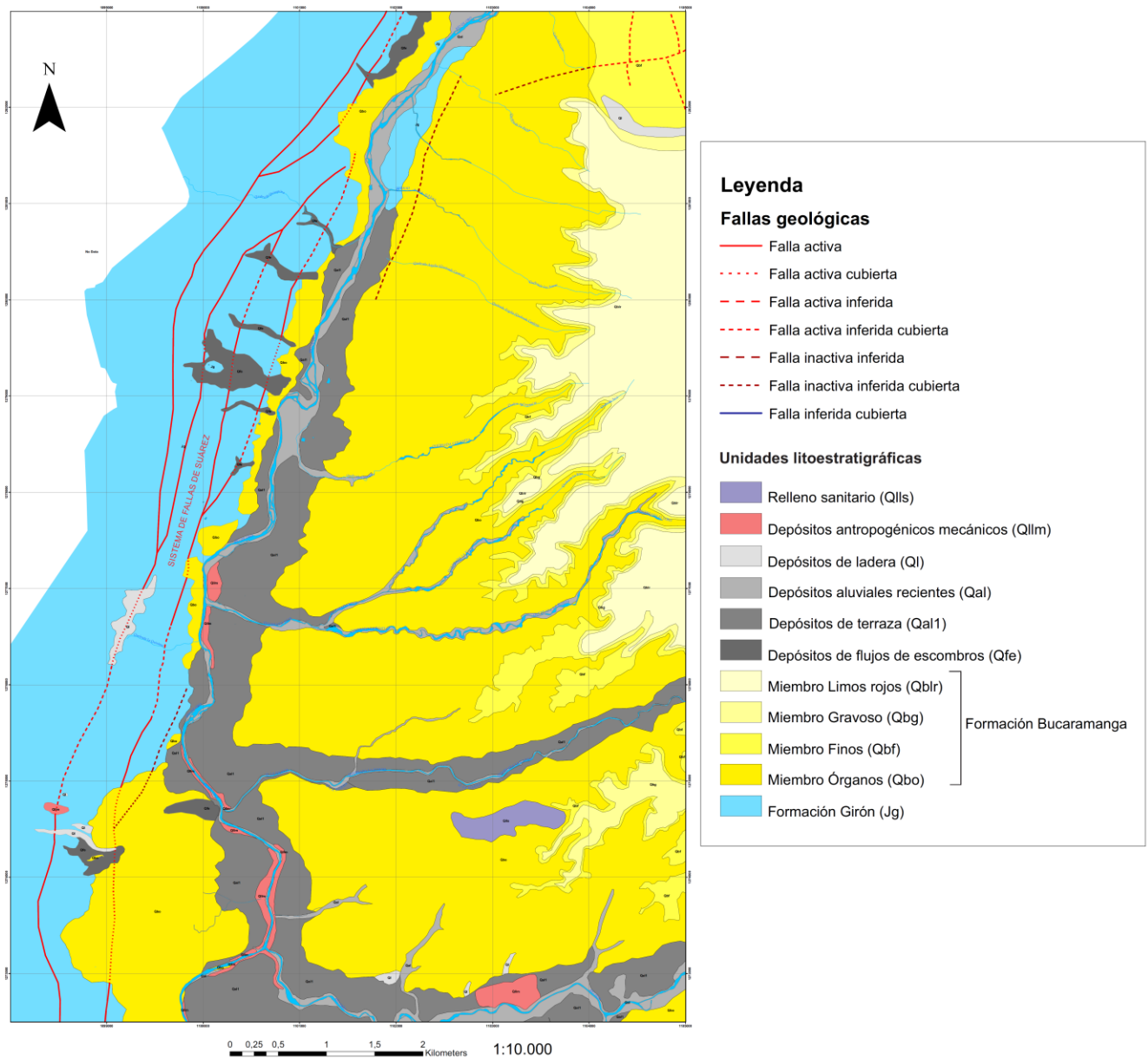


Figura 15. Mapa geológico del área de estudio. Escala 1:10.000.

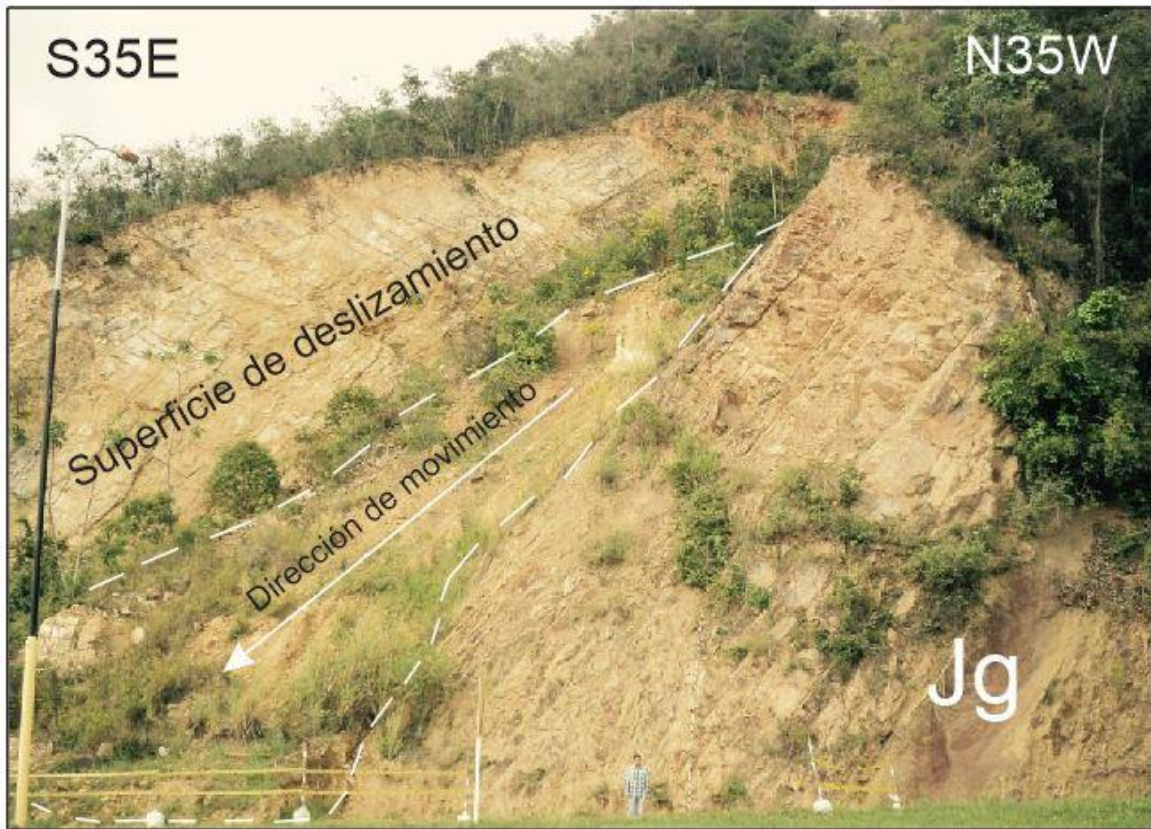


Figura 16. Formación Girón por la vía Girón-Aeropuerto Palonegro. Fallamiento en cuña produce procesos de remoción en masa.

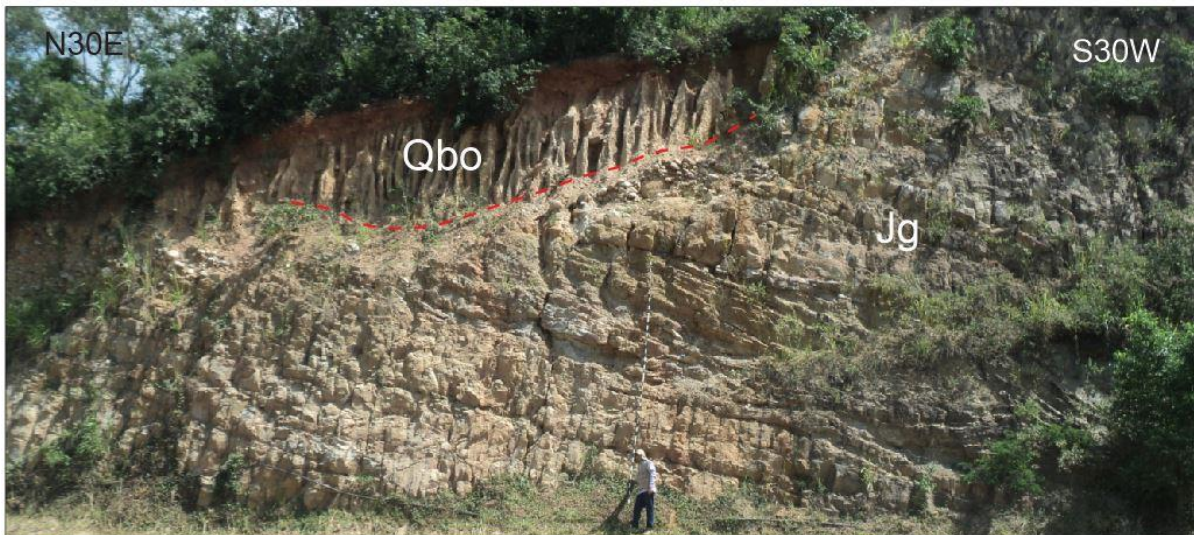


Figura 17. Capas tabulares de areniscas de la Formación Girón. El Miembro Órganos reposa en contacto disconforme sobre las rocas más antiguas de la Formación Girón.

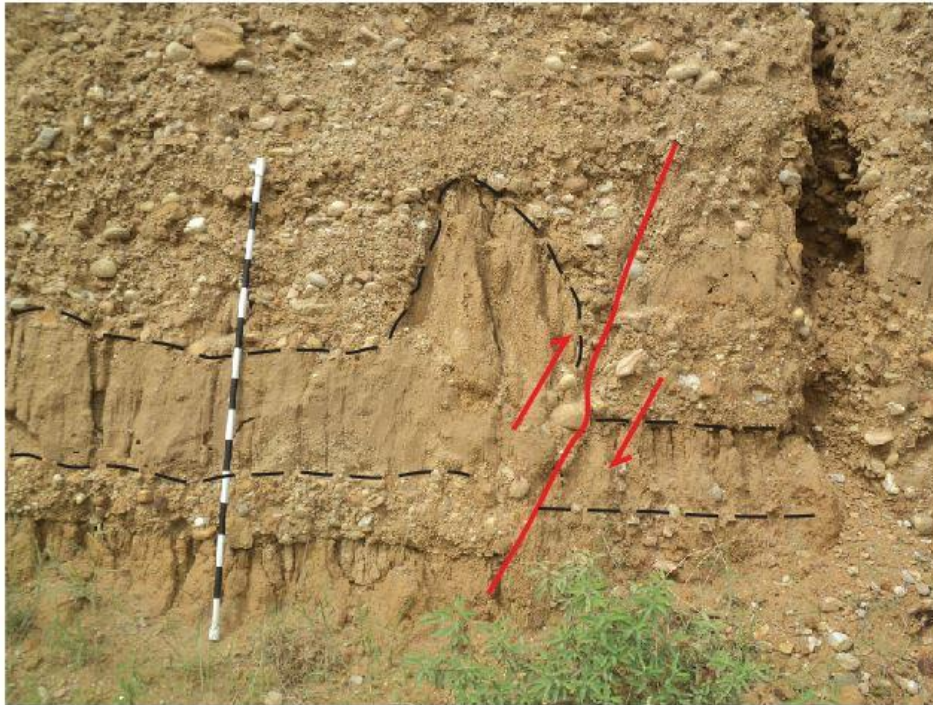


Figura 18. Actividad neotectónica en el Miembro Órganos, por el Barrio Carrizal, Girón. Es una falla inversa.

El Miembro Finos es una sucesión de capas aproximadamente horizontales espesor medio y geometría tabular bien definida (Figura 19). Son niveles principalmente lodosos de color gris y pardo, que alternan con niveles arenolodosos. Se observa laminación plana paralela y ondulada (Figura 20). En contacto neto plano paralelo con el infrayacente Miembro Órganos (Figura 21). Los niveles lodosos también pueden presentar color negro, gris, pardo, rojizos (Figura 22) y alternan con niveles lodoarenosos y arenolodosos. Se observa una tendencia granulométrica negativa, predominando en el tope los niveles arenolodosos. Se interpreta como un ambiente lagunar.

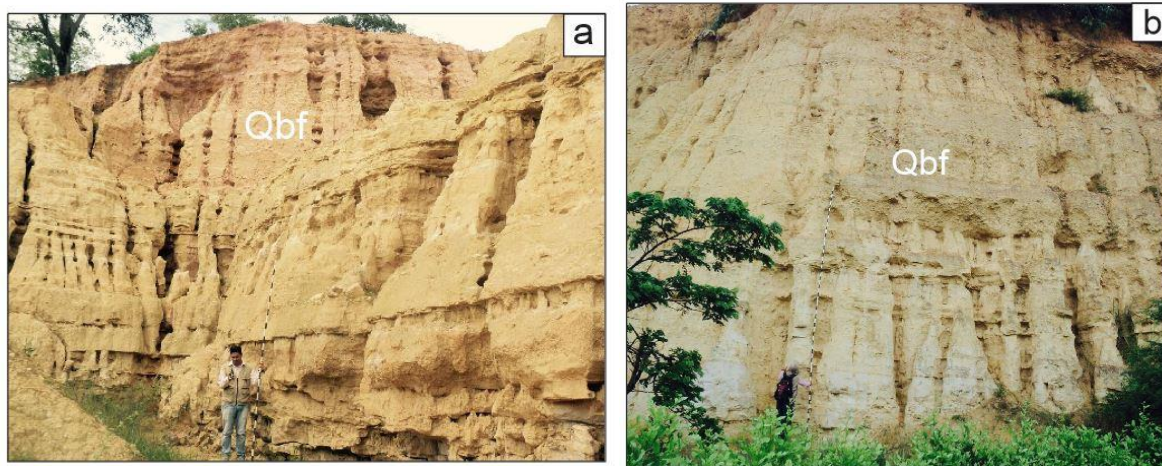


Figura 19. Sucesión de capas horizontales de espesor medio y geometría tabular bien definida del Miembro Finos. a) Carreteable que conecta el Anillo Vial con el Barrio Porvenir. b) Vía Bucaramanga-Girón por la Calle 65.

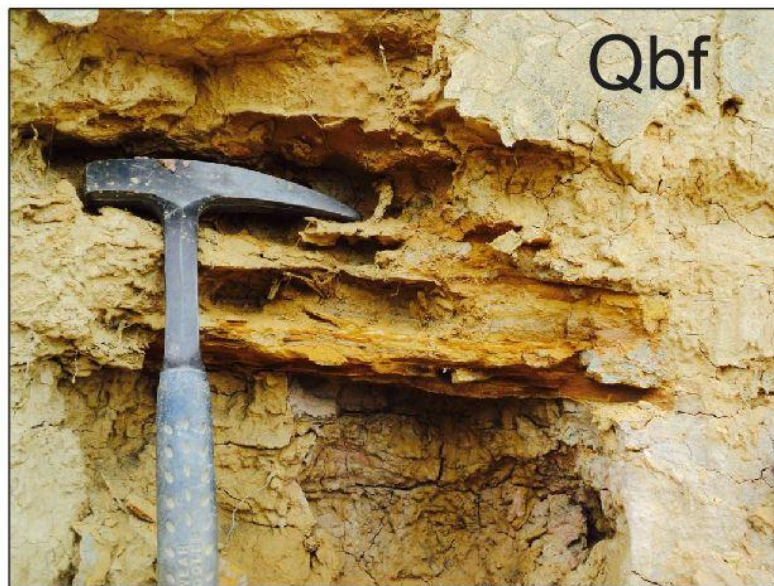


Figura 20. Laminación ondulada en el Miembro Finos. Carreteable que conecta el Anillo Vial con el Barrio Porvenir.

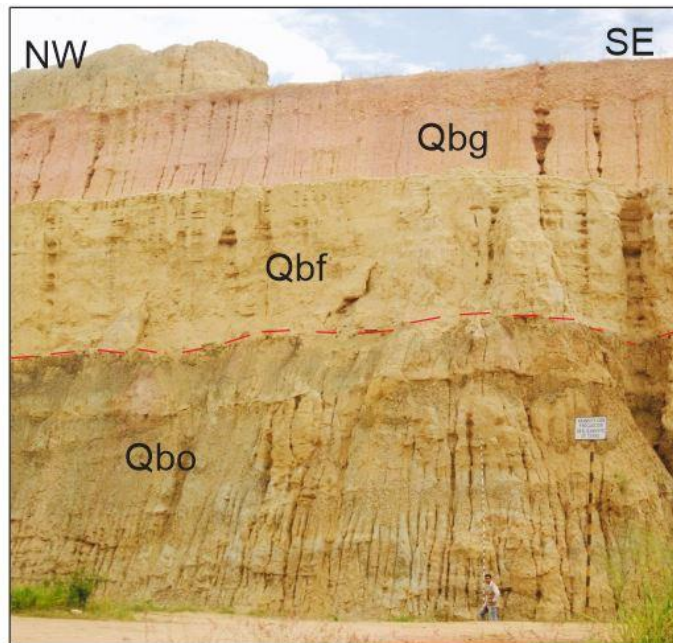


Figura 21. Contacto entre el Miembro Órganos, Miembro Finos y Miembro Gravoso de la Formación Bucaramanga. El Miembro Finos reposa sobre el Miembro Órganos en contacto neto plano paralelo. El contacto entre el Miembro Finos y Gravoso es difuso. Carreteable que conecta el Anillo Vial con el Barrio Porvenir.

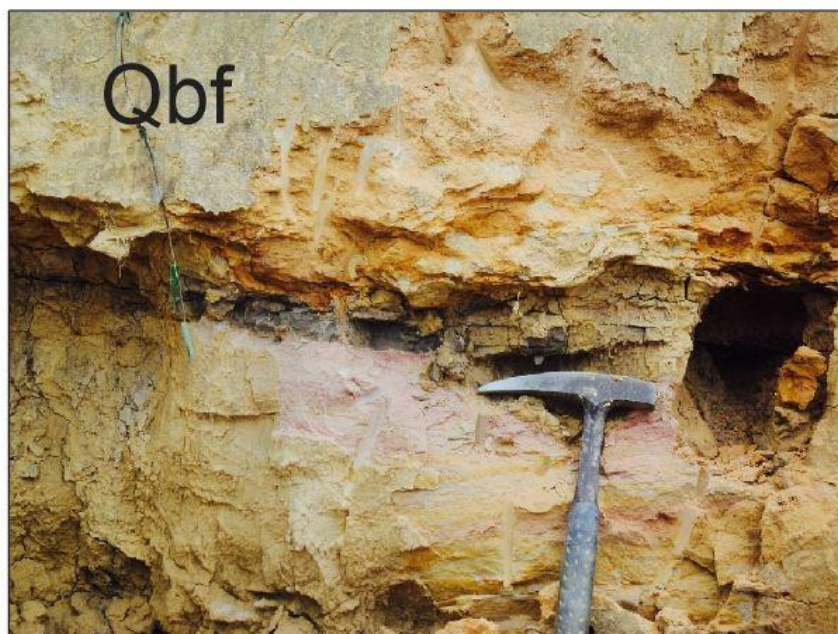


Figura 22. Niveles lodosos con coloración negro, gris, pardo y rojizo en el Miembro Finos. Carreteable que conecta el Anillo Vial con el Barrio Porvenir.

El Miembro Gravoso presenta una estratificación pobremente desarrollada, aproximadamente horizontal con base en el contacto basal de este miembro. Está constituido por grava areno lodosa. Las guijas presentan una forma redondeada y moderadamente esférica, soportada con matriz areno lodosa, de coloración pardo-rojiza, mal calibrado (Figura 23). Los clastos son de composición variada, principalmente de litologías sedimentarias (cuarzoarenitas y litarenitas), metamórficas (neis micáceo) e ígneas (granitoides). Niveles arenosos se acuñan lateralmente desarrollando geometría lenticular dentro de este nivel gravoso masivo el cual presenta gradación negativa al tope. Se interpreta como un flujo de escombros.



Figura 23. Miembro Gravoso. Carreteable que conecta el Anillo Vial con el Barrio Porvenir.

6.2 Análisis de litofacies

La identificación de las asociaciones de litofacies en el Miembro Órganos Superior amplía el conocimiento geológico de la zona y juega un papel importante para la hidrogeología, ya que creemos que ciertas litofacies son de interés, en cuanto al almacenamiento de aguas subterráneas. Este análisis se basa en descripciones realizadas en la campaña de campo. Pudimos discernir 7 litofacies principales (Tabla 10), identificadas en base a la textura del sedimento, la fábrica de los clastos, tipo de matriz, litología, estructuras sedimentarias y geometría de las capas.

El Miembro Órganos Superior se describe en términos de tres asociaciones de litofacies (Tabla 11). Se han reconocido seis litofacies en el Abanico Proximal (AL1), siete litofacies en el Abanico Medio (AL2) y tres litofacies en el Abanico Distal (AL3). Las asociaciones de facies se distribuyen radialmente en el orden de AL1, AL2 y AL3 desde el ápice, apreciándose como estas facies migran a través del tiempo lateral y verticalmente (Ley de Walter). Las facies identificadas en el presente estudio son el producto final de unos procesos de transporte particulares, principalmente de remoción en masa o gravitacionales para la porción proximal, y de transporte de lecho, saltación y suspensión principalmente para el abanico medio y distal.

6.2.1 Litofacies del Miembro Órganos Superior.

6.2.1.1 Grava masiva, matriz soportada (Gmm). Esta facies gravosa se caracteriza por tener una fábrica matriz soportada y varía de arenolodosa a gravo arenolodosa, el amplio rango de tamaño de grano le otorga un mal calibrado (esporádicos clastos alcanzan 50 cm de diámetro). Esta facies puede oscilar de tamaños de grano gránulo a guijarros no esféricos/subredondeados.

Poseen una estructura masiva (Figura 24). No presenta gradación evidente. Puede alcanzar los 13 metros de espesor (capas muy gruesas). Los clastos son de composición variada, identificándose litologías metamórficas, ígneas y sedimentarias. Se encontraron rocas compactas y meteorizada correspondientes a Neis Hornbléndico débilmente foliado de grano medio, con alternancia de tonos blancos (Cuarzo y Plagioclasa) y negros brillantes (principalmente Hornblenda y en menor proporción Biotita), alternados en bandas de acuerdo con la estructura néisica. Clastos de mármol y anfibolitas se encontraron en menor frecuencia. Por otro lado, se encontraron rocas ígneas mineralógicamente compuesta de Cuarzo en su mayoría, con porcentaje de Plagioclasa en menor proporción, de color blanco lechoso, los cuales se clasificaron como granitoides ricos en cuarzo. También se encontraron litologías sedimentarias como cuarzoarenitas, lodolitas y litarenitas. De acuerdo con el sistema de clasificación de facies de Miall, la litofacies Gmm se interpreta como flujo de derrubios de alta densidad (Miall, 1985). La gravedad fue el principal agente de transporte de los sedimentos, y el agua pudo estar en menor proporción.

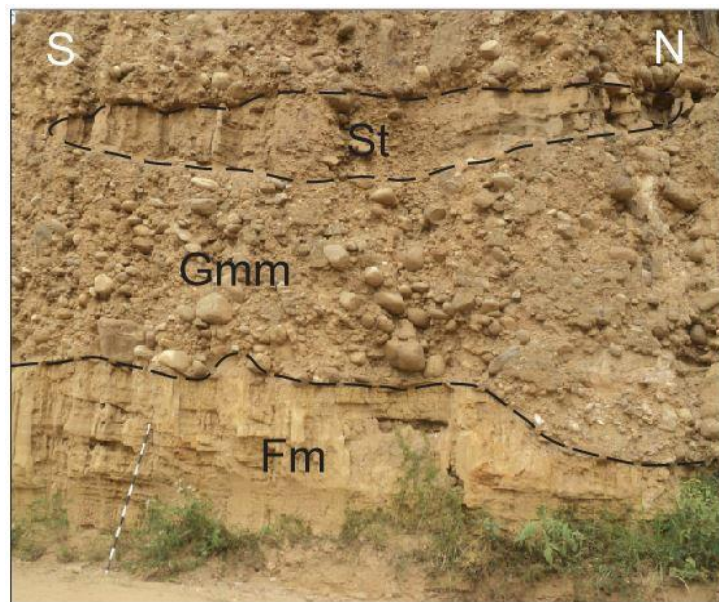


Figura 24. Grava masiva matriz soportada. Corresponde a la porción proximal del abanico. Estratificación de indiferenciada a ausente. El bastón de Jacob mide 1.5 m.

6.2.1.2 Grava masiva clasto soportada (Gcm). Esta facies gravosa se caracteriza por tener una fábrica clasto soportada y un mejor calibrado con respecto a Gmm. Esta facies puede oscilar de tamaños de grano gránulo a guijas, y presentan una forma subredondeada y moderadamente esféricas. Poseen una estructura masiva. Estos cuerpos sedimentarios tienen espesores de hasta 0.6 m (capas gruesas) y una extensión lateral de hasta 7 m, y se asocia a un depósito de tamiz (Figura 25). La orientación de los clastos es aleatoria. Se encuentran embebidos en las facies Gmm. Los clastos son de composición variada, se identifican litologías sedimentarias como litarenita, chert y cuarzoarenitas. En cuanto a rocas metamórficas identificadas, se encontró Ortoneis Biotítico, compuesto principalmente por Cuarzo, Plagioclasa y Biotita, y Ortoneis Hornbléndico con porcentajes considerables de Cuarzo, Plagioclasa y Hornblenda (su grado de foliación es de moderado a bajo). De acuerdo con el sistema de clasificación de facies de Miall (1985), la litofacies Gcm se interpreta como flujo de derrubios de alta densidad.

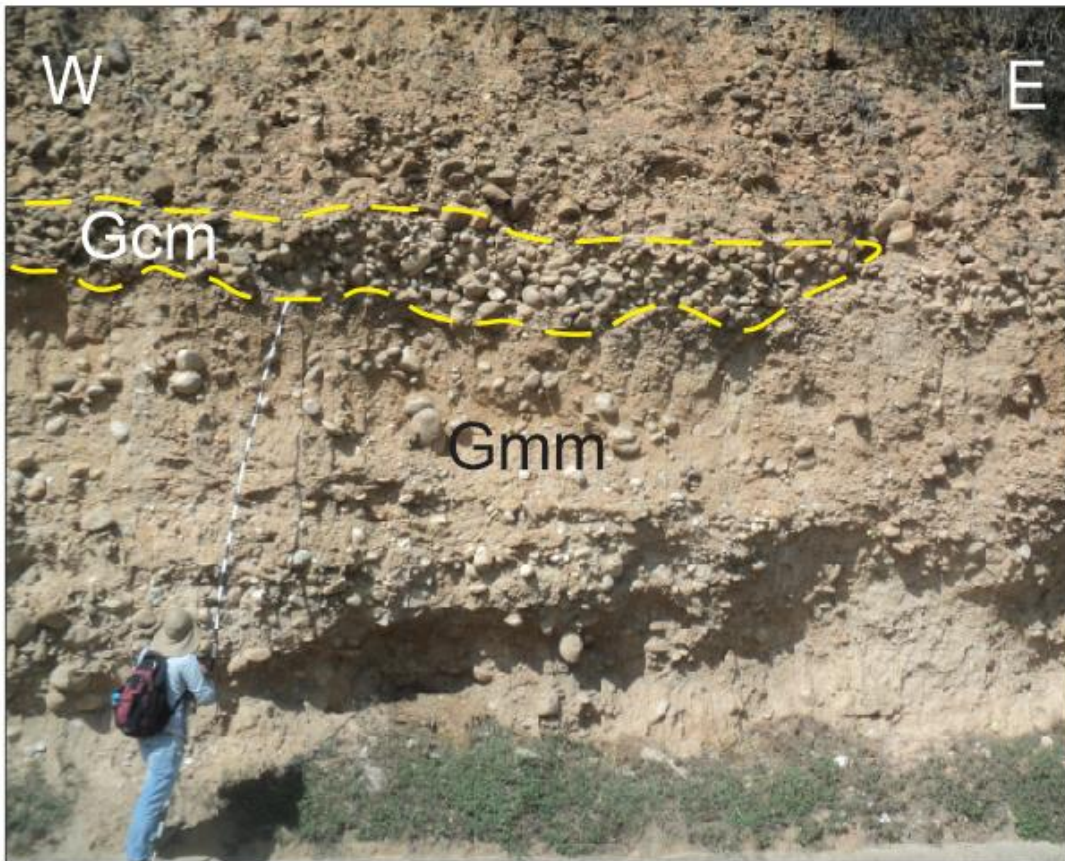


Figura 25. Grava masiva clasto soportada (Gcm), embebida en litofacies Gmm, presenta mejor calibrado con respecto a estas últimas. Se asocia a un depósito de tamiz, por la alta porosidad de estas gravas limpias (bajo porcentaje de matriz). Esto se asocia a la parte proximal del Abanico. Estratificación ausente. El bastón de Jacob mide 4.5 m.

6.2.1.3 Arena fina a gruesa, puede ser gravosa (St). Estas facies están caracterizadas por arenas de grano medio a grueso, con fábrica areno lodo soportada, mal calibrado (en la base del *foreset* se concentran gránulos). Estratificación cruzada en artesas de pequeña y mediana escala (Figura 26). Se disponen en cuerpos que varían de 0.5-1.5 metros de espesor en promedio (capas gruesas). Presentan geometría lenticular y bases erosivas, lo que sugiere un transporte mediante corrientes acuosas. De acuerdo con el sistema de clasificación de facies de Miall, son resultado de la migración de dunas de cresta sinuosa y linguoide (Miall, 1985).

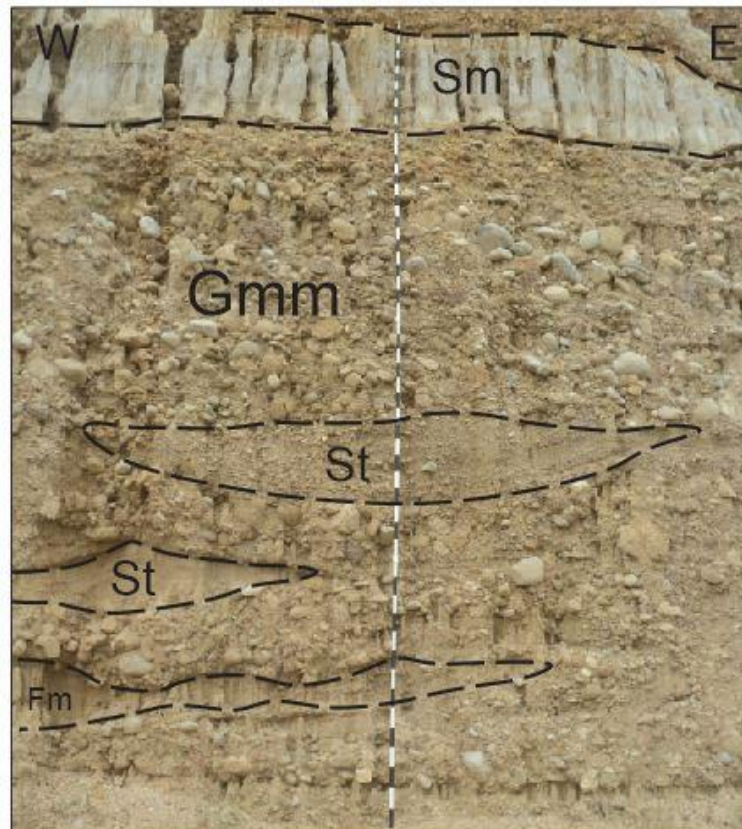


Figura 26. Se observa la parte frontal de la estratificación cruzada en artesas en una capa de arena gravosa con geometría lenticular. Hay material grueso concentrado en la base de cada *foreset*. Esta estructura tiene superficies de erosión al tope. Se trata de dunas con cresta sinuosa. El bastón mide 6 metros.

6.2.1.4 Arena fina a gruesa (Sm). Son arenas lodosas, con fábrica areno lodo soportada, mal calibrada. Poseen colores blanquecinos a grisáceos, intercalada con niveles lodosos. Poseen estructura masiva y geometría tabular (Figura 27). Se disponen en cuerpos de 1 m de espesor en promedio (capas gruesas), pero pueden alcanzar los 2 metros (capas muy gruesas). Son originadas por flujo de sedimento de alta densidad (Miall, 1985).

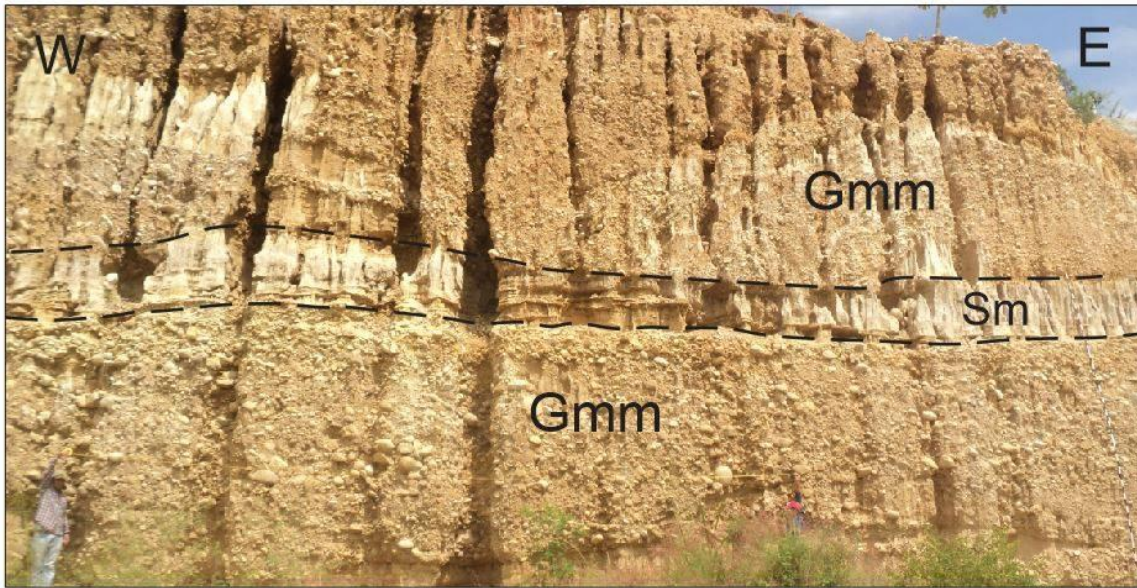


Figura 27. Capa gruesa de arena lodosa con estructura masiva (Sm) y geometría tabular.

6.2.1.5 Arena fina a gruesa, con estratificación cruzada plana (Sp). Se caracterizan por ser arenas grisáceas, de grano medio a grueso, con fábrica areno lodo soportada, mal seleccionadas y con estratificación cruzada plana (Figuras 28 y 29). Se disponen en cuerpos que varían de 0.5-1 m de espesor en promedio (capas gruesas). Presentan geometría lenticular y bases erosivas, lo que sugiere un transporte mediante corrientes acuosas. De acuerdo con el sistema de clasificación de facies de Miall (1985), son formas de fondo transversales y linguoide.

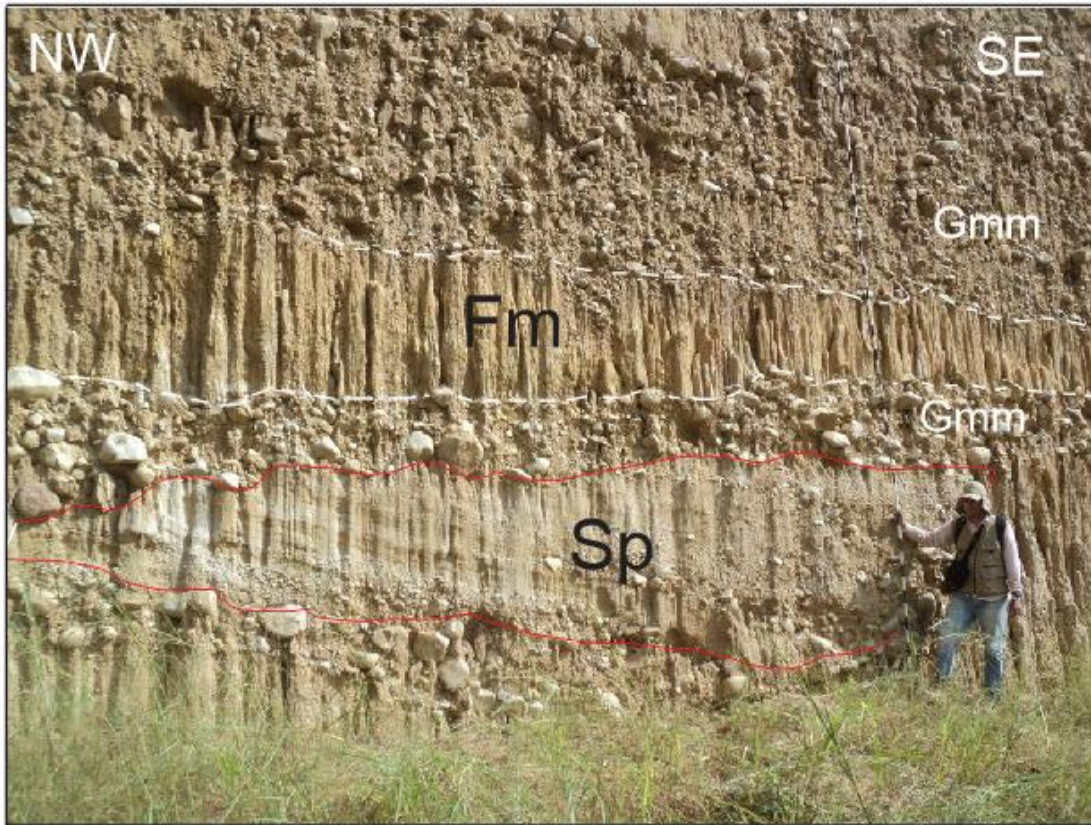


Figura 28. Arena lodosa con estratificación cruzada plana. Se observan partículas gruesas a la base del *foreset*. Se trata de dunas de cresta recta. Esta facies esta embebida por la litofacies Gmm. Se observa un nivel lodoso de 0.8 metros de espesor. La longitud del bastón es de 6m.

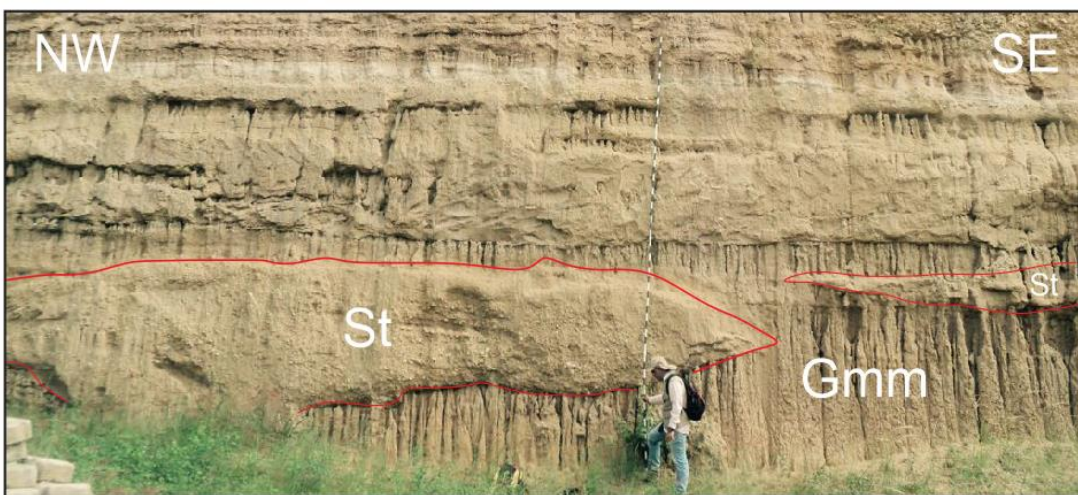


Figura 29. Arena lodosa con estratificación cruzada plana. Se observan partículas gruesas a la base de los *foreset*. La longitud del bastón es de 6m.

6.2.1.6 Lodo masivo (Fm). Lodo con coloración parda y gris-ocre. Geometría tabular y poseen una estructura masiva, mal calibrado (Figura 30). Se interpreta como depósitos de llanura de inundación. Son depósitos sedimentados por decantación a partir de una suspensión en cuerpos de agua someros (Miall, 1985).

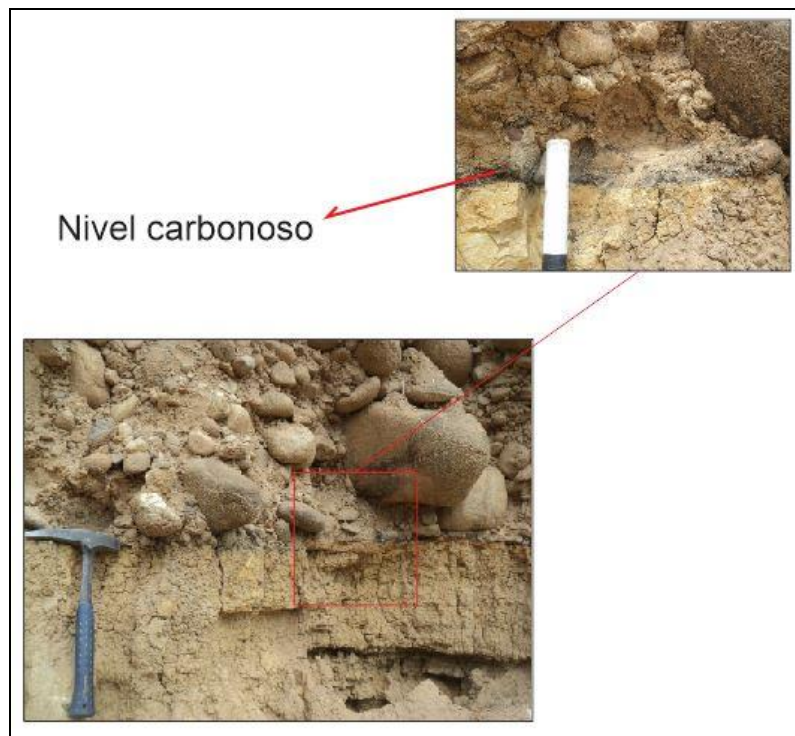


Figura 30. Capa muy gruesa de lodo masivo color pardo, con una capa oscura de 3 cm que corresponde a un nivel carbonoso (?), el cual está en contacto erosivo con un nivel gravoso suprayacente.

6.2.1.7 Lodo arenoso con laminación (Fl). Lodo arenoso ligeramente gravoso con coloración gris-ocre y pardo. Geometría tabular y laminación interna fina de paralela a ondulada (Figura 31). los guijarros flotantes presentan forma angular y no esférica. Se las interpreta como depositadas en condiciones de bajo régimen de flujo en corrientes de muy poca profundidad (Miall, 1985).



Figura 31. Parte de una sucesión gruesa de lodos. Presenta coloración parda-gris ocre, interestratificados con niveles de arenas fina a media. Depositados en corrientes de baja energía, ambiente lagunar. Puede observarse una laminación paralela. Facies distales del abanico.

Tabla 10.

Litofacies del Miembro Órganos Superior de la Formación Bucaramanga.

Código de facies	Facies	Estructuras sedimentarias	Interpretación
Gmm	Grava masiva, matriz soportada	Gradaciones mal definidas	Flujo plástico de derrubios (viscosos, alta resistencia)
Gcm	Grava masiva clasto soportada		Flujo de derrubios pseudoplástico (carga de fondo inercial, flujo turbulento)
St	Arena, fina a muy gruesa, puede ser guijosa.	Estratificación cruzada en artesa, solitaria o agrupada.	Dunas linguoides y de cresta sinuosa (3-D).
Sp	Arena, fina a muy gruesa, puede ser guijosa.	Estratificación cruzada planar, solitaria o agrupada.	Formas de fondo linguoides y transversales (2-D).
Sm	Arena, fina a gruesa.	Masiva, o laminación difusa (poco definida).	Depósitos por flujos gravitacionales de sedimentos.
Fl	Arena, arcilla, lodo	Laminación fina, ondulitas muy pequeñas.	Llanura de inundación, canales abandonados, o depósitos por inundación creciente.
Fm	Lodo, arcilla.	Masiva, grietas de desecación.	Llanura de inundación, canales abandonados, o depósitos <i>drape</i> .

Modificado de Miall, 1985.

La Figura 32 representa la distribución de litofacies del Miembro Órganos Superior en la zona de estudio:

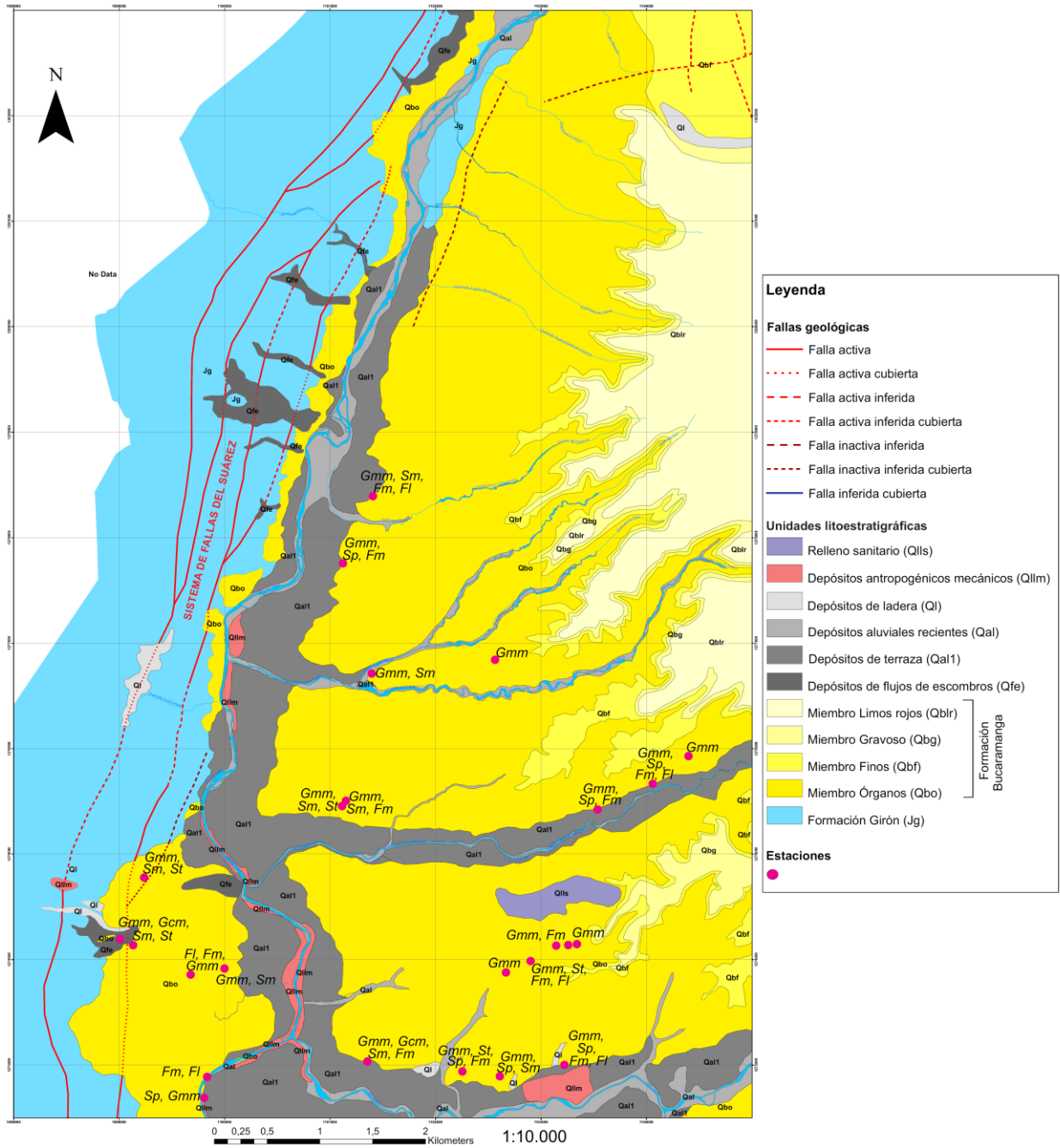


Figura 32. Mapa de localización de litofacies aflorantes del Miembro Órganos.

6.2.2 Secciones estratigráficas del Miembro Órganos Superior. Se levantaron tres secciones estratigráficas hacia la parte superior del Miembro Órganos. La poligonal de las secciones estratigráficas se encuentra en la Figura 33 y las secciones detalladas se pueden consultar en los Apéndices C, D, y E.

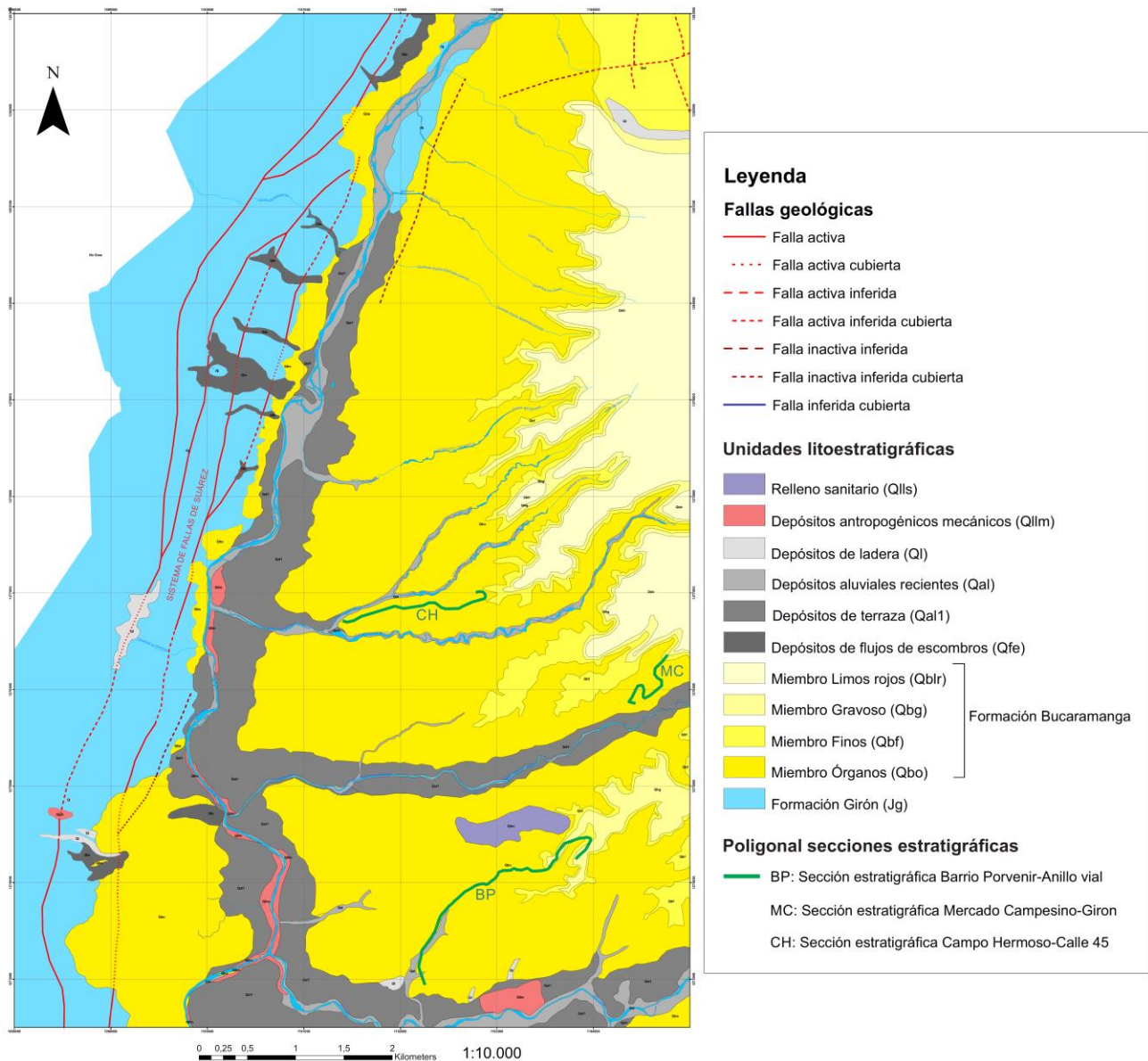


Figura 33. Localización de las poligonales de las secciones estratigráficas levantadas en la parte superior del Miembro Órganos.

A continuación, se presenta en la Figura 34 la correlación estratigráfica de las secciones estratigráficas generalizadas de la parte superior del Miembro Órganos. Se tomó como *datum* (nivel de referencia) el Miembro Finos debido a su continuidad lateral en el área de estudio.

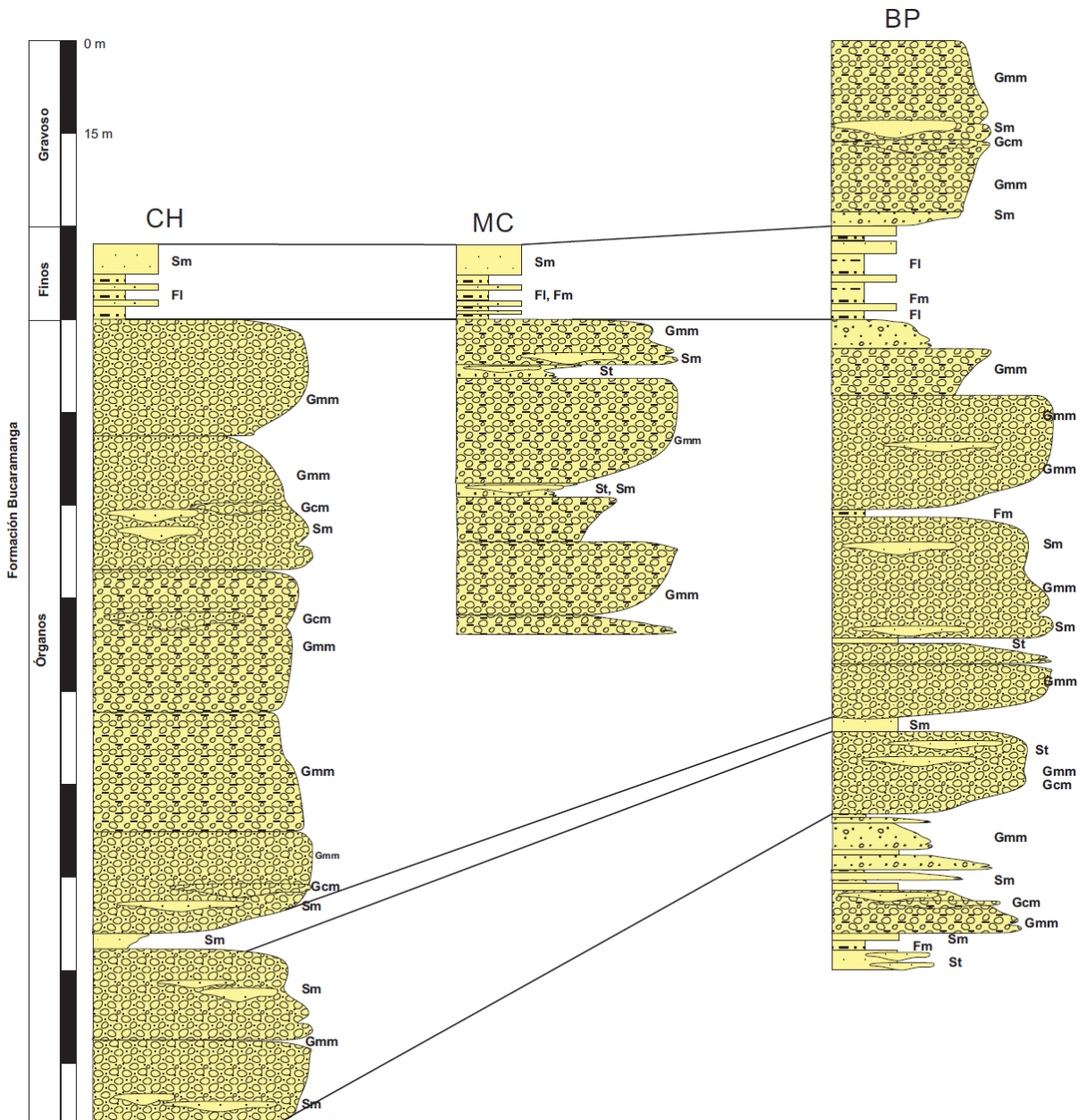


Figura 34. Correlación estratigráfica de las secciones del Miembro Órganos Superior.

6.2.3 Asociación de litofacies

6.2.3.1 Asociación de litofacies de Abanico Proximal (AL1). La asociación de litofacies del abanico proximal es la porción del sistema de Abanico Aluvial de Bucaramanga más cercana al alto topográfico o Macizo de Santander y está representada por las litologías más gruesas del Abanico (Figura 35). El componente principal en la porción proximal del Abanico son los depósitos por flujo de derrubios, reflejados en litofacies como Gmm. En la AL1, la estratificación es pobremente desarrollada en las litofacies principales Gmm y Gcm. Los constituyentes secundarios corresponden a las litofacies St, Sp, Sm y Fm, y sus geometrías se visualizan más claramente que la de los constituyentes mayores. El contacto entre litofacies principales (Gmm, Gcm) y secundarias es erosivo en general. Se pueden observar bases erosivas irregulares con un relieve variable. Las litofacies que comprenden constituyentes menores y alternan con los constituyentes mayores usualmente no exceden los 0.1-1.5 m de espesor. Las litofacies St, Sp y Sm generalmente presentan geometría canaliforme, y se encuentran embebidas dentro de facies Gmm. Los lodos, usualmente tienen un contacto erosivo con un nivel gravoso suprayacente (Gmm-Gcm), y a la base se caracterizan por tener una superficie ondulosa. Las intercalaciones de arena que se producen entre los lodos a veces forman lentes. La litofacies Fm muestra geometrías tabulares, sin socavamientos (erosión) basales aparentes.

Los cantos subredondeados a subangulares, no esféricos indican un transporte importante desde la fuente, y se puede considerar la posibilidad de que sean de segunda generación, es decir probablemente ha sido retrabajados, aumentando su redondez. Las gravas matriz-soportadas, mal calibradas, son originadas por flujo de detritos (gravitacionales). Por lo tanto, aunque la lubricación del agua pudo estar presente en el transporte de los sedimentos, no fue el principal

agente. En cuanto a las estructuras sedimentarias presentes en esta porción del abanico, solo se encontraron imbricaciones de clastos mal definidas en las litofacies principales.

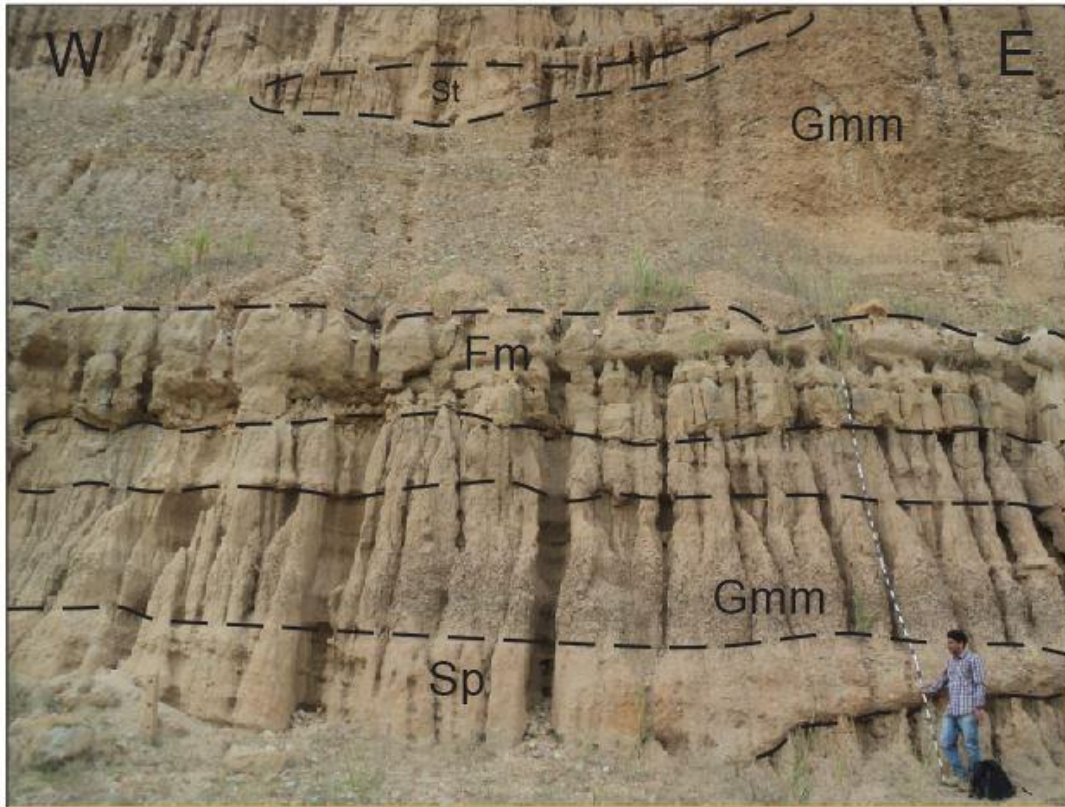


Figura 35. Asociación de litofacies de abanico proximal en el Miembro Órganos Superior (AL1).

El escaso registro de estructuras sedimentarias se debe a que el flujo de corriente (o acuoso) no estuvo muy involucrado en esta porción del depósito, cosa que si sucede en las facies medias del abanico. Debido a que el agua no fue el agente principal de transporte, no se generaron abundantes estructuras de fondo. Con respecto a la baja madurez composicional de los sedimentos, podemos decir que, debido a la proximidad de la fuente o Macizo de Santander, es posible encontrar litologías con poca resistencia al transporte como por ejemplo las rocas

sedimentarias, junto con litologías más resistentes, como las rocas ígneo-metamórficas con un alto porcentaje de cuarzo.

6.2.3.2 Asociación de litofacies de Abanico Medio (AL2). La naturaleza de este depósito de abanico aluvial muestra cambios progresivos desde la porción de abanico proximal hasta las partes distales. Hay un incremento en la abundancia de litofacies arenosas con estructuras sedimentarias, que alternan con otras litofacies más gravosas masivas. Las asociaciones de litofacies de abanico medio (Figuras 36 y 37) están caracterizadas por tener una mayor presencia de estructuras de fondo tales como la estratificación cruzada en artesa y plana (St y Sp), las cuales son paquetes arenosos con geometría lenticular que alternan en litofacies Gmm y Gcm, y se asocian a canales de alta energía en flujos de corriente. Estos cuerpos sedimentarios tienen espesores de hasta 2 m y una extensión lateral de hasta 10 m. Estos cambios reflejan disminución gradual en el tamaño de las partículas en la relación a la profundidad del agua ya que disminuye la capacidad de la corriente hacia las litofacies medias del abanico (de Gmm-Gcm a St-Sp-Sm). La asociación de litofacies del Abanico Medio está representada por las litofacies de sedimentos de tamaño intermedio a gruesos, debido a que se tienen gradientes de inclinación menores, y los canales tienden a ser mucho más someros que en el abanico proximal.

El componente principal de AL2 son las gravas masivas matriz soportadas (Gmm), gravas clasto soportadas (Gcm), arenas de grano fino a grueso con estratificación cruzada en artesas (St), arenas de grano fino a grueso con estratificación cruzada plana (Sp) y arenas masivas de grano fino a grueso (Sm). El contacto entre ellas es principalmente erosivo, pero a veces transicional. Las litofacies asociadas que comprenden constituyentes menores usualmente no exceden 1 m de espesor, y corresponden a Fm y Fl. Los cantos subredondeados y

moderadamente esféricos indican un mayor transporte con respecto a los de la parte proximal. Se encuentra grava matriz soportadas y clasto soportadas. Las gravas clasto soportadas no muy a menudo presentan depósitos de tamiz en las facies medias de abanico proximal. Esto nos hace pensar en que la madurez composicional es ligeramente mayor en esta porción. El tamaño de grano puede oscilar de gránulos a guijas, y en ocasiones se observan esporádicos clastos que alcanzan de 15 - 40 cm. Se identificaron varios clastos de litologías ígneo-metamórficas y sedimentarias del Macizo de Santander, por lo que su madurez composicional es baja o inmadura. En esta porción del abanico se favorece el desarrollo de estructuras de fondo debido a que la participación del agua es mayor que en la parte proximal. En la parte media del abanico puede haber tanto flujos de corriente (el agua se encarga de transportar los sedimentos en el fondo por tracción) como por flujos de detritos (no necesitan agua para transportarse sino simplemente es un flujo por gravedad).

6.2.3.3 Asociación de litofacies de Abanico Distal (AL3). Las litofacies predominantes en esta porción del abanico son Fm y Fl (Figura 38). Otra litofacies que puede estar presente es Sm, en menor frecuencia. En esta porción del abanico encontramos la granulometría más fina, y el desarrollo de grandes canales es casi ausente, debido a la baja energía. Los depósitos dentro de estas facies presentan una continuidad lateral mucho más marcada que en las facies anteriores, predominan capas de arena y lodo con estratificación horizontal y ondulitas de régimen bajo. También encontramos esporádicas gravas con una mejor clasificación. Esta porción del abanico se caracteriza por depósitos sedimentados por decantación a partir de una suspensión en cuerpos de agua de poca profundidad. Con base en las evidencias de campo, concluimos que la

asociación de litofacies de abanico distal se distingue por presentar los gradientes de inclinación más bajos de todo el sistema, y por ende la energía más baja.

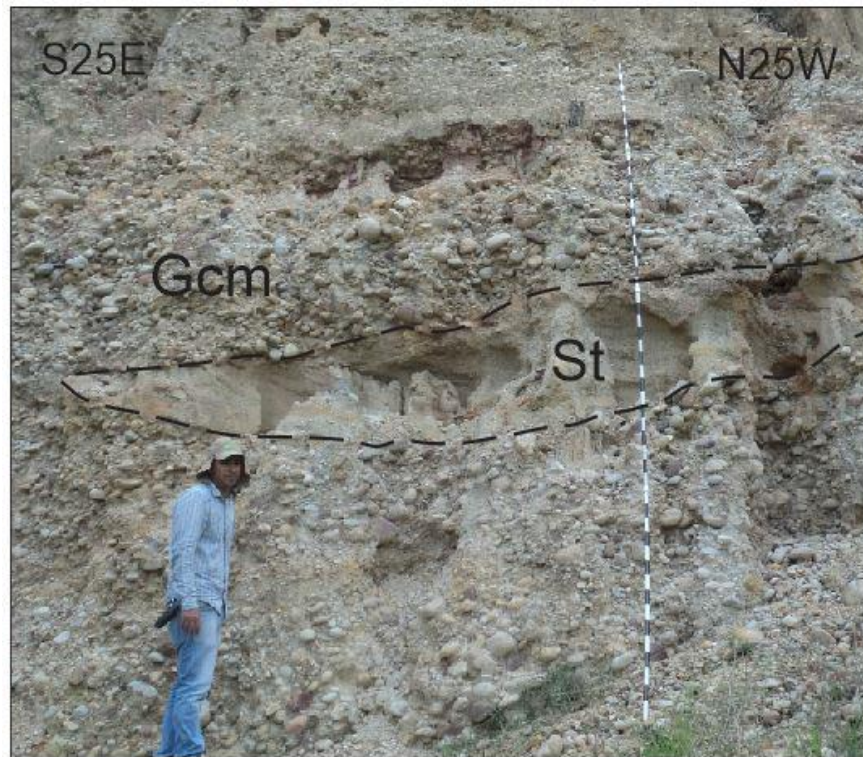


Figura 36. Litofacies predominante de abanico medio. Capa de arena con geometría lenticular. Bastón de 4.5 metros.

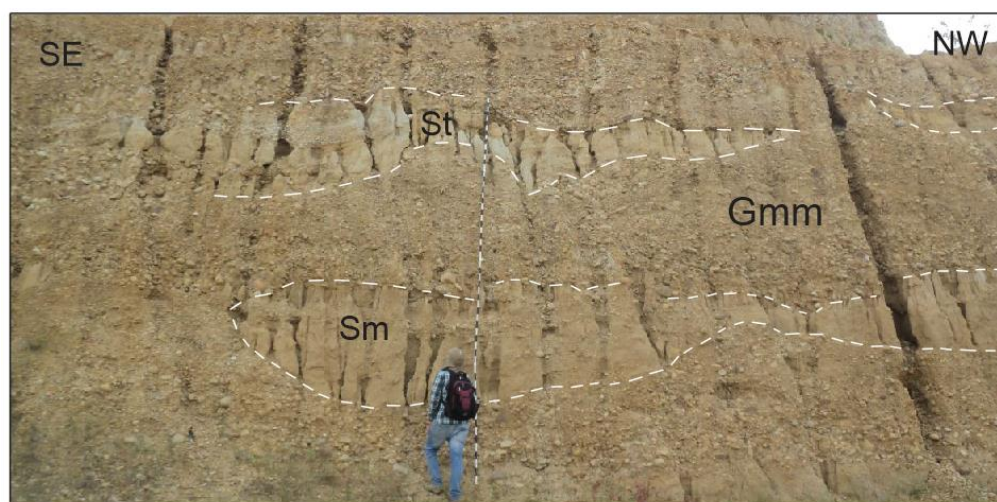


Figura 37. Litofacies predominante de abanico medio. Capas de arena gravosa con geometría lenticular (litofacies Sm-St) alternando con litofacies Gmm. Barrio Carrizal.

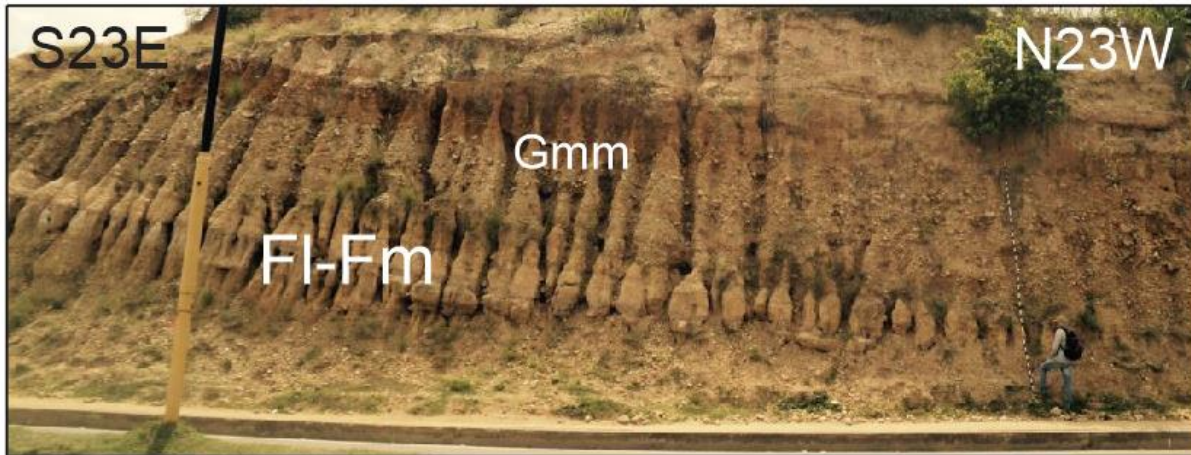


Figura 38. Litofacies predominantes de abanico distal. Los lodos se forman en aguas poco profundas, en régimen de flujo bajo, no hay turbulencia, son muy pequeños.

Tabla 11.

Asociación de litofacies del Miembro Órganos Superior de la Formación Bucaramanga.

Asociación de Litofacies del Miembro Órganos Superior					
Abanico Proximal (AL1)		Abanico Medio (AL2)		Abanico Distal (AL3)	
Principales	Secundarias	Principales	Secundarias	Principales	Secundarias
<i>Gmm, Gcm</i>	<i>Fm, Sm, Sp, St</i>	<i>Sm, Sp, St, Gmm, Gcm</i>	<i>Fm, Fl</i>	<i>Fm, Fl</i>	<i>Sm</i>

Las litofacies arenosas (St-Sp-Sm) tienen geometría lenticular y se encuentran embebidas dentro de litofacies principales (Gmm-Gcm). La litofacies Fm muestra geometría tabular con continuidad lateral. Usualmente está en contacto erosivo con nivel gravoso suprayacente (Gmm-Gcm), y a la base se caracteriza por tener una superficie ondulosa sobre litofacies principales. La estratificación es pobremente desarrollada en las litofacies dominantes (Gmm-Gcm) y presentan imbricaciones de clastos mal definidas. Los constituyentes secundarios St, Sp, Sm y Fm muestran geometrías mejor definidas. Gmm con frecuencia alcanza 2-13 metros de espesor.

Alternancia de litofacies gruesas con finas. Hay un incremento en la abundancia de capas con geometría lenticular, con presencia de estructuras sedimentarias tales como la estratificación cruzada en artesa y plana (St-Sp) alternando con litofacies Gmm. Estos cuerpos sedimentarios tienen espesores de 1.5 m en promedio y una extensión lateral de 10 m. Depósitos secundarios de lodos con laminación y masivos (Fm y Fl) también incrementan en abundancia en esta porción del abanico.

En esta porción del abanico encontramos la granulometría más fina (Fm-Fl), y el desarrollo de grandes canales es casi ausente, debido a la baja energía. Los depósitos dentro de estas facies presentan una continuidad lateral mucho más marcada que en las facies anteriores, predominan capas de arena y limo con estratificación horizontal y ondulitas de régimen bajo.

En la Figura 39 se observa la porción proximal (AL1), media (AL2) y distal (AL3) del Miembro Órganos Superior, delimitadas por líneas segmentadas. En general la zonación varía de este a oeste de proximal a distal. La barrera topográfica del escarpe de la Falla del Suárez impidió el desarrollo de las facies distales en la parte norte del Miembro Órganos Superior.

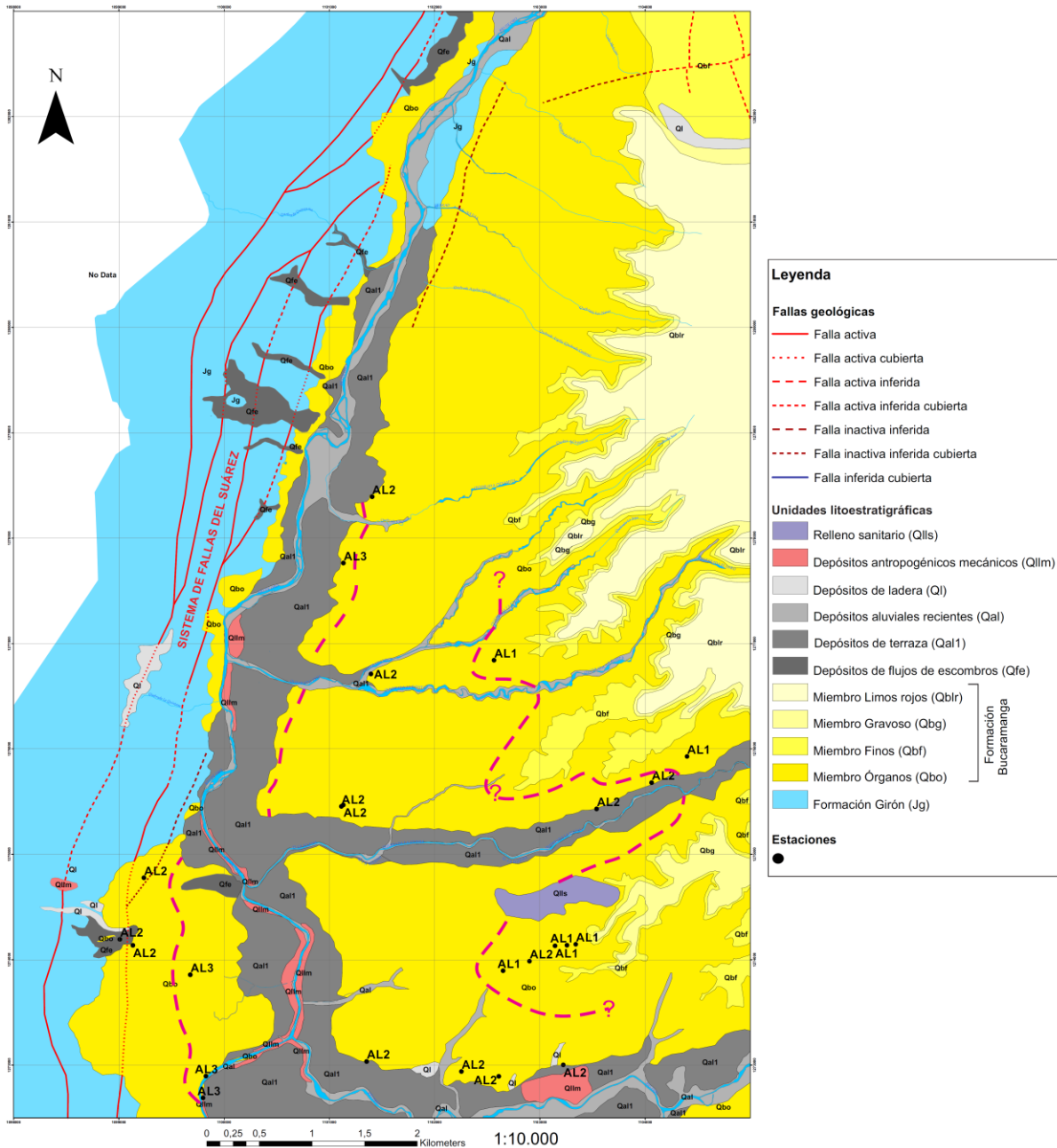


Figura 39. Mapa de asociaciones de facies de la parte superior del Miembro Órganos.

6.3 Interpretación de las tomografías eléctricas 2D (*ERT*).

Las secciones *ERT* del área de estudio muestran la distribución de resistividad real del subsuelo en un perfil 2D. Con base en el contraste y la distribución de los valores de resistividad eléctrica identificamos y delimitamos geoméricamente zonas conductoras y zonas resistivas. La estimación litológica de los valores de resistividad del perfil *ERT* se realizó con base en los valores típicos de resistividad de los materiales geológicos (Tabla 3). Las variaciones en los valores de resistividad de determinada litología se atribuyen al grado de saturación. Las litologías identificadas a partir de la sección *ERT* fueron correlacionadas con las litofacies del Miembro Órganos Superior identificadas en campo. En general, todas las tomografías registraron bien las unidades identificadas en la campaña de campo, en términos de sus características texturales.

6.3.1 Tomografía DJ01. Se encuentra en la parte sur del área de investigación en cercanías al Anillo vial, y su orientación es aproximadamente W-E (Figura 7). El perfil de resistividad real obtenido se muestra en la Figura 40a. La profundidad de investigación es de 44.8 m. Los cálculos de inversión se realizaron para 4 iteraciones y la sección resultante se obtuvo con un valor RMS de 6,37%. El tomograma tiene resistividades entre 4.9 y 614 Ohm-m. La escala gráfica representa la resistividad de la zona I (40-110 Ohm-m) en verde oscuro-verde claro, la zona II (8-35 Ohm-m) azul claro-azul oscuro, la zona III (160-500 Ohm-m). La zona I está embebida en una zona conductora denominada zona II. Su boceto tiene una tendencia de acuñaamiento lateral, desarrollando una geometría lenticular, en especial los lentes obtenidos de 136-152 m y 164-188 m (a lo largo de la línea *ERT*) que tienen características de resistividad muy similares. La zona I se correlaciona hidrogeológicamente con arenas saturadas (Tabla 12),

lo cual de acuerdo con nuestro análisis de facies se relaciona a las litofacies St-Sp-Sm. Por lo tanto, esta sección es bastante importante para interpretar el área de investigación. Según esta sección, la litofacies St-Sp-Sm son porosas y saturadas. La zona II es la más conductora de esta sección y abarca la mayor parte del tomograma. Además, logra menores resistividades muy localizadas con geometrías circular y lenticular. De acuerdo con la Tabla 12, la zona II se correlaciona hidrogeológicamente con arcillas saturadas, posiblemente litofacies Fm-Fl. Sin embargo, aunque sabemos que están saturadas, no son litofacies de interés, debido a su naturaleza impermeable.

La zona III tiene los valores de resistividad más altos, y su boceto tiene una geometría lenticular, se correlaciona hidrogeológicamente con gravas saturadas, posiblemente litofacies Gcm. Esto tiene mucho sentido ya que esta litofacies se define como un depósito de tamiz, el cual se caracteriza por ser gravas con porcentajes muy bajos de matriz, y, por ende, altos porcentajes de porosidad. Finalmente, se observa una zona muy conductora cerca de la superficie entre 160-216 m (a lo largo de la línea *ERT*), que se caracteriza por resistividades de 4,9-10 Ohm-m, esto se debe a un desnivel del terreno.

6.3.2 Tomografía IM01. Se localiza al margen derecho del Anillo vial, sentido Girón-Floridablanca, en un terreno que pertenece a la empresa ISMOCOL y su orientación es casi W-E (Figura 7). El tomograma obtenido se muestra en la Figura 40b. La profundidad de investigación es de 118 m. Los cálculos de inversión se realizaron para 3 iteraciones y la sección resultante se obtuvo con un valor RMS de 2,38%. La escala gráfica representa la resistividad de la zona I (10-25 Ohm-m) en azul claro, la zona II (25-100 Ohm-m) verde claro y la zona III (150-190 Ohm-m). La zona I está embebida en una zona conductora denominada zona II. Su boceto tiene

geometría lenticular, y están ubicados a lo largo del trazo de la línea *ERT* a 45-95 m, 155-160 m y 358-415m. La zona I se correlaciona hidrogeológicamente con arcillas saturadas, posiblemente de litofacies Fm-Fl. La zona II abarca la mayor parte del tomograma. Se correlaciona hidrogeológicamente con limos saturados, lo cual corresponde también a las litofacies Fm-Fl. Finalmente, se observa una zona resistiva cerca de la superficie, la zona III, que se caracteriza por resistividades de 150-190 Ohm-m. Esto se debe a un relleno antrópico de aproximadamente 15 metros de espesor realizado por ISMOCOL para adecuar el terreno.

6.3.3 Tomografía RF02. La sección RF02 se ubica al margen derecho del Anillo vial, sentido Girón-Floridablanca, y su orientación es casi NW-SE (Figura 7). El perfil de resistividad real obtenido se muestra en la Figura 40c. La profundidad de investigación es de 63 m. Los cálculos de inversión se realizaron para 5 iteraciones y la sección resultante se obtuvo con un valor RMS de 5,86%. Se caracteriza por tener resistividades entre 8 y 842 Ohm-m. La escala gráfica representa la resistividad de la zona I (8-40 Ohm-m) en azul claro-azul oscuro, la zona II (50-500 Ohm-m) verde claro. La zona I está embebida en una zona más resistiva denominada zona II. La zona I se correlaciona hidrogeológicamente con arcillas saturadas. La zona II es menos conductora y abarca la mayor parte del tomograma y se correlaciona hidrogeológicamente con gravas saturadas. La zona I se asocia con litofacies Fm-Fl del Miembro Órganos. La zona II se interpretan como depósitos aluviales del río de Oro compuestos por gravas saturadas, la interpretación se hizo correlacionando la información de campo junto con la información litológica del Pozo “Agropecuaria Rio Frio” (Vásquez y De Bermoudes, 2004) el cual se encuentra cerca a la tomografía RF02 y está a la misma cota (745 m.s.n.m). En la columna

litológica de este pozo identificaron depósitos aluviales entre los 0 y 7,5 m de profundidad y el Miembro Órganos entre los 7,5 hasta los 45 m de profundidad.

La Tabla 12 resume la interpretación de las tomografías geoelectricas. En la Tabla 13 se correlacionan los valores de resistividad real encontrados en las tomografías con las litofacies del Miembro Órganos.

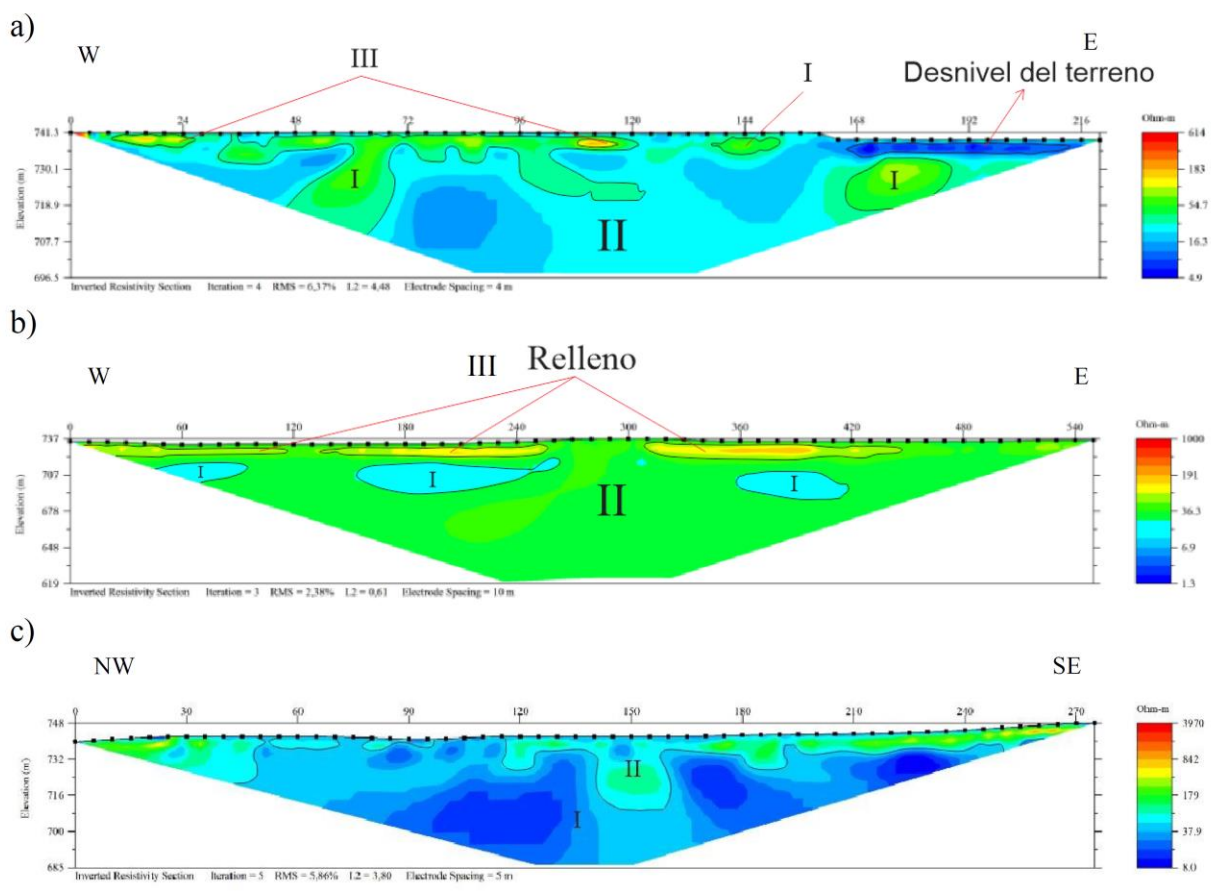


Figura 40. Se muestran las secciones transversales de resistividad modelada del proceso tomográfico, después del proceso de inversión. La escala gráfica representa la resistividad de las litologías saturadas o secas del subsuelo a) Tomografía DJ1, b) Tomografía IM01, c) Tomografía RF02.

Tabla 12.

Interpretación de las zonas geoelectricas encontradas en las tomografias.

Tomografía	Zona geoelectrica	Resistividad [ohm*m]	Espesor [m]	Profundidad [m]	Correlacion Hidrogeologica	Facies asociadas Qbo
DJ1	I	40 - 110	10 y 23	0 - 10 y 4 - 27	Arenas saturadas	St-Sp-Sm
	II	8 - 35	44,8	0 - 44,8	Arcillas saturadas	Fm-Fl
	III	160 - 550	4	0 - 4	Gravas saturadas	Gcm
IM01	I	10 - 25	30	15 - 45	Arcillas saturadas	Fm-Fl
	II	25 - 100	118	0 - 118	Limos saturados	Fm-Fl
	III	150 - 190	15	0 - 15	Relleno antropico	
RF02	I	8 - 40	55	8 - 63	Arcillas saturadas	Fm-Fl
	II	50 - 500	8 y 16	0 - 8 y 0 16	Deposito aluvial	

Tabla 13.

Correlación de las facies de Qbo con los valores de resistividad encontrados en las tomografias ERT.

Resistividad (Ohm-m)	Correlación hidrogeológica	Facies asociada Qbo	Interés Hidrogeológico	Observación
160 a 500	Gravas saturadas	Gcm	SI	Esta litofacies predomina en las porciones de abanico proximal y medio.
40 a 110	Arenas saturadas	St-Sp-Sm	SI	Esta litofacies predomina en las porciones de abanico medio.
25 a 100	Limo saturado	Fl-Fm	NO	Se comportan como capa impermeable.
10 a 25	Arcillas saturadas	Fl-Fm	NO	Se comportan como capa impermeable.

6.4 Hidrogeoquímica del agua subterránea del Miembro Órganos Superior

6.4.1 Iones mayoritarios. Los análisis hidroquímicos de iones mayoritarios presentes en las muestras de agua subterránea fueron realizados por el Laboratorio de Consultas Industriales UIS, los resultados se encuentran tabulados en la Tabla 14. Los balances iónicos realizados a las muestras (Apéndice F) reportan valores >10%, no obstante, consideramos necesario analizar la información como un primer paso hacia el conocimiento de la hidroquímica del agua subterránea del Miembro Órganos (acuífero profundo) de la Formación Bucaramanga.

Tabla 14.

Resultados del análisis de iones mayoritarios en agua subterránea del Miembro Órganos Superior hacia la escarpa occidental de Bucaramanga.

Nombre	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	OH ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)
Insercol (febrero 2016)	20.88	1.53	4.02	46.46	28.8	71	9.24	0.18	<0.07	<0.014	0	0	0.007
Insercol (marzo 2017)	16.96	2.59	2.18	17.46	27.62	0	23.14	1.81	<0.07	<0.014	0	0	0.007
Prevesa (marzo 2017)	34.03	3.41	4.02	17.47	39.99	0	28.51	1.75	<0.07	<0.014	0	0	<0.005

6.4.1.1 Clasificación del agua subterránea. Para clasificar los tipos de agua que corresponden al acuífero profundo del Miembro Órganos se utilizó la composición química de estas. El Diagrama de Piper y de Stiff fueron las herramientas utilizadas con base en las concentraciones de los iones mayoritarios.

6.4.1.1.1 Diagramas de Piper. La clasificación del agua con base al ion dominante de la facie hidroquímica se realiza a través del Diagrama de Piper, el cual se obtiene ploteando las proporciones (en meq) de los cationes mayoritarios (Ca²⁺, Mg²⁺, y Na⁺ + K⁺) en un diagrama triangular, las proporciones de los aniones mayoritarios (CO₃²⁻+ HCO₃⁻, Cl⁻ y SO₄²⁻) en otro, y combinando la información de ambos triángulos en el rombo central. Para convertir las concentraciones de las especies químicas analizadas en proporciones de meq, primero se toman los valores en mg/L correspondientes a los aniones y cationes dados por el análisis químico de laboratorio y se dividen por el peso molecular del compuesto en g/mol; el valor obtenido, que está en mmol/L, se multiplica por la carga del compuesto para obtener la concentración en meq/L. Por último, se recalculan al 100% los cationes para conocer sus proporciones en % meq/L, para los aniones se sigue el mismo procedimiento. Los valores de los pesos atómicos de

los compuestos requeridos para realizar el diagrama de Piper se pueden consultar en el Apéndice F, dichos valores son los mismos que utilizan Appelo y Postma (2005). La Tabla 15 muestra las proporciones en meq/L (%meq/L) de aniones y cationes (valores en negrilla) de cada muestra utilizadas en el Diagrama de Piper (Figura 41).

Tabla 15.

Proporciones en meq/L de aniones y cationes mayoritarios de las muestras analizadas.

Iones mayoritarios	Insercol (febrero 2016)			Insercol (marzo 2017)			Prevesa (marzo 2017)		
	mg/L	meq/L	%meq/L	mg/L	meq/L	%meq/L	mg/L	meq/L	%meq/L
Cationes									
Na ⁺	20.88	0.91		16.96	0.74		34.03	1.48	
K ⁺	1.53	0.04		2.59	0.07		3.41	0.09	
Mg ²⁺	4.02	0.33	9.2	2.18	0.18	9.7	4.02	0.33	11.9
Ca ²⁺	46.46	2.32	64.5	17.46	0.87	47.0	17.47	0.87	31.5
Na ⁺ + K ⁺		0.95	26.3		0.81	43.4		1.57	56.6
Σ (Na ⁺ + K ⁺ , Ca ²⁺ y Mg ²⁺)		3.60	100.0		1.85	100.0		2.77	100.0
Aniones									
HCO ₃ ⁻	71.00	1.16		0.00	0.00		0.00	0.00	
CO ₃ ²⁻	0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00	
Cl ⁻	28.80	0.81	37.5	27.62	0.78	61.8	39.99	1.13	65.5
SO ₄ ²⁻	9.24	0.19	8.9	23.14	0.48	38.2	28.51	0.59	34.5
HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻		1.16	53.7		0.00	0.0		0.00	0.0
Σ (HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ y Cl ⁻)		2.17	100.0		1.26	100.0		1.72	100.0

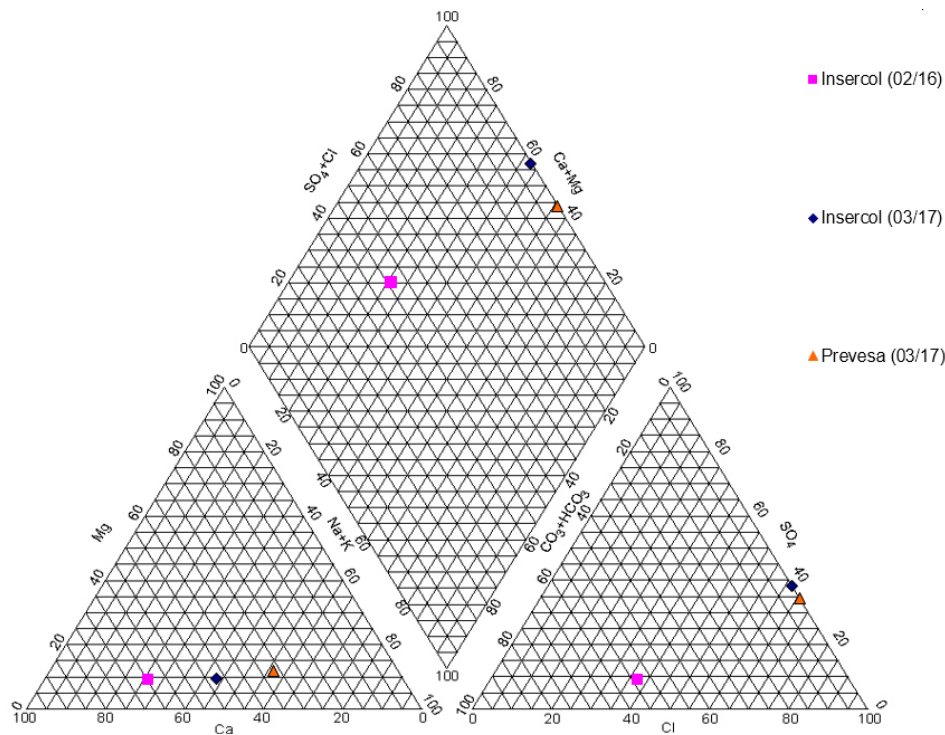


Figura 41. Diagrama de Piper para muestras de agua subterránea del Miembro Órganos Superior.

De acuerdo con la clasificación por los iones dominantes, las muestras de agua subterránea analizadas presentan dos facies hidroquímicas: tipo bicarbonatada cálcica y clorurada sódico-magnésica. La muestra del pozo profundo “Insercol” analizada en febrero de 2016 es de tipo bicarbonatada cálcica con nomenclatura **5-e-C2**. La muestra analizada en marzo de 2017 del mismo pozo “Insercol” es clorurada sódica-magnésica y se clasifica como **1-e-C3**. El agua subterránea del pozo profundo “Prevesa” analizada también en marzo de 2017 es de tipo clorurada sódica y se denomina **1-b-C3**. Para un mismo punto de muestreo (Insercol) encontramos que hay una variación en la composición de un periodo a otro, se tiene un agua $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ al final de la temporada seca (febrero de 2016) que cambia a $\text{Cl}^- - \text{Na}^+, \text{Mg}^{2+}$ al inicio de la temporada de mayor pluviosidad (marzo de 2017). Las facies hidroquímicas $\text{Cl}^- -$

Na⁺, Mg²⁺ no se pueden correlacionar con la geología local del Abanico Aluvial de Bucaramanga debido a que el aporte del ion cloruro en la naturaleza se relaciona principalmente con disolución de evaporitas, intrusión de agua marina y emanaciones volcánicas. Fuentes antrópicas del ion cloruro se relacionan con vertidos humanos e industriales (BV, D. C., & Hydraulics, D., 1999a).

6.4.1.1.2 *Diagramas de Stiff.* Este diagrama permite una visualización rápida de la composición del agua en diferentes lugares. La figura del polígono da una idea de la concentración de iones en la muestra en miliequivalentes por litro. En las muestras estudiadas es claro que hay una variación en la composición del agua subterránea para un mismo punto de muestreo en diferentes periodos de tiempo. Los diagramas de Stiff (Figura 42) dejan ver claramente este cambio, pasando de un tipo de agua HCO₃⁻ - Ca²⁺ a un tipo Cl⁻ - Na⁺, Mg²⁺. Se puede observar que ocurre una disminución en la concentración de Ca²⁺ y una disminución considerable de HCO₃⁻ entre las facies hidroquímicas.

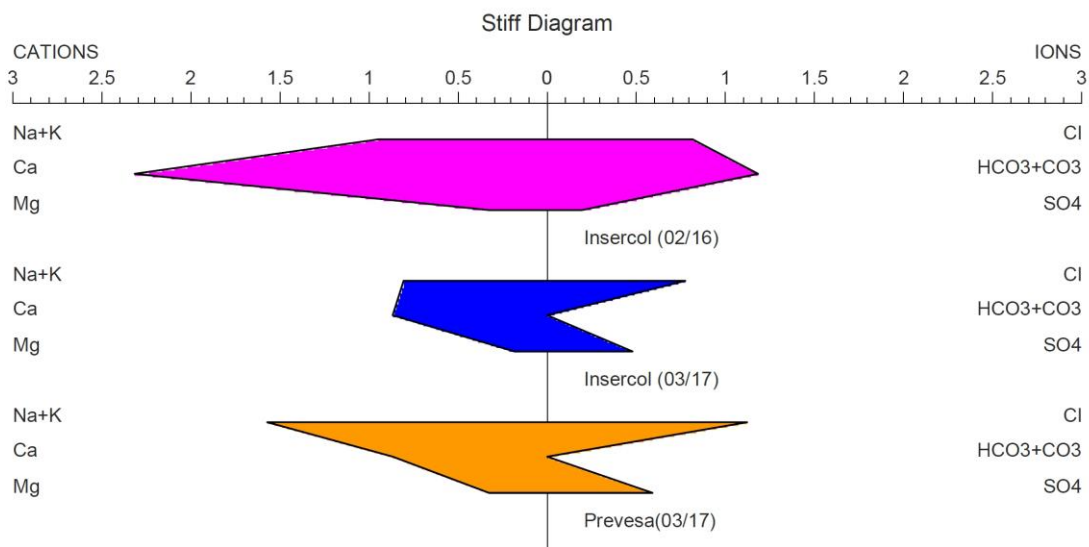


Figura 42. Diagramas de Stiff para muestras de agua subterránea del Miembro Órganos Superior.

6.4.2 Concentraciones de As y Pb. Los resultados de laboratorio de las concentraciones de metales pesados, As y Pb, en las muestras de agua subterránea de la parte superior del Miembro Órganos se muestran en la Tabla 16. Los valores que sobrepasan el límite de detección del laboratorio están en negrilla.

Tabla 16.

*Niveles de As y Pb sobre el límite de detección (en **negrita**) en el agua subterránea del Miembro Órganos Superior.*

Pozo profundo	As (µg/l)	Pb (mg/l)
Insercol (febrero 2016)	3.44	<0.014
Insercol (marzo 2017)	<0.976	0.67
Prevesa (marzo 2017)	<0.976	1.24

El agua subterránea analizada en el pozo “Insercol” en época de verano (febrero de 2016) tiene una concentración de 3.44 µg As/L y una concentración de Pb <0.014 mgPb/L, la cual no supera el límite de detección del laboratorio. Las muestras de agua subterránea analizadas al inicio de la época de lluvias (marzo de 2017) presentan una concentración de As inferior al límite de detección (<0,976 µg/L) mientras que las concentraciones de Pb son de 0.67 y 1.24 mg/L, para los pozos profundos “Insercol” y “Prevesa”, respectivamente. Se puede ver que entre la primera fecha de muestreo (época de verano) y la segunda (época de invierno) existe una disminución de la concentración de As, mientras que las concentraciones de Pb aumentan.

6.4.3 Parámetros fisicoquímicos. En la Tabla 17 se presentan los resultados de las variables fisicoquímicas (pH, temperatura, *TDS* y *CE*) medidas *in situ* en las muestras de agua subterránea de la parte superior del Miembro Órganos.

Tabla 17.

Parámetros fisicoquímicos medidos en campo en muestras de pozos profundos del Miembro Órganos Superior.

Pozo profundo	Este (m)	Norte (m)	Altura (m.s.n.m.)	Temperatura [°C]	Ph	CE [μs/cm]	TDS [mg/l]
Insercol (febrero 2016)	1100923,02	1275383,20	708,5	26,3	7,9	328	-
Insercol (marzo 2017)	1100923,02	1275383,20	708,5	31,7	7,49	1122	563
Prevesa (marzo 2017)	1103499,01	1273093,17	742,5	31,6	6,56	1416	707

El pH medido *in situ* del agua subterránea en los pozos profundos es levemente ácido a levemente alcalino, con valores que están entre 6,56 y 7,9; lo que es esperable en aguas subterráneas, cuyo pH oscila entre 6,5 y 8,5 (Hem, 1985). El pH en el pozo “Insercol” fue de 7,9 en febrero de 2016 y de 7,49 en marzo de 2017; en general presenta un pH levemente alcalino. El pH medido en la muestra de agua subterránea del pozo profundo “Prevesa” es ligeramente ácido, con un valor de 6,56.

Los valores CE presentan un fuerte contraste entre el valor de 328 μS/cm medido en el pozo profundo “Insercol” en febrero de 2016 y los valores 1122 y 1416 μS/cm medidos en “Insercol” y “Prevesa”, respectivamente, en marzo de 2017. Un aumento tan significativo de los valores de conductividad eléctrica es indicador de una fuerte contaminación. No obstante, primero realizamos un test de validación a los valores de conductividad siguiendo la siguiente relación entre la CE y la sumatoria de aniones o cationes según (Appelo and Postma, 2005):

$$\Sigma \text{aniones [meq/L]} = \Sigma \text{cationes [meq/L]} \approx \text{CE} / 100 [\mu\text{S/cm}]$$

donde la CE/100, en la mayoría de los casos da una buena estimación de la sumatoria de aniones o cationes. La Tabla 18 muestra la relación de la CE medida en campo y la sumatoria de cationes de acuerdo con los análisis de laboratorio de las muestras analizadas. Nótese, que únicamente el

valor de la relación $CE_{campo}/100$ en el pozo profundo “Insercol” tiene una concordancia con la Σ cationes, por lo tanto, los demás valores se desestiman en este estudio.

Tabla 18.

Relación de CE medida en campo y Σ cationes en las muestras analizadas.

Pozo profundo	CE [μ S/cm]	Σ Cationes ^{lab} [meq/L]	$CE_{campo}/100$
Insercol (febrero 2016)	328	3.60	3.28
Insercol (marzo 2017)	1122	1.85	11.22
Prevesa (marzo 2017)	1416	2.77	14.16

Los valores de *TDS* encontrados de 563 y 707 mg/L para los pozos profundos “Insercol” y “Prevesa”, respectivamente; corresponden a aguas frescas con < 1500 mg/L de *TDS* (BV, D. C., & Hydraulics, D., 1999b).

7 Discusión

7.1 Iones mayoritarios del agua subterránea de Qbo

Las concentraciones del ion cloruro (27,62 – 39,99 mgCl⁻/L) encontradas en las muestras de agua subterránea del Miembro Órganos son anómalas si consideramos que se ha establecido un *background* de 10 mg/L (INGEOMINAS, 2009; Gómez *et al.*, 2015) para el agua subterránea analizada en el Macizo de Santander, que es la zona de recarga de los acuíferos aluviales presentes en la zona de Bucaramanga. Adicionalmente, análisis realizados al agua de lluvia en la zona de recarga (Macizo de Santander) dan un valor de hasta de 1 mgCl⁻/L (Barrera, 2006).

Gómez *et al.* (2015) también reportan concentraciones altas de Cl^- entre 11 y 30 mg/L en el Abanico aluvial de Bucaramanga, específicamente en muestras analizadas del acuífero superficial; en su momento los autores plantearon que estas concentraciones altas de cloruros presentes en la zona aluvial pueden deberse a una recarga local por actividades antrópicas como deficiencias en el sistema alcantarillado y/o fugas en el sistema de acueducto que contaminan las aguas subterráneas. Estos nuevos datos de concentraciones altas de Cl^- en el acuífero profundo corroboran que existe una fuente de contaminación antrópica que afecta tanto al acuífero superficial como al acuífero profundo presentes en el Abanico aluvial de Bucaramanga.

Las concentraciones de SO_4 en las muestras de agua subterránea analizadas están entre 9,24 – 28,51 mg/L. INGEOMINAS (2009) reporta valores entre 50 y 240 mg SO_4/L en 8 puntos localizados en la parte más alta del Macizo de Santander, que contienen pirita como mineral accesorio; la oxidación de sulfuros aporta SO_4 al agua subterránea. Los valores encontrados de SO_4 concuerdan con el modelo conceptual de flujo de agua subterránea deducido a partir de estudios isotópicos e hidroquímicos (Gómez *et al.*, 2015), en el cual la circulación del agua subterránea desde el Macizo de Santander hacia el Abanico aluvial de Bucaramanga es posible a través de la zona de falla del sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta. Tal circulación hidrodinámica ha sido separada en un flujo profundo y lento que circula dentro del Macizo por medio de un sistema de fallas y afecta el nivel acuífero profundo en el Abanico aluvial de Bucaramanga; y un flujo más superficial y rápido referente a la circulación en la parte meteorizada del Macizo que afecta el nivel acuífero superficial en el Abanico. Por lo tanto, la concentración de sulfatos en el acuífero profundo es el resultado de procesos como oxidación de sulfuros e infiltración que tienen lugar en la zona de recarga, el Macizo de Santander.

7.2 Concentraciones de As y Pb en el agua subterránea de Qbo

Las concentraciones de As de las muestras analizadas están por debajo del valor de referencia (10 µg As/L) propuesto por la OMS para agua potable. También cumplen con los valores de referencia de la normatividad colombiana que establece el mismo de valor de la OMS para agua de consumo humano, 0,1 mg/L (= 100 µg/L) para agua de irrigación y 0,2 mg/L (= 200 µg/L) para uso pecuario.

Las concentraciones de Pb en los pozos profundos “Insercol” y “Prevesa” de 0,67 y 1,24 mg Pb/L, respectivamente; superan el valor de referencia de 0,01 mg Pb/L adoptado por la OMS y la legislación colombiana para agua de consumo humano. Tampoco es apta para uso pecuario según la legislación colombiana ya que las concentraciones exceden el límite de referencia de 0,1 mg Pb/L. Las concentraciones si son aptas para uso agrícola ya que las concentraciones en el agua subterránea son inferiores a 5 mg Pb/L.

De acuerdo con el contenido de As y Pb en las muestras analizadas, solo pueden ser destinadas a uso agrícola debido a que presentan un alto contenido de Pb, lo que condiciona su uso en agua de consumo y uso pecuario. El alto contenido de Pb en las muestras analizadas puede estar relacionado con un aporte antrópico por parte del relleno sanitario de El Carrasco y/o focos de contaminación por gasolina con aditivos de Pb en estaciones de servicio.

7.3 Parámetros fisicoquímicos del agua subterránea de Qbo

Los valores de Ph medidos in situ en el pozo “Insercol” de 7,9 (febrero de 2016) y de 7,49 (marzo de 2017) son relativamente más básicos que el valor neutro de pH (7,03) reportado por

Espinosa y Sierra (2015) para el mismo pozo profundo en octubre de 2015. El pH de 6,56 medido en el pozo profundo “Prevesa” es ligeramente ácido y presenta el mismo comportamiento en el valor reportado de 6,86 por Espinosa y Sierra en octubre de 2015. Los valores de pH encontrados en las aguas subterráneas cumplen con la legislación colombiana que estipula un rango de pH entre 6,5 y 9 para agua destinada a consumo humano y doméstico (Resolución 2115 del 2007) y un rango de pH entre 4,5 y 9 para agua de irrigación (Decreto 1594 de 1984).

8 Conclusiones

- El análisis de facies sedimentarias indica que el Miembro Órganos Superior representa un sistema de depósito de abanico aluvial. La naturaleza de este depósito de abanico aluvial muestra cambios progresivos desde la porción de abanico proximal cuyo componente principal son los depósitos por flujo de derrubios, reflejados en litofacies Gmm, hasta las partes medias y distales, donde hay un incremento en la abundancia de litofacies arenosas (St-Sp-Sm) y lodosas (Fm-Fl).
- La asociación de litofacies de abanico proximal AL1 se caracteriza por litofacies arenosas (St, Sp y Sm) con geometría lenticular, embebidas dentro de las litofacies principales de esta porción del abanico (Gmm y Gcm). Algunos niveles lodosos tabulares aparecen esporádicamente, usualmente en contacto erosivo al tope con gravas masivas, y a la base muestran una superficie ondulosa. La estratificación es pobremente desarrollada en las litofacies dominantes y se observan imbricaciones de clastos mal definidas. La asociación

de litofacies de abanico medio AL2 muestra una alternancia de litofacies gruesas con finas. Hay un incremento en la abundancia de capas con geometría lenticular, con presencia de estructuras sedimentarias tales como la estratificación cruzada en artesa y plana (St-Sp). Estos cuerpos tienen espesores de hasta 1.5 metros y una extensión lateral de hasta 10 m. En la asociación de litofacies de abanico distal AL3 encontramos la granulometría más fina (Fm-Fl), y el desarrollo de grandes canales es casi ausente debido a la baja energía. Las litofacies dentro de esta porción del abanico presentan una continuidad lateral mucho más marcada que en las litofacies de abanico medio y proximal. Predominan capas de lodos y arenas de grano fino con laminación horizontal y ondulitas.

- Las tomografías de resistividad eléctrica realizadas en el Miembro Órganos Superior muestran zonas geoeléctricas conductoras (saturadas) que presentan tanto geometrías lenticulares, así como ninguna tendencia geométrica. Las zonas geoeléctricas lenticulares se correlacionaron con litofacies arenosas St-Sp-Sm de geometría canaliforme, las cuales predominan en las porciones de abanico medio. Estas litofacies tienen un porcentaje importante de porosidad primaria, y sus resistividades oscilan entre 40-110 Ohm-m. Las zonas geoeléctricas con resistividades entre 10-25 Ohm-m sin ningún patrón geométrico pero distribuidas en todo el perfil *ERT* se correlacionaron hidrogeológicamente con arcillas saturadas, que corresponden a litofacies Fm-Fl. Sin embargo, aunque están saturadas, no son litofacies de interés, pues sabemos que tienen naturaleza impermeable. Las resistividades entre 25-100 Ohm-m presentes en la totalidad del perfil sin ninguna tendencia geométrica se correlaciona con limos saturados, lo cual corresponde también a litofacies Fm-Fl, que también tienen naturaleza impermeable en general. Las resistividades entre 160-500 Ohm-m con geometría lenticular aislada se correlacionaron con gravas saturadas de las litofacies

Gcm. Esta litofacies se define como un depósito de tamiz, el cual se caracteriza por ser gravas con porcentajes muy bajos de matriz, y, por ende, altos porcentajes de porosidad, lo cual le confiere un interés hidrogeológico. Por lo tanto, estos cuerpos canaliformes de litofacies St-Sp-Sm (40-110 Ohm-m) y Gcm (160-500 Ohm-m) que están saturados y ocurren como cuerpos permeables aislados en una matriz impermeable de litofacies Fm y Fl (10-25 Ohm-m) se comportan como acuíferos colgados con geometría limitada embebidos en acuitardos, lo que limita el interés hidrogeológico del Miembro Órganos Superior.

- El análisis hidroquímico indica aguas de tipo bicarbonatada cálcica y clorurada sódico-magnésica, este cambio en las facies hidroquímicas se relacionan con una fuente antrópica en el Abanico aluvial de Bucaramanga. Las concentraciones del ion cloruro (27,62 – 39,99 mgCl⁻/L) están por encima de la concentración *background* de 10 mg/L (INGEOMINAS, 2009; Gómez *et al.*, 2015) establecida para agua subterránea analizada en el Macizo de Santander, que es la zona de recarga de los acuíferos aluviales presentes en la zona de Bucaramanga. El comportamiento atípico del Cl⁻ puede deberse a una fuente de contaminación antrópica como deficiencias en el sistema alcantarillado y/o fugas en el sistema de acueducto que contaminan las aguas subterráneas.
- El análisis de los metales pesados As y Pb en las aguas subterráneas del Miembro Órganos Superior muestra que las concentraciones de Pb (0,67 y 1,24 mg/L) superan los límites permisibles en agua de consumo humano de acuerdo con la OMS y la legislación colombiana. Podría usarse únicamente como agua de irrigación debido a que las concentraciones son inferiores a 5mg Pb/L. El contenido de Pb en las muestras analizadas puede estar relacionado con un aporte antrópico por parte del relleno sanitario de El Carrasco y/o focos de contaminación por gasolina con aditivos de Pb en estaciones de

servicio. Por otro lado, los niveles de As están por debajo de la normativa internacional y nacional y no representan un riesgo de contaminación.

9 Recomendaciones

- Para realizar una caracterización hidroestratigráfica más robusta se sugiere realizar ensayos de bombeo en pozos profundos del Miembro Órganos para determinar parámetros hidráulicos.
- Realizar un muestreo de agua subterránea más denso que involucre la línea de flujo del acuífero profundo desde la zona de recarga (Macizo de Santander) hasta la zona de interacción con el río de Oro para analizar la evolución del agua subterránea.
- Realizar muestreos de Pb en el agua subterránea a través de la línea de flujo del acuífero profundo, incluyendo matrices como agua subterránea y agua superficial de las fuentes hídricas que interactúan con el sistema acuífero para identificar el origen de Pb en el agua subterránea. Enfocar el muestreo en los posibles focos de contaminación antrópica para descartar o confirmar contaminación de origen antrópico.

Referencias Bibliográficas

- Advanced Geosciences, Inc. (2009). Instruction Manual for Earthimager 2D version 2.4.0. Austin, Texas.
- Alonso, D. L., Latorre, S., Castillo, E., & Brandão, P. F. (2014). Environmental occurrence of arsenic in Colombia: A review. *Environmental pollution*, 186, 272-281.
- Appelo, C. A. J. & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Amsterdam, the Netherlands: Taylor & Francis Group.
- Arche, A. (2010). *Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Madrid.
- Assaad, F., LaMoreaux, P & Hughes, T. (2013). *Field Methods for Geologist and Hydrogeologist*. Alemania: Springer Science & Business Media.
- BARRERA, B. (2006). *Estimación de la recarga en la cuenca superior del río Lebrija mediante el balance de masa del ión cloruro*. Tesis de grado Ingeniería civil. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander.
- BV, D. C., & Hydraulics, D. (1999a). Major ions in water. *New Delhi, India*.
- BV, D. C., & Hydraulics, D., (1999b). Basic water quality concepts. *New Delhi, India*.
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. *Boletín Servicio Geológico Nacional*, 16(1-3), 5-96.
- Clark, I. (2015). *Groundwater geochemistry and isotopes*. CRC press.
- Clavijo, J. & Royero, G. J. M. (2001). Mapa geológico generalizado del Departamento de Santander, escala 1: 400.000. *Memoria explicativa del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS)*.

- Collazo Caraballo, M. P., & Montaña Xavier, J. (2012). *Manual de agua subterránea*. Denad International S.A.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). Hidrogeoquímica. *Hidrología Subterránea, 1*, 1005-1091.
- DigitalGlobe Basemap. (2015). *High resolution basemap layer on Esri ArcGIS Online World Imagery. GE01*.
- ESPINOSA JIMÉNEZ, J.M. & SIERRA ALARCÓN, O.A. (2015). *Análisis de la presencia de los metales pesados arsénico y plomo en el acuífero de Bucaramanga en la zona de influencia del sitio de disposición final de residuos sólidos el carrasco*. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander.
- Etayo, F. (1985). Metodología de Trabajo del Proyecto Cretácico. Bogotá: INGEOMINAS.
- GARNICA SUAREZ, A.F. & NIÑO PINTO, L.G. (2015). Caracterización Sedimentológica del Segmento Órganos de la Formación Bucaramanga en el Sector del Anillo Vial del Municipio de Girón Departamento de Santander. Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander.
- Gómez, S., Colegial, J., Pulido, M. & Gutiérrez, F. (2011). Proyecto de Investigación: Evaluación del peligro a la contaminación del recurso hídrico subterráneo en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Proyecto de Investigación CDMB, UIS Y GPH. Bucaramanga.
- Gómez, S., Taupin, J. & Rueda, J. (2015). Estudio hidrodinámico, geoquímico e isotópico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga (Colombia). *GEO-ATMOSFÉRICA RPGA*. vol. 4, p.44-61.
- Günther, T., & Rücker, C. (2011). The simulation of finite ERT electrodes using the complete electrode model. *Geophysics*, vol. 76, no 4, p. 227-238.

- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hettner, A. (1892). Die Kordillere von Bogota: Ergz zu Permans Mitteilungen.
- HOYOS PATIÑO, F., VÉLEZ, M. & ARIAS, D. (2000). *Investigación de Aguas Subterráneas Región Valles de San Nicolás*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Hubach, E. (1952). Interpretación Geológica de la erosión y de los deslizamientos en Bucaramanga y medidas de defensa. Servicio Geológico Nacional. Bogotá. Inf. 867, 2-4 inédito.
- INGEOMINAS. (2001a). Base de datos de fallas activas. Recopilación Bibliográfica. Proyecto Compilación y Levantamiento de la Información Geodinámica. Bogotá.
- INGEOMINAS. (2001b). Zonificación Sismo Geotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, Fase II. Convenio realizado entre la CDMB e Ingeominas. Bucaramanga.
- INGEOMINAS. (2008). Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. Bogotá.
- INGEOMINAS. (2009). Informe hidrogeológico del Macizo de Santander. Bogotá.
- Jiménez, G., Speranza, F., Faccena, C., Bayona, G. & Mora, A. (2015). Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: Evidence for a <3 mm/yr. slip rate for the Bucaramanga-Santa Marta fault, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*. vol. 57, p. 12-22.
- Julivert, M. (1958). La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S.A). *Boletín de Geología*, vol. 1, p. 7-43.
- Julivert, M. (1963). Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, No. 15, pp. 41-56.

- LIMA AMARA, M. C. & MEDINA RAMOS, J.D. (2015). *Evolución climática registrada y Estratigrafía del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga*. Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander.
- MANCERA, M., SALAMANCA, P. (1993). *Cartografía geológica y estratigráfica a detalle y Zonificación geotécnica del sector oriental del Área Metropolitana de Bucaramanga*. Tesis de grado Geólogo. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander.
- Miall, A. D. (1990). *Principles of sedimentary basin analysis, 2nd ed.* New York: Springer Verlag.
- Miall, A. D. (1977). *Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary*.
- Miall, A. D. (1985). *Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits*. Toronto, Canada: University of Toronto.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA. (1984). DECRETO 1594 DE 1984. Bogotá.
- MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Y MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2007). RESOLUCIÓN 2115 DE 2007. Colombia.
- MORA LÓPEZ, H.J. (2002). *Migración de Plomo a través de Facies Hidroquímicas del Agua Subterránea*. Trabajo de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería civil: Hidráulica y Energética.
- MORENO RUIZ, S.N. & PLATA GUERRERO, C.L. (2015). *Estudio Sedimentológico del Miembro Órganos en la Formación Bucaramanga, hacia el Escarpe Occidental en las Etribaciones del Municipio de Girón*. Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander.

- NIÑO AGUDELO, A.E & VARGAS PIESCHACON, G. (1992). *Geología y Geotecnia de la Escarpa Noroccidental de la Meseta de Bucaramanga*. Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander.
- Oppenheim, V. (1940). Jurassic-Cretaceous (Giron) beds in Colombia and Venezuela. *AAPG bulletin*, 24(9), 1611-1619.
- Organización Mundial de la Salud. (2003). Arsenic in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza).
- París, G., Machette, M., Dart, R. & Haller, K. (2000). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, p. 66.
- Pettijohn, F. J., & Potter, P. E. (1987). Sand and sandstone.
- Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Jour. Sed. Petrology*. v.23, p.117-119.
- RODRÍGUEZ URIBE, J.C. & TORRES JIMÉNEZ, D.C. (2011). *Inventario de puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentaria de la región de Bucaramanga*. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander.
- Sarmiento, L. (2002). Condiciones geológicas favorables de las sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia para la existencia de depósitos exhalativos submarinos de plomo y zinc. *Boletín de Geología*, 24 (39).
- Scholle, P. A. (1979). *A color illustrated guide to constituents, textures, cements, and porosities of sandstones and associated rocks* (No. 552.5 SCH).

- Vásquez, L., & De Bermoudes, O. (2004). Modelo Geológico-Geofísico para el Área Metropolitana de Bucaramanga. Informe Técnico INGEOMINAS. Bogotá.
- Walker, R. G. (Ed). (1984). *Facies models*. Geological Association of Canada.
- Ward, D. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. *Boletín Geológico Ingeominas*.