MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADES

Modelo Geológico-Geofísico de Resistividades en el Sector Norte de Bucaramanga, Colombia

Edgar Andrés Hernández Blanco

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director:

Francisco Alberto Velandia Patiño PhD en Geociencias

Codirectores: Jose David Sanabria Gómez PhD en Física

Oscar Fabian Sánchez Ortiz Ingeniero Civil

Universidad Industrial De Santander Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas Trabajo de Grado Bucaramanga 2021

Dedicatoria

A mis padres, por brindarme una excelente educación en casa y sacrificarse para que nunca nos faltara nada, son personas ejemplares, dedicadas, de las cuales aprendo cada día lo que es el amor por la familia y me siento muy afortunado de tenerlos como apoyo.

A mis abuelos, porque siempre han luchado por darle a sus hijos y nietos las mejores oportunidades en la vida, son unos guerreros, gracias infinitas. Todos mis logros son y serán para usted nona.

A mi hermana menor, por acompañarme en cada momento. He visto crecer a una mujer maravillosa de la cual me siento muy orgulloso, espero que logres todo lo que te propongas.

A mis tíos y primos, por siempre creer en mí, colaborarme con todo lo que he necesitado, soy un privilegiado por tenerlos como familia.

A mis compañeros de geología, coincidimos en este tramo de nuestra vida y pude establecer vínculos fuertes con muchos de ellos, hasta llegar a considerarlos amigos.

A mis amigos por fuera de la academia, coincidimos por diferentes situaciones y se han quedado en mi vida para darme momentos increíbles, cada sonrisa, cada reflexión, cada festejo, cada recuerdo lo atesoro con cariño.

A mi Alma mater y sobre todo a sus personas, por ser pieza fundamental en mi evolución personal, me han ayudado a cambiar mi forma de ver la realidad y a forjar parte de mi personalidad.

Los llevaré a todos siempre en mi corazón, Gracias.

Agradecimientos

Al grupo de investigación Geomática-UIS por permitirme hacer uso de los datos e información obtenidos por ellos en sus anteriores proyectos, en especial a todo el equipo de técnicos y profesionales que han contribuido en cada estudio geológico en el norte de Bucaramanga, gracias a esto pude llevar a cabo este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y a los docentes que han intervenido en mi formación académica desde primer semestre, en especial a los que forman parte de la Escuela de Geología, por guiarme de la mejor manera en mi camino académico y profesional.

Al director y los codirectores de esta tesis, por su acompañamiento a lo largo de este proceso, sus consejos, recomendaciones e instrucciones, siempre acertadas, ayudaron en esta última etapa de formación, especial gratitud para ustedes.

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivo Específicos	14
2. Propósito del Estudio	15
3. Localización	16
4. Marco Teórico	
4.1 Adquisiciones de Resistividad Eléctrica	23
41.1 Tomografía de resistividad eléctrica	
4.1.2 Propiedades eléctrica de los materiales terrestres	
4.1.3 Arreglo Wenner	
4.1.4 Arreglo Schlumberger	
4.1.5 Arreglo Wenner-Schlumberger	
4.2 Parámetros Petrofísicos	
4.3 Ensayos de Laboratorio	
4.3.1 Granulometría	
4.3.2 Peso Unitario	
4.3.2.1 Peso unitario saturado	
4.3.2.2 Peso unitario húmedo	
4.3.2.3 Peso unitario seco	
4.3.3 Difracción de rayos X (DRX)	
4.3.4 Análisis químico de suelos	
4.3.5 Determinación de humedad	
5. Marco Geológico	40
5.1 Introducción y Conceptos Útiles	40
5.1.1 Abanicos aluviales	
5.1.2 Depósitos de flujos de Escombros	20
5.1.3 Depósitos Aluviales	22
5.1.4 Depósitos Coluviales o de Ladera	22
5.2 Estratigrafía Regional	40

MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADES

5.2.1 Neis de Bucaramanga	41
5.2.2 Formación Silgara	41
5.2.3 Cuerpos Ígneos del Triásico-Jurásico	
5.2.3.1 Cuarzomonzonita de La Corcova	
5.2.3.2 Cuarzomonzonita de Santa Barbara	
5.2.3.3 Cuarzomonzonita, Granito y Pórfido Cuarzoso	43
5.2.4 Formación Girón	43
5.3 Estratigrafía Local	43
5.3.1 Formación Diamante	45
5.3.2 Formación Tiburón	46
5.3.3 Formación Bocas	46
5.3.4 Formación Bucaramanga	47
5.3.4.1 Miembro Órganos (Qbo)	
5.3.4.2 Miembro Finos (Qbf).	49
5.3.4.3 Miembro Gravoso (Qbg)	
5.3.4.4 Miembro Limos Rojos (Qblr).	
5.3.4.5 Miembro Órganos en la zona de estudio	
5.3.4.5.1 Miembro Órganos Inferior.	51
5.3.4.5.2 Miembro Órganos Superior.	51
5.3.4.5.3 Miembro Órganos Removido	51
5.4 Tectónica	
5.4.1 Falla Bucaramanga-Santa Marta	55
5.4.2 Falla Suarez	55
5.4.3 Fallamiento zona de estudio	56
6. Metodología	
6.1. Fase I	60
6.2 Fase II: Análisis de información Secundaria	63
6.2.1 Definición de litofacies	63
6.2.2 Parámetros petrofísicos	66
6.2.3 Tomografías de resistividad eléctrica	66
6.2.4 Preparación de los datos	67
6.3 Fase III: Modelamiento 3D	68
6.4. Fase IV: Síntesis de la información y redacción del informe final	69

7. Resultados
7.1 Modelo geológico
7.1.1 Litología a partir de columnas estratigráficas
7.1.1.1 Columna estratigráfica descriptiva S1:71
7.1.1.2 Columna estratigráfica descriptiva S2:
7.1.1.3 Columna estratigráfica descriptiva S3:
7.1.1.4 Columna estratigráfica descriptiva S4:
7.1.1.5 Columna estratigráfica descriptiva S5:
7.1.1.6 Columna estratigráfica descriptiva S6:74
7.1.1.7 Columna estratigráfica descriptiva S7b:74
7.1.1.8 Columna estratigráfica descriptiva S1g:74
7.1.1.9 Columna estratigráfica descriptiva S2g:75
7.1.1.10 Columna estratigráfica descriptiva S3g:
7.1.1.11 Columna estratigráfica descriptiva S4g:75
7.1.1.12 Columna estratigráfica descriptiva S5a:75
7.1.1.13 Columna estratigráfica descriptiva S6a:
7.1.2 Pruebas granulométricas
7.1.3 Difracción de Rayos X (DRX)77
7.1.4 Asociación de litofacies
7.1.5 Correlación e interpolación probabilística 2D
7.1.6 Visualización del modelo geológico 3D
7.2 Parámetros petrofísicos teóricos
7.3 Modelo de resistividades
7.4 Integración de los modelos
7.5 Visualización del modelo geológico-geofísico106
8. Análisis de resultados
9. Conclusiones
10. Recomendaciones
Referencias Bibliográficas

Tabla de figuras

Figura 1 Localización área de estudio 16
Figura 2 Mapa Geológico del área de estudio
Figura 3 Modelo deposicional de un abanico aluvial
Figura 4 Principales características que muestran los depósitos y otras facies asociadas
Figura 5 Flujo de corriente desde una sola fuente y la resultante distribución del potencial 26
Figura 6 Ejemplo de una configuración Wenner
Figura 7 Resistividad de las rocas, suelos y minerales
Figura 8 Secciones de sensibilidad para el Arreglo Wenner y sus permutaciones
Figura 9 Secciones de sensibilidad para arreglos Wenner-Schlumberger, variando el valor n 32
Figura 10 Esquema de relación de pesos y volúmenes en una muestra de suelo 39
Figura 11 Mapa geológico de la Terraza de Bucaramanga 44
Figura 12 Rasgos morfológicos y sistema Riedel indicadores de cinemática de rumbo sinextral
de la Falla de Bucaramanga54
Figura 13 Fallas en la zona de estudio57
Figura 14 Gráfico de la metodología del proyecto 59
Figura 15 Distribución de tomografías de resistividad eléctrica adquiridas por Geomática en
planta
Figura 16 Visualización 3D MAP en QGIS 3.2.2. Utilizada en fotointerpretación geológica 62
Figura 17 Distribución sondeos tomados por Geomática en campañas anteriores 64
Figura 18 Representación de columnas estratigráficas descriptivas a partir de los sondeos 65
Figura 19 Ejemplo de Tomografía de Resistividad Eléctrica

Figura 20 Herramientas utilizadas en la ejecución del código para el modelo geológico y su
relación
Figura 21 Diagrama de flujo para el modelamiento 3D 69
Figura 22 Gráficos de la distribución granulométrica de los sondeos S5, S6 y S7b
Figura 23 la Correlación Facial entre los Sondeos realizados
Figura 24 Secciones transversales del modelo geológico realizado en GemPy
Figura 25 Visualización 3D del modelado realizado por GemPy
Figura 26 Valores de CEC para minerales arcillosos principales
Figura 27 Gráfica de porcentaje de humedad en las muestras de los sondeos S1, S2, S3, S4 88
Figura 28 Perfiles de Tomografías de resistividad eléctrica G17 - G22, ubicadas al SW de la zona
de estudio
Figura 29 Perfiles de Tomografías de resistividad eléctrica G19 - G20, ubicadas al SW de la zona
de estudio
Figura 30 Perfiles de Tomografías de resistividad eléctrica G4 – G12, ubicadas al SW de la zona
de estudio
Figura 31 Perfiles de Tomografías de resistividad eléctrica G8 – G10, ubicadas al SW de la zona
de estudio
Figura 32 Tomografías para el análisis, cargadas en Voxler
Figura 33 Isosuperficies para distintos niveles de resistividades
Figura 34 Renderizado 3D de los valores de resistividad eléctrica en la zona
Figura 35 División en sectores utilizada en la descripción geológico-geofísica 101
Figura 36 Visualización cortes trazados en el modelo y mapa geológico
Figura 37 Visualización modelo geológico-geofísico 3D 107

Lista de Tablas

Tabla 1 Facies con sus respectivas convenciones. 5	51
Tabla 2 Esquema para la tabulación de las superficies para el modelo geológico	57
Tabla 3 Esquema para la tabulación de puntos para las orientaciones del modelo geológico 6	57
Tabla 4 Coordenadas magna-sirgas Bogotá de los sondeos	0
Tabla 5 Promedios porcentuales de los resultados de ensayos granulométricos	6
Tabla 6 Resultados cuantitativos de las fases cristalinas presentes en las muestras analizadas 7	18
Tabla 7 Asociación Facial realizada para los miembros de la Formación Bucaramanga7	19
Tabla 8 Valores de CIC y CE, obtenidos de 20 muestras por medio de análisis químico 8	36
Tabla 9 Resultados de los ensayos de peso unitario 8	37
Tabla 10 Parámetros petrofísicos estimados y valores de ensayos de laboratorio	39
Tabla 11 Información general de adquisición para las tomografías G17 - G229)()
Tabla 12 Información general de adquisición para las tomografías G19 - G20)2
Tabla 13 Información general de adquisición para las tomografías G4 – G12)4
Tabla 14 Información general de adquisición para las tomografías G8 – G10)4
Tabla 15 Integración de datos sector 1 10)1
Tabla 16 Integración de datos sector 1)2
Tabla 17 Integración de datos sector 1 10)2
Tabla 18 Integración de datos sector 1 10)3
Tabla 19 Integración de datos sector 1 10)3
Tabla 20 Integración de datos sector 1)4
Tabla 21 Integración de datos sector 1 10)4
Tabla 22 Integración de datos sector 1 10)5
Tabla 23 Integración de datos sector 1 10)5

Glosario

B: conductividad relativa de los contraiones de arcilla. ϕ : porosidad total de la roca. **CE**: conductividad eléctrica **CEC:** capacidad de intercambio catiónico. e: índice de porosidad. E: intensidad del campo eléctrico. ERT: tomografía de resistividad eléctrica. **σ:** conductividad del medio. Fm: formación estratigráfica. Gs: peso específico relativo del suelo. J: densidad de corriente. **ρ:** resistividad del medio. **r3:** espacio tridimensional. *R*_{*t*}: resistividad total de la roca. *R*_{*sh*}: resistividad de la arcilla. R_W : resistividad del agua salada. γ_w : peso específico del agua. v_Q : volumen de agua de arcilla. Va: volumen de aire. Vm: volumen de la muestra. Vv: volumen de vacíos. **Vw:** volumen de agua. Wa: peso del aire. Wm: peso de la muestra. Ww: peso del agua.

Resumen

Título: MODELO GEOLÓGICO-GEOFISICO DE RESISTIVIDADES EN EL SECTOR NORTE DE BUCARAMANGA. *

Autor: Edgar Andrés Hernández Blanco. **

Palabras Clave: Formación Bucaramanga, Modelo geológico, Modelo geofísico, Registro geoeléctrico, Litofacies.

Descripción:

El conocimiento de las características geológicas y geofísicas que se encuentran en el subsuelo, así como su correlación, es materia de interés en muchas áreas de investigación, por este motivo es de gran utilidad seleccionar la información disponible, estructurarla y convertirla en un modelo que muestre la distribución espacial de sus componentes. En el sector norte de Bucaramanga, Colombia afloran depósitos cuaternarios que pertenecen a la Formación Bucaramanga, la cual se compone principalmente de Gravas con matriz arenolodosas (Ggc) y Arenas ligeramente gravosas (Sg). En este proyecto se construye un modelo geológico-geofísico a partir de descripciones litológicas de núcleos, parámetros texturales y tomografías de resistividad eléctrica, haciendo uso de software de modelamiento tridimensional en conjunto con un análisis geológico respectivo de los resultados encontrados. Se identificaron 12 facies para los miembros de la Formación Bucaramanga, las cuales se agruparon en 4 asociaciones faciales. Estructuralmente encontramos una zona afectada en gran medida por fallas, lo que produce un fracturamiento en las rocas de los depósitos cuaternarios presentes y de las formaciones geológicas subyacentes, esto se refleja en los valores altos de resistividades (~900 ohm-m) que se obtienen en las áreas inmediatas a los planos de falla. Por otro lado, la creación de espacio a causa estas fracturas permite la acumulación de cuerpos de agua formado rocas altamente saturadas identificadas como valores bajos de resistividad (~15 ohm-m). La evaluación de las resistividades se hizo interpolando los datos obtenidos en las tomografías junto a una representación de isovalores que permitiera ver la concentración de los diferentes rangos de resistividades. Para integrar los resultados obtenidos se hace una correlación de los valores probables de resistividad que se pueden encontrar en cada asociación facial. Se organizó la descripción en tablas y se dividió la zona de estudio en 9 sectores debido al cambio en las condiciones geológicas que existen a lo largo del área y se realizó el modelo geológico 3D a partir de la correlación geológica-geofísica.

^{*} Proyecto de Grado en la modalidad de Investigación.

^{**} Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño; Codirectores: Jose David Sanabria Gómez y Oscar Fabian Sánchez Ortiz.

Abstract

Title: GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL RESISTIVITY MODEL IN THE NORTH OF BUCARAMANGA, COLOMBIA. *

Author: Edgar Andrés Hernández Blanco. **

Key Words: Bucaramanga Formation, Geological Model, Geophysical Model, Geoelectrical Survey, Lithofacies.

Description:

The knowledge of the geological and geophysical characteristics found in the underground, as well as their correlation, is a subject interest in many research areas, for this reason it is very useful to select the available information, structure it and turn it into a model that shows the spatial distribution of its components. Quaternary deposits that belong to the Bucaramanga Formation emerge in the northern sector of Bucaramanga, Colombia, which is mainly composed of gravels with a sandy matrix (Ggc) and slightly gravelly sands (Sg). In this project, a geologicalgeophysical model is built from lithological descriptions of cores, textural parameters, and electrical resistivity tomographies, making use of three-dimensional modeling software in conjunction with a respective geological analysis of the results found. Twelve (12) facies were identified for the members of the Bucaramanga Formation, which were grouped into four (4) facial associations. Structurally we find an area largely affected by faults, which produces a fracturing in the rocks of the quaternary deposits and of the underlying geological formations, this is reflected in the high values of resistivities (~ 900 ohm-m) that are obtained in the immediate areas of the fault planes. On the other hand, the creation of space caused by these fractures allows the accumulation of water bodies, forming highly saturated rocks identified as low resistivity values (~ 15 ohm-m). The evaluation of the resistivities was made by interpolating the data obtained in the tomographies together with a representation of isovalues that allowed to see the concentration of the different ranges of resistivities. To integrate the results obtained, a correlation of the probable resistivity values that can be found in each facial association is made. The description was organized in tables and the study area was divided into nine (9) sectors due to the change in geological conditions that exist throughout the area, then the geologic model was made from the geological-geophysical correlation.

^{*} Degree Project (in) Research Modality.

^{**} Universidad Industrial de Santander. Physicochemical Engineering. Geology School. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño; Co-Directors: Jose David Sanabria Gómez and Oscar Fabian Sánchez Ortiz.

Introducción

Por medio del presente trabajo se construye un modelo geológico-geofísico de un área de aproximadamente 1 km² en el norte de Bucaramanga, partiendo de un conjunto de componentes geológicos, geofísicos junto con datos petrofísicos, con el fin de comprender del comportamiento del subsuelo.

Para representar la geología particular de la zona de estudio se pretende realizar un modelo geológico-geofísico 3D a partir de la determinación de facies y electrofacies, considerando los rasgos estructurales y las propiedades petrofísicas de la roca. Este modelo se hará por medio de descripciones litológicas y petrofísicas de núcleos extraídos de la zona e interpretación de información geofísica.

En base a los datos geofísicos obtenidos de tomografías de resistividad eléctrica (modelo de resistividades), pruebas de resistividad y porosidad realizadas en laboratorio, se hará una correlación con las variaciones faciales litológicas para agrupar sedimentos y/o roca con un comportamiento geofísico similar.

Los resultados adquiridos ayudarán a construir un modelo geológico-geofísico con el fin de realizar un aporte al conocimiento de las características geoeléctricas del subsuelo del norte de Bucaramanga que contribuya a futuras investigaciones.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Establecer un modelo geológico-geofísico 3D en la zona norte de Bucaramanga en donde se identifique y ubiquen espacialmente las unidades litológicas y sus propiedades eléctricas, el modelo se obtendrá en base a información bibliográfica, descripciones litológicas de núcleos, tomografías de resistividad eléctrica adquiridas por el grupo de investigación Geomática – UIS y ensayos de laboratorio existentes, con el propósito de aumentar el conocimiento geológico y de las propiedades petrofísicas en los depósitos cuaternarios presentes.

1.2 Objetivo Específicos

- Cuantificar teóricamente con datos existentes los parámetros petrofísicos de las rocas en el Norte de Bucaramanga por medio de información secundaria de porosidad y conductividad eléctrica.
- Identificar las unidades geológico-geofísicas a partir de la litología, las ERT y la información petrofísica disponible en la zona de estudio, intentando explicar petrofísicamente los comportamientos vistos en las pruebas geofísicas.
- Construir un modelo geológico-geofísico 3D utilizando la herramienta GemPy correlacionando espacialmente las unidades de roca desde una perspectiva de sus características litológicas y geofísicas.

2. Propósito del Estudio

Según la zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga realizada en el año 2001 por la subdirección de amenazas geoambientales del INGEOMINAS, el sector norte del municipio de Bucaramanga está clasificado como una zona susceptible a la ocurrencia de deslizamientos de tierra de gran magnitud por su tendencia a erosionarse formando surcos y cárcavas que producen forma de estoraques. La zona adicionalmente se encuentra saturada de agua subterránea que detona la ocurrencia de movimientos del suelo y genera daños en infraestructura y edificaciones (UIS-AMB, 2017).

En la zona se encuentran depósitos meteorizados correspondientes al miembro Órganos de la Formación Bucaramanga que presentan poca compactación, alta permeabilidad y son fácilmente erodables, lo que facilita el desprendimiento de bloques y cantos en las épocas de fuertes precipitaciones, esto implica riesgos para los habitantes como la pérdida de bienes materiales o incluso una amenaza para la vida de los mismos. Por esto se requiere un conocimiento a profundidad de las características geoeléctricas del subsuelo, que ayude a establecer medidas preventivas eficaces en el futuro.

Los métodos geofísicos tienen especial importancia debido a que nos ayudan a estudiar las propiedades físicas en profundidad de manera indirecta siendo más accesible desde un punto de vista económico que cualquier método de exploración directa.

Esta investigación plantea un aporte en el estudio de las características geológicas y su distribución espacial en el subsuelo, estudiando las propiedades geofísicas distintivas para elaboración de un modelo geológico-geofísico que contribuya al desarrollo de posibles alternativas de mitigación a los problemas geotécnicos que presenta el norte de Bucaramanga.

3. Localización

El área seleccionada corresponde a una zona de 1 km² ubicada en el sector norte de Bucaramanga, Santander, los barrios dentro de la zona son: Villa Helena, Villa Rosa, Los Ángeles, Esperanza III y parte de Villa María. El área de estudio se muestra a continuación (ver **figura 1**).

Figura 1

Localización área de estudio.



Nota. Imágenes satelitales tomadas de Google Earth (2021).

El área de estudio se ubica principalmente en un sector urbanizado del norte de Bucaramanga, esto implica que haya redes de alcantarillado aproximadamente hasta 10 m de profundidad según el catastro de la infraestructura del acueducto. Se debe considerar a la hora de evaluar las tomografías ya que esto puede producir ruido. Para visualizar las unidades geológicas que afloran en el área de estudio se utilizó la sección del mapa geológico de Colombia realizado por SGC en 2015 (**figura 2**), en conjunto con lo reportado en INGEOMINAS (2008, 2010), Jimenez, Bayona y Mora (2015).

Figura 2

Mapa Geológico del área de estudio.



Nota. Digitalización realizada en QGIS 3.2.3 en base a la información geológica de la zona reportada por INGEOMINAS (2008, 2010), Jiménez et al. (2015) y SGC (2015). Las fallas mostradas se trazaron a partir de Geomática-UIS (2018) y Galán–Mora (2019).

Como se observa, en el área de estudio afloran aluviales recientes y depósitos coluviales del cuaternario pertenecientes a la Formación Bucaramanga y en menor medida, limolitas con intercalaciones de arenitas, arcillolitas y en algunas zonas afloran segmentos de la Formación Diamante hacia el NE. También se pueden distinguir algunas estructuras como las Fallas Chitota, Las Olas y algunas fallas locales, así como el Río Surata y el Río de Oro en la parte noroeste.

4. Marco Teórico

4.1 Conceptos geológicos generales

4.1.1 Abanicos aluviales

Los abanicos aluviales son depósitos con formas gruesas que se aproximan a un segmento de un cono y exhiben un perfil convexo. Los abanicos aluviales recientes son particularmente comunes en áreas de alto relieve, generalmente en la base de una cadena montañosa, donde existe un abundante suministro de sedimentos. En muchos casos, se forman pendiente abajo de escarpes de fallas regionales (Boggs, 2006). Esta elevación topográfica es rápidamente denudada proporcionando los sedimentos que construyen los abanicos (ver **figura 3**). Los sedimentos en los abanicos aluviales generalmente están mal seleccionados e incluyen abundantes detritos del tamaño de grava (Colombo, 2010).

Figura 3



Modelo deposicional de un abanico aluvial.

Nota. Tomado de Boggs (2006).

Se origina cuando un flujo que circula por un canal principal de un relieve montañoso llega a una zona de pendiente abrupta producto un desplazamiento tectónico de una falla regional y pierde bruscamente su confinamiento, esto implica un decrecimiento muy rápido de su velocidad, por lo que se empiezan a depositar los sedimentos que transportaba de manera radial (Blair & McPherson, 1994), lo que facilita su distinción de otros ambientes fluviales.

La deposición rápida involucra un desarrollo de texturas sedimentarias específicas, de manera que los sedimentos clásticos generalmente son de subangulosos a 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 (Colombo, 2010).

Ocurren tanto en regiones áridas o semiáridas con escasa vegetación, donde el transporte de sedimentos ocurre con poca frecuencia, pero con gran violencia durante ráfagas de nubes

MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADES

repentinas, como en áreas más húmedas donde la lluvia es intensa. En entornos áridos o semiáridos, los abanicos aluviales pueden llegar a ambientes inferiores de suelo desértico con drenaje interno, incluidos los entornos de lago de playa (Boggs, 2006). En ambiente húmedo tropical, el clima promueve la erosión química más que la mecánica generando detritos de tamaño grueso.

Los sedimentos de abanico aluvial están dominados por depósitos de grava, que típicamente muestran una disminución el tamaño del grano, grosor de capa y un aumento en la clasificación de sedimentos hacia las partes distales. Los abanicos dominados por flujo de escombros se caracterizan por paquetes de sedimentos gruesos mal ordenados, comúnmente con una matriz lodosa. Los sedimentos del flujo de la corriente constituyen más depósitos en forma de láminas de grava, arena y limo que pueden estar moderadamente bien clasificados, con estratificación cruzada, laminados o casi sin estructura (Walker, 1984. Boggs, 2006).

4.1.2 Depósitos de flujos de Escombros

Son depósitos de origen aluvio-torrencial y aluvio-gravitacional, característicamente tienen una selección pobre y presencia escasa (casi nula) de estructuras sedimentarias. La presencia de capas delgadas de areniscas conglomeráticas entre conglomerados sin orden evidencia que ocurrieron detenciones momentáneas de transporte de roca durante su formación (ver **figura 4**), permitiendo un retrabajamiento superficial causa de corrientes acuosas (Colombo, 2010).

Figura 4



Principales características que muestran los depósitos (debris flow) y otras facies asociadas.

Nota. Tomado de Colombo (2010).

Pueden contener bloques de varios tamaños incluyendo cantos rodados grandes, son típicamente impermeables y no porosos debido a su alto contenido de matriz lodosa (Boggs, 2006) y su retrabajamiento es más notorio cuando los periodos de detención de las coladas de roca son más extensos. Estos procesos permiten tener gradaciones inversas hacia el techo de los depósitos como se puede observar en la figura 4.

En la zona de nuestro interés, los depósitos de flujo de escombros provienen principalmente de materiales producto de la denudación del Macizo de Santander que han descendido por medio de canales de corriente (INGEOMINAS 2004).

4.1.3 Depósitos Aluviales

Depósitos de material detrítico resultado de una compleja interacción entre el clima, características topográficas, hidrología, geología de la cuenca junto con procesos de erosión (Gómez-Villar, 1996), los sedimentos son transportados por ríos y quebradas mayores y depositados en puntos a lo largo de su llanura de inundación y terrazas, los cuales se distribuyen de acuerdo con la altura y su posición en los valles, por lo cual constituyen formas deposicionales que forman un ambiente de transición entre la montaña y llanura. Los depósitos detríticos de edad Cuaternaria en el área metropolitana de Bucaramanga conforman una terraza (INGEOMINAS, 2004).

El estudio de estos depósitos permite encontrar desde un punto de vista geomorfológico áreas con mayor inestabilidad asociadas a un rio principal. Dependiendo de las características topográficas y ambientales de la cuenca se pueden relacionar con abanicos aluviales, por lo tanto, el conocimiento de su morfología y dinámica es fundamental para analizar el comportamiento erosional/deposicional del sistema fluvial (Gómez-Villar, 1996).

4.1.4 Depósitos Coluviales o de Ladera

Bates y Jackson (1980) definen los depósitos coluviales como aquellos materiales sueltos y heterogéneos del suelo o fragmentos de roca que son depositados en la base de las laderas por la acción de la lluvia en conjunto con la gravedad a través de procesos como deslizamientos o reptación. Los coluviones generalmente son una mezcla de fragmentos angulares y materiales finos, generalmente se caracterizan por su composición variada con una porosidad y permeabilidad

relativamente alta, debido a su carácter heterogéneo donde se mezcla suelo y fragmentos de roca que van desde partículas de arcilla hasta bloques de varios metros de diámetro, esto también los hace muy susceptibles a deslizamientos.

Su geomorfología se caracteriza por ser laderas onduladas, mucho más suaves que las pertenecientes a la roca que produjeron su material parental.

4.2 Adquisiciones de Resistividad Eléctrica

Los métodos geofísicos son una herramienta que permite estudiar las propiedades físicas del subsuelo de manera indirecta, utilizando principios físicos que se reflejan en las características de las rocas. Los componentes eléctricos de una roca se definen completamente a partir de tres propiedades: La permitividad dieléctrica, la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética.

La permitividad dieléctrica refleja la polarización de un material cuando es expuesto a un campo eléctrico a una frecuencia dada. La constante dieléctrica del agua es considerablemente mayor que la de una roca por lo tanto sus medidas en registros dieléctricos dan el volumen del agua en formación, con apenas efectos debido a su salinidad.

Mientras que la conductividad eléctrica, o su recíproca, la resistividad se utiliza para caracterizar los materiales principalmente por las variaciones de resistividades eléctricas (o conductividad) que tienen los distintos medios en el subsuelo en función de su litología, saturación de agua, conductividad de fluidos, porosidad y permeabilidad, con esto se puede realizar un mapeo de unidades que se distinguen por estas características. En la mayoría de las rocas, la conductividad tiene como agente principal el fluido presente en los poros que actúa como electrolito, mientras que los granos minerales contribuyen muy poco sobre el total de la conductividad de la roca (Reynolds, 1997). En algunos casos es importante considerar variables de ambiente como presión

y temperatura, dependiendo de cómo interactúen estas variables cambiaran las propiedades eléctricas de la roca (UChile, 2019). Debido a sus numerosas aplicaciones (especialmente hídricas), existen diferentes tipos de mediciones de resistividad eléctrica.

Por último, la permeabilidad magnética es apenas considerada en estudios de prospección petrolera e hídrica, ya que en la mayoría de los reservorios es mínima, por la escasez de minerales magnéticos en las rocas siliciclásticas.

4.2.1 Tomografía de resistividad eléctrica

Es un método geofísico ampliamente utilizado en la actualidad, el cual sigue el mismo principio físico que el sondeo eléctrico vertical, su objetivo es determinar la distribución de la resistividad de la subsuperficie haciendo medidas en la superficie del suelo. Las corrientes eléctricas fluyen en los materiales del subsuelo a profundidades someras. A partir de estas medidas, la resistividad verdadera de la subsuperficie puede ser estimada (Loke, 2004).

La ley física fundamental usada en las adquisiciones de resistividad es la Ley de Ohm, la cual gobierna el flujo de corriente en el suelo. La ecuación de la Ley de Ohm en forma vectorial para el flujo de corriente en un medio continuo es dada por

$$J = \sigma E$$

Donde σ es la conductividad del medio, J es la densidad de corriente y E es la intensidad del campo eléctrico. En la práctica lo que se mide es el potencial de campo eléctrico. Hay que resaltar que en las adquisiciones geofísicas es más usado la resistividad del medio ρ , la cual es igual al reciproco de la conductividad ($\rho = 1/\sigma$). Mientras que la relación entre el potencial eléctrico y la intensidad del campo es dada por

$$E = -\nabla \varphi$$

Partiendo de estas dos ecuaciones se desarrolla todo el modelo fisicomatemático para calcular la distribución del potencial eléctrico en el suelo ocasionado por una fuente de corriente, de la cual, se debe conocer su distribución espacial.

Para el caso más simple, en el cual tenemos una superficie homogénea y un solo punto fuente de corriente en la superficie, la corriente fluye radialmente desde la fuente y el potencial varía inversamente con la distancia desde la fuente de corriente (Loke, 2004). Las superficies equipotenciales tienen una forma hemisférica, y el flujo de corriente es perpendicular a la superficie equipotencial (ver **figura 5**). El potencial en este caso es dado por

$$\varphi = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Donde r es la distancia al punto en el medio (incluyendo la superficie del suelo) desde el electrodo. En practica, todas las adquisiciones de resistividad usan al menos dos electrodos de corriente, una fuente positiva de corriente y otra negativa. La distribución causada por un par de electrodos, los valores del potencial tienen un patrón simétrico sobre la posición vertical del punto medio entre los dos electrodos.

Con esta sencilla explicación se puede formar una idea del concepto detrás de las adquisiciones que miden la resistividad eléctrica de un material, la teoría detrás de los cálculos verdaderos de campo, donde los problemas geométricos tienen mayor complejidad, se realiza a través de técnicas de resolución de ecuaciones y se pueden encontrar en Loke (2004).

Figura 5



Flujo de corriente desde una sola fuente y la resultante distribución del potencial.

Nota. Tomado de Loke (2004).

Las adquisiciones en tomografía eléctrica siguen el mismo principio físico anteriormente mencionado el cual es el mismo del sondeo eléctrico vertical. Su particularidad consiste en realizar mediciones de forma automática, ya que los cables de múltiples núcleos son desplegados a lo largo de la configuración de electrodos (Griffiths and Barker 1993), se conectan a una consola central junto con una unidad de conmutación, que procesa combinaciones complejas (rotando los electrodos seleccionados en cada medición) dependiendo del arreglo, para construir una sección transversal de resistividades aparentes debajo de la línea de reconocimiento. Eso permite determinar la distribución de la resistividad en las capas del subsuelo hasta cierto rango de profundidad, caracterizando de forma precisa las discontinuidades y alternancias de materiales de diferente conductividad. Existen distintos tipos de arreglos en la disposición y configuración de los electrodos como por ejemplo arreglo Wenner (ver **figura 6**), estos nos dan ventajas y desventajas dependiendo del terreno en el que estemos.

Figura 6





4.2.2 Propiedades eléctrica de los materiales terrestres

Las corrientes eléctricas en los materiales terrestres a profundidades superficiales se dan principalmente por dos métodos (conducción eléctrica y conducción electrolítica). En la conducción electrónica, el flujo de corriente se da por medio de electrones libres, como en metales. En la conducción electrolítica, el flujo de corriente es por medio del movimiento de iones en el agua subterránea (Loke, 2004).

Para el caso propio de adquisiciones ambientales es más probable que el mecanismo principal sea la conducción electrolítica, ya que la conducción electrónica solo es importante cuando minerales conductivos están presentes.

Las resistividades de rocas comunes, materiales del suelo y químicos se muestran en la **figura 7** (Keller & Frischknecht 1966, Daniels & Albert 1966, Telford et al. 1990, citados en Loke 2004). Como se puede ver las rocas Ígneas y Metamórficas típicamente tienen valores altos de resistividad. La resistividad de estas rocas es ligada en gran medida al grado de fracturamiento, y que porcentaje de fracturas este relleno de agua. Las rocas sedimentarias, las cuales tienen usualmente más poros y tienen un mayor contenido de agua, normalmente tienen valores de resistividad menores comparados con las rocas ígneas y metamórficas (Loke, 2004).

Los sedimentos no consolidados generalmente tienen valores de resistividad aun menores que las rocas sedimentarias. Los valores de resistividad son dependientes de la porosidad (asumiendo que los poros están saturados) así como también del contenido de arcilla. Hay que considerar que la resistividad de una roca o suelo particular depende de un número de factores como porosidad, grado de saturación y concentración de sales disueltas del agua (Loke, 2004).

Figura 7



Resistividad de las rocas, suelos y minerales.

4.2.3 Arreglo Wenner

Para un arreglo de cuatro (4) electrodos, hay tres (3) posibles permutaciones de las posiciones de los electrodos. El arreglo Wenner es relativamente sensible a los cambios verticales en la resistividad del subsuelo debajo del centro del arreglo. Sin embargo, es menos sensible a los cambios horizontales en la resistividad del subsuelo (ver **figura 8**). En general, el arreglo Wenner es bueno identificando estructuras horizontales, pero relativamente pobre detectando estructuras verticales angostas, es decir, cambios horizontales (Loke, 2004).

Nota. Tomado de Loke (2004).

Existen otras dos permutaciones del arreglo Wenner, arreglos Wenner Beta y Wenner Gamma. En el arreglo Wenner Beta el espaciamiento entre los electrodos es el mismo. El arreglo Wenner Gamma tiene una configuración inusual, donde los electrodos de potencial y los electrodos de corriente están intercalados (**figura 8**).

Figura 8

0.60-

0.70-0.80-0.90-1.00-

-1.00



Secciones de sensibilidad para el Arreglo Wenner y sus permutaciones Beta y Gamma..

Nota. Tomado de Loke (2004). La figura a) se le conoce como alpha o simplemente arreglo Wenner. Los arreglos b) y c) si son conocidos como beta y gamma respectivamente.

0.50

1.00

1.50

2.00

0.00

-0.50

-2048

4.2.4 Arreglo Schlumberger

Consiste en cuatro electrodos colineales. Los dos electrodos exteriores son electrodos de corriente y los dos electrodos interiores son electrodos de potencial. Los electrodos de potencial son instalados en el centro del arreglo de electrodos con una pequeña separación, típicamente menos de un quinto del espacio entre los electrodos de corriente. Los electrodos incrementan su separación durante la adquisición mientras que los electrodos de potencial se mantienen en la misma posición hasta que el voltaje observado se vuelve muy pequeño para ser medido.

Las ventajas del Arreglo Schlumberger son que se necesitan pocos electrodos para mover entre sondeos y la longitud del cable para los electrodos de potencial es más corta. Los sondeos con Schlumberger generalmente tienen una mejor resolución, mayor profundidad de sondeo y menos tiempo de implementación de campo que el arreglo Wenner.

Las desventajas son que se requiere una gran longitud de cable para electrodos de corriente, el instrumento de medición/grabado necesita ser muy sensible, y el arreglo puede ser difícil o confuso de coordinar entre el equipo de trabajo de campo.

4.2.5 Arreglo Wenner-Schlumberger

Es una fusión entre los arreglos Wenner y Schlumberger (Pazdirek y Blaha, 1996) surgiendo en trabajos a inicios de los 2000's. El arreglo Schlumberger clásico es una de las configuraciones más utilizadas para los sondeos de resistividad. El sistema consta de electrodos dispuestos en un espaciamiento constante (ver **figura 9**). Se denomina factor "n" a la razón de la distancia entre los electrodos C1-P1 (o P2-C2) sobre el espaciamiento entre los pares potenciales P1-P2.

En la figura 9 se observa los patrones de sensibilidad para este arreglo, se incrementa el factor "n" desde 1 (Arreglo Wenner) hasta 6 (Arreglo Schlumberger). El área de mayor sensibilidad por debajo del centro del arreglo se vuelve más concentrada debajo de los electrodos centrales P1-P2 a medida que el factor "n" aumenta.

Este arreglo es moderadamente sensible tanto a estructuras horizontales (para valores bajos de "n") como a estructuras verticales (para valores altos de "n"). En áreas donde se esperan los dos tipos de estructuras geológicas, este arreglo podría ser un buen consenso entre los arreglos Wenner y dipolo-dipolo (Loke, 2004).

La profundidad media de investigación para este arreglo es alrededor de 10% más profundo que la del arreglo Wenner para la misma distancia entre los electrodos externos (C1-C2) para valores de "n" mayores a tres (3).

El arreglo Wenner-Schlumberger (junto con niveles de datos traslapados) es una alternativa razonablemente completa cuando se necesitan buenas resoluciones verticales, particularmente si se requiere una buena fuerza en la señal (Loke, 2004).

Figura 9





Nota. Tomado de Loke (2004). Se aumenta el valor del factor "n". a) n = 1. b) n = 2. c) n = 4. d) n = 6.

4.3 Parámetros Petrofísicos

La evaluación de rocas, principalmente en un estudio petrolífero, requiere el conocimiento de sus propiedades de transporte de fluido y las interacciones fluido-roca que influyen en el flujo de los fluidos. El conocimiento general de este fenómeno puede ser conseguido a través del estudio de muestras de roca extraídas de afloramiento, en consiguiente se hace una predicción de comportamiento del reservorio a partir del análisis de sus propiedades petrofísicas.

Esta predicción se hace con un modelado, el cual es un proceso o procedimiento utilizado en la interpretación los datos petrofísicos de un registro de pozo. Generalmente representado por un conjunto de ecuaciones, algoritmos u otros procesos matemáticos, los modelos petrofísicos a menudo tienen varias prácticas. También contienen los parámetros necesarios para la cuantificación de las propiedades de roca fluido como la arcillosidad, la porosidad efectiva, porosidad total y la saturación de fluidos.

Los parámetros petrofísicos clave estudiados son litología, porosidad, saturación de agua, permeabilidad y densidad, los cuales son los parámetros de entrada en la realización de modelos estadísticos.

A menudo, el modelo se calibra utilizando núcleos, producción, pruebas y otros conjuntos de datos. Aunque muchos paquetes de software contienen modelos petrofísicos listos para usar o rutinas de componentes a las que se puede recurrir, muchos problemas de análisis de registros son únicos y requieren que se construyan modelos "a medida", sin embargo, la construcción de nuevos modelos petrofísicos normalmente depende de los datos disponibles y de la naturaleza del problema a resolver. Los registros de conductividad eléctrica son muy prácticos para conocer las propiedades de la roca y su espacio poroso.

En la teoría petrofísica se utiliza la ecuación de Archie como referente al tratar de analizar las propiedades eléctricas del medio subterráneo. La ecuación de Archie solo se cumple para cierto grupo de rocas denominadas las rocas de Archie. Estas son areniscas simples de poca arcilla, con una estructura porosa regular y agua con un alto grado de salinidad, donde su resistividad es directamente proporcional a la resistividad del agua contenida (Doveton, 2014). También se requiere un conocimiento de la estructura interna de la roca, su geometría, compactación y la distribución de sus poros. Debido a esto se necesitó de variaciones que permitieran el análisis de rocas con un contenido de lodo considerable, es decir, rocas que no cumplían las condiciones para ser una roca de Archie.

La principal razón que separa las areniscas lodosas de las rocas de Archie es su baja resistividad, esto se debe a la conductividad asociada con los minerales arcillosos, lo que causa una sobreestimación en la saturación del agua y por lo tanto un cálculo pesimista en la búsqueda de gas o petróleo (Doveton, 2014). La conductividad asociada al shale es causada por el intercambio catiónico de las arcillas constituyentes, el cual puede ser mayor o menor dependiendo del mineral arcilloso y de la salinidad de los fluidos con los que interactúa (Clavier, 1984).

Sin embargo, las propiedades de intercambio catiónico no son tan asequibles, por esto, la derivación de estas propiedades a partir de los registros mismos es preferible en la mayoría de las aplicaciones (Doveton, 2014), lo cual llevó a diferentes investigadores a desarrollar modelos que puedan trabajar en coordinación con las propiedades adquiridas de los registros de pozo y las propiedades texturales de la roca.

4.4 Ensayos de Laboratorio

Los ensayos de laboratorio se utilizan para estudiar una muestra de núcleo de una formación geológica, generalmente obtenida durante perforaciones por medio de aparatos especiales que extraen una sección cilíndrica de roca (Castilla & Herrera, 2012). En la industria de la geología económica son de gran importancia ya que el análisis de núcleos es utilizado para determinar las propiedades de la matriz de roca que constituye un recurso importante para la caracterización de formaciones. Este proceso ayuda a los geocientíficos a evaluar la porosidad, la permeabilidad, la saturación de fluido, la densidad de grano, la litología y la textura (Andersen, Duncan and McLin, 2011). Esta información es utilizada para calibrar las mediciones derivadas de los registros geofísicos.

4.4.1 Granulometría

Se utiliza para describir o determinar la distribución del tamaño de las partículas en los materiales rocosos. El método considera material en el cual el tamaño de las partículas es mayor a 0,075 mm y más pequeñas de 100 mm. Para partículas más pequeñas que 0.075 mm, se realiza un proceso de sedimentación utilizando un hidrómetro es necesario. Para materiales en donde el tamaño de las partículas es mayor a 100 mm, la distribución se determina visualmente (Geotechnical Engineering Bureau, 2015).

Una muestra del material pesada es separada a través de una serie de tamices con aperturas progresivamente más pequeñas. La distribución del tamaño de las partículas es determinada por el peso del material retenido en cada tamiz y dividiendo estos pesos por el peso total de la muestra. Para una muestra húmeda el método requiere secado, lavado y una serie de separaciones.

4.4.2 Peso Unitario

Es la masa de un volumen unitario de roca/suelo, este incluye el volumen de las partículas individuales y volumen poral, ya sea relleno con agua (peso unitario saturado) o secos (peso unitario seco). El peso unitario del suelo no solo puede varia por la cantidad de agua del material (condición seca, húmeda o saturada), también dependerá de las condiciones de compactación y consolidación que esté presente (Botía, 2015).

4.4.2.1 Peso unitario saturado. Se define como el peso de la masa de roca/suelo saturado por unidad de volumen, donde los vacíos están llenos de agua.

4.4.2.2 Peso unitario húmedo. Es el peso de la masa de roca/suelo por unidad de volumen, donde los vacíos porales del material contienen ambos, agua y aire.

4.4.2.3 Peso unitario seco. Es el peso de la masa de roca/suelo seco por unidad de volumen, donde como su nombre lo dice, los poros no tienen agua.

4.4.3 Difracción de rayos X (DRX)

Desde el entendimiento de la estructura del NaCl, miles de minerales han sido estudiados con el propósito de determinar su estructura cristalina, este conocimiento es importante ya que hay propiedades de una sustancia que solo puede ser entendidas completamente a través de su estructura (Cullity & Stock, 2014).

Es un método de análisis estructural, que permite identificar los minerales por su estructura cristalina, permite indirectamente estimar la composición de una muestra analizada con un acercamiento considerable del contenido de elementos mayoritarios (Melgarejo et al., 2010).

Se basa en la radiación coherente se origina a partir del choque de los fotones incidentes contra los electrones de los átomos del cristal. El material está conformado por muchos átomos y
cada uno de ellos funciona como una fuente de radiación coherente, produciendo fenómenos de interferencia constructiva y destructiva entre los ratos X dispersados (Betancourth et al., 2010). En la interferencia constructiva se producen máximos de intensidad en la difracción el cual es detectado para la identificación de las estructuras cristalográficas presentes en las muestras.

4.4.4 Análisis químico de suelos

La composición del suelo es compleja, es una mezcla de sustancias (minerales y orgánicas) que hacen muy difícil su caracterización. Afortunadamente hay una serie de características físicas y químicas que permiten determinar mediante ensayos de laboratorio, que hacen posible su entendimiento de su composición, en estos análisis se estudia el pH, CEC, CE, el contenido de materia orgánica, fósforo, sales minerales, azufre entre otros componentes.

Una roca saturada de una solución acuosa con sales minerales permite que una corriente eléctrica pase a través de esta debido al electrolito que satura los poros (conductividad electrolítica). Se concluye que cuando la roca es saturada por agua, esta influye fuertemente en su resistividad (Bracamontes, 2015). Por esta razón los ensayos de conductividad o resistividad eléctrica son de gran ayuda en la estimación del nivel de saturación de una roca, así como el contenido de salinidad del agua.

4.4.5 Determinación de humedad

Las medidas del contenido de agua en suelos son necesarias prácticamente en todos los tipos de estudios de suelo. Bajo condiciones naturales todos los suelos contienen agua, aunque hay suelos que poseen una cantidad de agua y contenido de aire alto (Wike, 2005). Como convención el contenido de agua total y la masa seca de los suelos es medida después de un secado a 105° C. Por lo tanto, el contenido de agua del suelo es dado como porcentaje por el peso o volumen de

suelo secado al horno. El agua que es removida a temperaturas más altas no es incluida en los estudios de determinación de humedad.

El contenido en agua es calculado a partir de la relación (g_{water}/g_{soil}) para el caso gravimétrico, y de la relación $(cm^3_{water}/cm^3_{soil})$ para el caso volumétrico.

4.4.6 Mecánica de suelos y porosidad

El suelo está compuesto de tres fases: solida (partículas minerales), liquida (agua principalmente) y gaseosa (aire, vapores). Al determinar el peso de las muestras húmedas, el peso de las muestras secadas al horno y el peso especifico relativo de los suelos, se puede obtener relaciones volumétricas y gravimétricas prácticas para poder medir otras magnitudes en términos de estas (Juárez & Rodríguez, 2005).

En mecánica de suelos utilizan estas relaciones de las distintas fases con sus volúmenes correspondientes, esto crea el concepto de peso específico, que es la relación entre el peso de la sustancia y su volumen. Partiendo de esta idea se establecen relaciones fundamentales para encontrar parámetros como relación de vacíos o índice de poros, porosidad y grado de saturación.

Para encontrar la relación de vacíos se establece la relación entre el volumen de los vacíos de la muestra del suelo y el volumen de la fase solida de la muestra. La porosidad se halla con la relación del volumen de los vacíos y el volumen total de la muestra de suelo. Mientras que el grado de saturación es la relación entre su volumen de agua y el volumen de sus vacíos.

Si se establece arbitrariamente el valor de una muestra de suelo cuyo volumen de su fase solida sea arbitrariamente la unidad el peso de la muestra solida se puede calcular a partir del peso específico relativo de la fase solida de la muestra y del peso específico del agua (ver **figura 10**).

Figura 10

Esquema de relación de pesos y volúmenes en una muestra de suelo.



Nota. Tomado y modificado de Juárez & Rico (2015). Donde Vm es el volumen de la muestra. Vv y e es el volumen de vacíos. Va volumen de aire. Vw es el volumen de agua. Vs volumen de sólidos. Wa peso de aire, Ww peso del agua. Ws peso de sólidos. Gs es el peso especifico relativo del suelo o densidad. γ_w es el peso específico del agua.

A partir de las relaciones del establecidas en la figura 10, podemos obtener la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{Vs + Vv} = \frac{Gs.\gamma_w(1+w)}{1+e}$$

Esto nos permite relacionar los pesos específicos de los sólidos y el agua de la muestra con el volumen de vacíos, que a su vez podemos relacionar con la porosidad, ya que ambas magnitudes son formas de representar el volumen de vacios dentro de la muestra de suelo, se establece la fórmula:

$$e = \frac{n}{1-n}$$

5. Marco Geológico

5.1 Introducción

Al Este de Bucaramanga, a medida que subimos en altitud en la Cordillera Oriental, encontramos el Macizo de Santander, el cual ha sido levantado durante la orogenia andina a lo largo de la Falla Bucaramanga. El Macizo se conforma de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que van desde el Precámbrico hasta el Cretácico Inferior (Ward et al., 1985). Esta secuencia de rocas está parcialmente cubierta discordantemente por depósitos sedimentarios del Cuaternario (INGEOMINAS 2008), conocidos comúnmente como el abanico de Bucaramanga.

Los depósitos Cuaternarios están formados por bloques, cantos, gravas, arenas y lodos, pobremente seleccionados provenientes en su mayor parte de la acción denudatoria sobre las rocas del Macizo de Santander (INGEOMINAS, 2004).

En la zona norte de Bucaramanga se reconocen principalmente dos unidades litológicas del Carbonífero y del Pérmico, denominadas formación Diamante (PCd) y formación Tiburón (TRPt) respectivamente, las cuales sirven como basamento de la formación Bucaramanga (GEOMÁTICA-UIS, 2018). La formación Bucaramanga es el nombre designado a los depósitos detríticos de edad Cuaternaria, conformado por cuatro miembros: Miembro Órganos (Qbo), Miembro Finos (Qbf), Miembro Gravoso (Qbg) y Miembro Limos Rojos (Qblr).

5.2 Estratigrafía Regional

En esta sección se presentará la secuencia de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias que van desde el Precámbrico hasta el Jurásico relacionadas con el levantamiento del macizo de Santander a lo largo de la falla de Bucaramanga producto de la orogenia Andina y la gran cantidad de eventos naturales subsecuentes producto del ambiente sismo-tectónico de gran actividad que caracteriza la zona Andina Colombiana.

5.2.1 Neis de Bucaramanga

Las rocas más antiguas corresponden al Neis de Bucaramanga del Neoproterozoico, con protolito sedimentario, se localiza al oriente del sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, siendo su límite occidental fallado en dirección N30W (INGEOMINAS 2001), a nivel regional afloran en dos extensas zonas alargadas y en fajas longitudinales relacionadas al trazo de las fallas Bucaramanga y Guamalito, tanto al norte como el sur (Velandia 2017).

Se han realizado dataciones de neis hornblendico ~945 Ma, Rb-Sr en roca total en un neis biotítico (Goldsmith et al., 1971) y 40Ar/39Ar en hornblenda ~668 Ma y ~574 Ma en nesises honrblendicos (Restrepo-Pace, 1995), se interpretó su formación en el evento Nickeriense seguido de una mezcla con basamento metapelítico que tuvo metamorfismo en el Paleozoico Temprano (INGEOMINAS, 2010).

Esta unidad consta de rocas metamórficas de alto grado, con fabrica orientada y textura gruesa a media, fundamentalmente abarcan tres tipos composicionales: neis biotítico, neis anfibólico, en menor proporción neis cuarzo feldespático y migmatitas (Ward y Goldsmith 1973).

5.2.2 Formación Silgara

La Formación Sílgará con protolito sedimentario data del Ordovícico-Silúrico. Hacia el centro está asociada con el frente de deformación de la Cuña de Pamplona y su zona de influencia en el Macizo de Santander, presenta afloramientos en una zona transpresiva entre las fallas de Guamalito y Bucaramanga, y hacia el sur con la Falla de Lebrija (Velandia, 2017).

MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADES

Es una secuencia de rocas clásticas metamorfoseadas en estratificación delgada, compuesta por pizarras, filitas, metalimolitas, cuarcitas y esquistos en las facies esquistos verdes (Ward y Goldsmith, 1973). Se presenta en el borde Este de la Mesa de Ruitoque, Mesa de Los Santos y Mesa de Barichara como fajas discontinuas con orientación principalmente en sentido norte-sur (INGEOMINAS, 2010). También se observa al oriente y suroriente de Piedecuesta en laderas onduladas cerca al sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta y a inmediaciones de la confluencia de los ríos Tona y Suratá (INGEOMINAS, 2001).

5.2.3 Cuerpos Ígneos del Triásico-Jurásico

Rocas intrusivas del triásico-jurásico que se encuentran en una amplia distribución de las zonas del Macizo de Santander.

5.2.3.1 Cuarzomonzonita de La Corcova. Conformada por rocas equigranulares de grano fino a medio con biotita uniformemente diseminada, se asocia regionalmente al Pluton de la Corcova, se encuentra sobre la via Bucaramanga – Pamplona y Los Curos – Guaca (INGEOMINAS 2010). Puede presentar variaciones de cuarzomonzonita gris, granodiorita y diorita.

5.2.3.2 Cuarzomonzonita de Santa Barbara. Ward y Goldsmith (1973) la ubican dentro del Grupo Plutónico de Santander. Presenta rocas graníticas con variaciones composicionales dadas por feldespato alcalino, plagioclasa, cuarzo, epidota, titanita, opacos, circón y apatito, y localmente por biotita, moscovita y hornblenda (López & Zuluaga, 2017). Aflora hacia el páramo de Berlín sobre el costado sur de la vía Bucaramanga - Pamplona y llega hasta el sector de Arenales (INGEOMINAS, 2010) y están altamente asociados al neis de Bucaramanga.

5.2.3.3 Cuarzomonzonita, Granito y Pórfido Cuarzoso. Unidad definida y datada por Ward et al, (1973) con mediciones radiométricas K/Ar en biotita y moscovita que dieron como resultado edad Jurásica. Están conformadas por rocas de grano grueso, inequigranulares, textura hipidiomórfica. La oligoclasa y albita ligeramente zonadas, subtabulares y equidimensionales. Los mejores afloramientos observados están al norte y al nororiente del Área Metropolitana de Bucaramanga (INGEOMINAS 2001).

5.2.4 Formación Girón

Es una mega secuencia aflorante al occidente de Bucaramanga cerca a Girón, Santander (Ward et al., 1973). Se ubica en discontinuidad estratigráfica sobre las formaciones Bocas y Jordán e infrayace concordantemente a la formación Los Santos (Clavijo & Royero, 2001). La falla Suarez ha tenido influencia sobre la formación dejando rocas fracturadas y cizalladas (INGEOMINAS, 2001).

Geomorfológicamente se presentan escarpes pronunciados, colinas y cerros aislados como se observa al occidente de Piedecuesta (INGEOMINAS, 2001), presentando alteraciones medias a altas principalmente hacia el cerro de la Cruz y en el cerro de Palonegro.

Según Clavijo y Royero (2001) esta formación está compuesta de areniscas de grano medio a grueso, ligeramente conglomerática, de estratificación cruzada en capas gruesas y con interestratificaciones de lodolitas, con un ambiente de sedimentación continental, fluvial a lacustre-fluviátil. S le asignó una edad Jurásica (Ward et al., 1973).

5.3 Estratigrafía Local

Para la estratigrafía local se consideran solo las unidades que están presenten en el presente estudio, en este apartado se procede con la descripción de cada una de ellas. Según el mapa geológico de Colombia realizado por SGC en 2015 (ver **figura 2**), en el área de interés se encuentran principalmente depósitos cuaternarios a la formación Bucaramanga, a su lado Oeste se puede encontrar formaciones del Triásico-Jurásico y al Este tenemos el Macizo de Santander. A su vez la formación Bucaramanga se divide en cuatro Miembros presentan una morfología de un abanico aluvial (ver **figura 11**).

Figura 11





Por otro lado en un estudio realizado por el grupo de investigación Geomática-UIS en el 2018 se obtuvo 7 sondeos en la zona de interés, en los cuales se pudo observar que, a un nivel superficial, se encuentran litologías con variedad textural como areniscas de grano fino a grueso ligeramente gravosas, gravas guijosas a guijarrosas de matriz areno-arcillosa y en menor cantidad limos arenogravosos pertenecientes principalmente al miembro Órganos de la formación Bucaramanga y a lo que ellos denominaron miembro Órganos removido. Como basamento de estos depósitos cuaternarios podemos encontrar la fm. Diamante, la fm. Tiburón y lo que ellos denominaron fm. Bocas residual.

5.3.1 Formación Diamante

En 1941 Dickey describe las rocas expuestas cerca de Bucaramanga, dividiendo las rocas de las series Surata y las series Bocas. Más adelante en 1973 fue introducido por Ward et al. el término Formación Diamante para la parte inferior de las series Suratá, en honor a las canteras de Cementos Diamante, al norte de Bucaramanga.

Se separó en tres miembros; el inferior conformado por areniscas lodosas con intercalaciones de limolitas. Algunas de las areniscas son feldespáticas y micáseos, variando el tamaño de grano en algunos sectores de grueso a conglomerático, con guijos de cuarzo (EDU, 2017). A este nivel lo suprayace un nivel intermedio de shale color gris oscuro con intercalaciones de caliza del mismo color, y por último uno superior conformado por caliza cristalina de grano fino a medio color gris oscura, ligeramente arcillosa con delgadas intercalaciones de arcillolita y arenisca limosa color gris a rojo grisáceo (Geomática-UIS, 2018). El espesor es aproximadamente 500 m, estimado por Navas (1962) y Ward et. al (1973). Las características faciales y paleontológicas indican que esta unidad se formó en un ambiente epicontinental (Clavijo, et al., 1993).

Con base en la posición estratigráfica y el contenido fósil, la formación Diamante se ubica en el Carbonífero-Pérmico. Se encontró tallos crinoideos probablemente del Carbonífero (Aya, 1972). Las muestras de lodolitas calcáreas contienen fauna y flora pertenecientes al Carbonífero superior-Pérmico (Boinet, 1983).

5.3.2 Formación Tiburón

La parte superior de las series Suratá definidas por Dickey (1941). Se redefinió posteriormente por Ward et. al (1973) como la formación Tiburón debido al Club Los Tiburones el cual está localizado en el norte de Bucaramanga. Está compuesta por capas másicas de conglomerados calcáreos, líticos, clastosoportados con guijos y guijarros de aproximadamente (2-10 cm) provenientes de la formación Diamante, inmersos en una matriz calcárea de grano fino. Los guijos presentan variaciones importantes de tamaño de estrato a estrato, los estratos preservan uniformidad a través de la formación. Los guijos en la parte inferior tienen un aspecto fracturado producto de la acción de las fallas satélite de la falla Bucaramanga (EDU, 2017). Los guijos son de caliza dolomita, arenisca y chert negro, de formas subangulares a subredondeados (INGEOMINAS, 2001). La edad de la formación Tiburón corresponde al Pérmico y su espesor total está calculado según Gómez (1993) como 350 m; mientras que Ward et al. (1973) dice que puede alcanzar hasta 500 m.

5.3.3 Formación Bocas

Esta formación datada por Ward et al. (1973) por criterios estratigráficos se le asigno una edad Triásica, está conformada por limolitas calcáreas de grano fino, ocasionalmente en capas de 1 m de espesor. También contiene capas delgadas de limolitas calcáreas de color gris verdoso, con nódulos calcáreos grises de 4 mm de diámetro, conglomerados con cantos redondeados, calizas grises y cuarzos en una matriz arenosa calcárea (Ward et al., 1973).

Hacia el norte se observa estratos de areniscas calcáreas de grano fino a medio, de color parduzco, intercalados con capas de conglomerados arenosos, con guijarros calcáreos hasta de 1 cm de diámetro y areniscas con nódulos calcáreos de 1 cm también de diámetro (INGEOMINAS, 2010), Hacia la parte superior se encuentran capas delgadas de rocas volcánicas.

Estas rocas afloran hacia el este de las Montañas de los Angelinos y hacia el norte en la confluencia de los ríos De Oro y Suratá. Sobre esta unidad se encuentra ubicado el barrio El Paulón. Esta formación se observa en contacto fallado con las formaciones Girón, Tiburón y Floresta (INGEOMINAS, 2001).

5.3.4 Formación Bucaramanga

La formación Bucaramanga se compone de depósitos sedimentarios de edad cuaternaria, asociados en su mayor parte al río Suratá formando lo que geomorfológicamente se conoce como un abanico aluvial erosionado (INGEOMINAS, 2001), el cual reposa sobre una depresión de origen tectónica, donde se ubica el casco urbano de Bucaramanga. Según el análisis estratigráfico, granulométrico y morfológico indican que esta unidad se acumuló en un ambiente típicamente fluvial, con materiales de origen aluvial tipo cono de deyección y flujos de escombro, dominado por la energía del medio (clima y tectónica) dentro de la cuenca (Ramírez & Franco, 2017). Esta limitado al Este por el Macizo de Santander y la falla de Bucaramanga, y al Oeste por la falla Suarez (ver **figura 11**). La falla Suarez de desplazamiento sinextral y actividad Cuaternaria (Jiménez et al., 2015), ha tenido efecto sobre el Abanico de Bucaramanga plegando capas de volcadas (INGEOMINAS, 2008). La edad asignada para la Formación Bucaramanga mediante estratigrafía magnética es de 0.8 Ma para los sedimentos más recientes (Jiménez et al., 2015).

Según INGEOMINAS (2001) el espesor del abanico de Bucaramanga aumenta de Este a Oeste con un promedio de 250 m, también proponen dividir la formación Bucaramanga en cuatro miembros, a partir de las clasificaciones hechas por Hubach (1952) y Niño & Vargas (1993): Miembro Órganos (Qbo), Miembro Finos (Qbf), Miembro Gravoso (Qbg) y Miembro Limos Rojos (Qblr).

5.3.4.1 Miembro Órganos (Qbo). Mancera y Salamanca (1994) estiman que su espesor podría superar los 180 m, siendo el miembro más potente de la formación Bucaramanga, mientras que otros autores como Lima y Medina (2015) estiman su espesor entre 250 y 300 m. Litológicamente corresponde a niveles polimícticos de fragmentos gruesos, con apariencia conglomerática, alternando con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura (Bueno & Solarte, 1994).

Los niveles de conglomerados constituyen depósitos de gravas y bloques. Los cantos varían entre 10 y 30 cm, llegando hasta 1 m de diámetro, en su mayoría areniscas silíceas de grano medio y en menor proporción rocas ígneas y metamórficas. Los niveles finos corresponden a arcillas arenosas y arenas arcillosas compactas, ligeramente micáceas, con trazas de materia orgánica (Lima & Medina, 2015).

Se caracteriza por su fácil erosión, formando estoraques que alcanzan alrededor de 15 m de altura y sobre él se desarrolla un drenaje dendrítico subparalelo. Su alta meteorización y poca compactación produce alta permeabilidad y al ser fácilmente erodables es común el desprendimiento de bloques y cantos durante las precipitaciones fuertes.

Según Bueno y Solarte (1994) su génesis se asocia con depósitos cíclicos intercanales. Los niveles limoarenosos de mayor espesor se presentan hacia la base, lo que explica periodos más extensos de retrabajamiento, bajo un régimen fluvial constante. Mientras que el predominio de lentes hacia la parte superior y los contactos irregulares podrían indicar periodos de erosión por corrientes intermitentes.

Los últimos estudios realizados por Lima y Medina (2015) infieren a partir de las características litológicas y texturales del miembro Órganos dos grandes ambientes de sedimentación, procesos aluviales y transporte fluvial. Por lo cual definieron 7 facies sedimentarias principales:

- Facies Gm: Gravas clasto-soportadas dispuestas de manera caótica con ligera estratificación.

- Facies P: Carbonato pedogénico.
- Facies Fr: Arcillas varicoloreadas con presencia de materia orgánica.
- Facies Sh: Arenas masivas con guijarros dispersos y cruda estratificación laminar.
- Facies Gms: gravas arenosoportadas con ligeras imbricaciones.
- Facies Gcm: Gravosoportada.
- Facies Pf: Ferricreta.

5.3.4.2 Miembro Finos (Qbf). Este miembro se ubica entre el Miembro Órganos y el Miembro Gravoso en contactos netos plano-paralelos. Es una extensa capa lenticular de 15 m de espesor, con niveles arcillosos, lodoarenosos, arenolodosos y gravoarcillosos. Compuesto de estratos tabulares a lenticulares de 5-40 cm, con estratificación plano-paralela, cruzada y ondulosa. 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 (Niño & Vargas, 1992). Se identifican dos conjuntos principales, uno lodoso arcilloso ubicado hacia la base y otro arenoso hacia el techo. El ambiente de depositación es aluvial de intercanales poco profundo, baja energía y de escasas interdigitaciones de flujo de escombros de facies arenosas (INGEOMINAS, 2001).

5.3.4.3 Miembro Gravoso (Qbg). Se conforma de niveles gravosos, gravoarenosos y gravolodosos. Con espesores que varían entre 8 y 30 m, presenta cantos de tamaño grava (15cm), bloques de roca, en menor cantidad, hasta de 80 cm de diámetro, subangulares a subredondeados, inmersos en una matriz areno lodosa, principalmente matriz soportados, de color rojizo. El contacto inferior con el Miembro finos es neto, continuo y suavemente onduloso mientras que el contacto con el miembro superior es gradacional (Niño & Vargas, 1992).

5.3.4.4 Miembro Limos Rojos (Qblr). Constituido por arenas gravosas y lodos rojizos amarillentos. Se encuentran bloques angulares de arenisca en una matriz de limos rojos, normalmente meteorizados. Su contacto inferior es gradacional, en tanto, la parte más superficial de este miembro se encuentra influenciada por meteorización química, dándose en algunos sectores niveles de oxidación que incrementan su compactación y resistencia a la erosión. El ambiente de depositación indica un dominio de flujo de lodos junto con bloques provenientes de del macizo (INGEOMINAS, 2001).

5.3.4.5 Miembro Órganos en la zona de estudio. Para este caso particular, donde aflora principalmente el miembro Órganos se considerará la diferenciación hecha en el Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa del Sector Norte de Bucaramanga (Barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, Villa Helena, Villa Rosa, Villa María).

Este estudio realizado por la Universidad Industrial de Santander a través del grupo de investigación Geomática en el 2018 define a detalle la Formación Bucaramanga dentro del área de estudio, en donde hacen distinciones entre 3 miembros: El miembro Órganos Inferior, Miembro Órganos Superior y en la parte más superficial lo que ellos denominaron Miembro Órganos Removido. *5.3.4.5.1 Miembro Órganos Inferior*. Principalmente conformado por gravas clastosoportadas a matriz-soportadas con intercalaciones de arenas ligeramente gravosas. Acá podemos encontrar los clastos de mayor tamaño cuya composición indica que proceden de rocas en su mayoría metamórficas e ígneas (Geomática-UIS, 2018).

5.3.4.5.2 Miembro Órganos Superior. También cuenta con una relación entre las gravas arenosas respecto a las arenas gravosas, predominando de forma general la fracción grava, su principal diferencia con el Miembro Inferior es el cambio en la composición de los clastos, ya que es su mayoría provienen de un origen sedimentario y en menor proporción clastos de rocas ígneas y metamórficas (Geomática-UIS, 2018).

5.3.4.5.3 Miembro Órganos Removido. Se encuentran gravas con matriz parcial o totalmente lavada, arenas de grano fino a medio y lodos arenosos ligeramente gravosos

En su análisis definieron 13 facies encontradas en la zona de interés, en la **tabla 1** se muestran dichas facies con su respectiva descripción y código.

Tabla 1

	CODIGO	DESCRIPCION					
VAS	Gglv	Gravas con matriz parcial o totalmente lavada					
	Ggm	Gravas de (guijas, guijarros) matriz soportada.					
GR∕	Ggc	Gravas clastosoportada, con matriz (lodosa, arenosa).					
AS	Slg	Arena de grano fino a medio ligeramente gravosa.					
EN/	Sg	Arena de grano medio a grueso ligeramente gravosa.					
AR	SL	Arena de grano fino con matriz (lodosa, arenosa).					
	FS(g)	Limo arenoso ligeramente gravoso.					
FINOS	Fg	Limo ligeramente gravoso con matriz muy fina a arcillosa.					
	FSG	Limos arenosos gravosos.					
	FS	Limos ligeramente arenosos.					
	AG	Arcilla gravosa.					
	AF	Arcilla limosa.					

Facies con sus respectivas convenciones.

Nota. Las facies fueron modificadas a partir del estudio realizado por el grupo de investigación Geomática de la Universidad Industrial de Santander en 2018 para las rocas de la Formación Bucaramanga encontradas en la zona de interés.

5.4 Tectónica

La región del área de estudio se encuentra en una zona de influencia entre los límites de las placas tectónicas del Caribe y Suramericana, reconocida como bloque Andes del Norte (INGEOMINAS, 2001), como consecuencia se producen movimientos que desarrollan varios sistemas de falla en los cuales se acumula y libera energía potencial con recurrencia variable.

El Macizo de Santander hace parte del núcleo de la Cordillera Oriental, donde se reconocen estructuras regionales que configura una mega estructura de cuenca mesozoica con inversión tectónica en el Cenozoico (Cooper et al., 1995; Sarmiento, 2001; Toro et al., 2004; Tesón et al., 2013; Citados en Velandia, 2017). Este proceso de inversión ha sido documentado en fallas como La Salina y Suarez (Sarmiento, 2001; Tesón et al., 2013; Caballero et al., 2013; Citados en Velandia, 2017). En este proceso de la orogenia andina también es importante la actividad de la Falla Bucaramanga.

Según INGEOMINAS (2001) Lo que se conoce actualmente como la terraza de Bucaramanga esta específicamente ubicada sobre una cuenca tectónica de forma triangular que se originó de la convergencia en cuña de los sistemas de fallas de Bucaramanga-Santa Marta y Suarez.

De esta forma el área metropolitana de Bucaramanga tiene una mayor influencia sísmica por las fallas Bucaramanga-Santa Marta y la falla Suarez, aunque también puede estar influenciada en menor medida por otras fallas regionales como la falla del Borde Llanero, Yopal, Guaicáramo, Chitagá, La Salina, Palestina, Abrego, Pajarito, y Soapagá entre otras (INGEOMINAS, 2001), y de manera local el norte de Bucaramanga está afectado también por las fallas normales Tona y Suratá.

De acuerdo con INGEOMINAS (2008) la parte sur del Abanico de Bucaramanga ha sido más fallada que la parte norte, y parece ser diacrónico. En consecuencia, la progresiva migración del vértice del abanico de Bucaramanga ha sido relacionado al cizallamiento sinextral a lo largo de la Falla de Bucaramanga.

Con el propósito de hacer una diferenciación del efecto que tienen las estructuras presentes en las distintas zonas, INGEOMINAS en (2001) definió tres bloques estructurales delimitados por los dos sistemas de fallas principales, estos son descritos a continuación:

Bloque oriental: Limitado por el Sistema de Fallas Bucaramanga – Santa Marta, está conformado por rocas ígneo-metamórficas pertenecientes al Macizo de Santander con Edades que van desde el Precámbrico (>600Ma) hasta el Paleozoico (500 a 225 millones de años).

Bloque central: Limitado al Este por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta y al Oeste por la Falla de Suarez, es una depresión tectónica rellenada con los depósitos aluviales recientes de la Formación Bucaramanga, donde se encuentra el casco urbano.

Bloque Occidental: Limitado por el sistema de fallas de Suarez, constituido por rocas sedimentarias del Jurásico (180 a 135 millones de años), donde se ubica el Aeropuerto Palonegro y toda el área de Lebrija.

El abanico de Bucaramanga no tiene la forma típica semicircular, esto es debido a que la cuenca tectónica se encuentra delimitada por fallas activas con marcados escarpes y frentes montañosos (ver **figura 12**) que actúan como barreras topográficas (INGEOMINAS, 2008).

Figura 12

Rasgos morfológicos y sistema Riedel indicadores de cinemática de rumbo sinextral de la Falla de Bucaramanga. Tomado y modificado de Velandia 2017.



5.4.1 Falla Bucaramanga-Santa Marta

Es una falla de rumbo-normal sinextral con una longitud de 550 km, es una de las principales características tectónicas del NW de Sur América (Jimenez, 2013). Exhibe un lineamiento rectilíneo de 220 km de longitud el cual separa las rocas ígneo-metamórficas Precámbricas del Neis de Bucaramanga y las Paleozoicas del Macizo de Santander, con rocas sedimentarias del Mesozoico-Cenozoico de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (INGEOMINAS, 2001).

El estudio Zonificación Sismogeotécnica de Bucaramanga realizado por INGEOMINAS (2001) no reporta evidencias de actividad en el Holoceno, aunque hay indicios que sugieren que la falla ha tenido actividad inmediatamente anterior a esta época, probablemente en el Plio-Pleistoceno. Posiblemente con influencia directa en la Geología Estructural del Bloque de Ocaña y por ende las fallas locales en la zona de estudio.

La falla Bucaramanga tiene un componente vertical importante (Julivert 1958; Ward y Goldsmith, 1973), haciendo que se comporte como inversa de cabalgamiento en algunos sectores al sur de su tramo. En particular presenta un desplazamiento sinextral de alrededor de 2.5 km en el Abanico Aluvial de Bucaramanga (INGEOMINAS, 2008).

Sin embargo, Jiménez et al. (2015) establecieron por medio de estudios paleo magnéticos en el Abanico Aluvial de Bucaramanga que la tasa máxima de deslizamiento para esta falla corresponde a 3 mm/año.

5.4.2 Falla Suarez

Es una falla de aproximadamente 98 km de longitud con rumbo N21E e inclinación promedio de 60-80°W (Paris et al., 2000). Se extiende a lo largo de los ríos Suárez y Oro, hasta

interceptarse con la Falla Bucaramanga al norte de la ciudad. El sentido del movimiento es inverso sinextral. La falla Suarez se une a la falla Bucaramanga pocos kilómetros al norte de la ciudad de Bucaramanga. Delimita junto con la Falla Bucaramanga, la depresión tectónica que alberga los depósitos cuaternarios de la Formación Bucaramanga. Según Julivert (1963) desplaza verticalmente una superficie de erosión del Terciario alrededor de 600 m, afectando los depósitos aluviales de la Formación Bucaramanga. La falla Suarez corta rocas sedimentarias del Jurásico y del Cretácico, y depósitos aluviales del cuaternario y flujos de lodo que forman la terraza de Bucaramanga. El último movimiento se estima en el Cuaternario hace menos de 1.6 Ma (Paris et al., 2000).

5.4.3 Fallamiento zona de estudio

El fracturamiento encontrado en la zona de estudio se encuentra asociado principalmente a las estructuras mayores Falla de Bucaramanga y la Falla Suarez como se ha mencionado en este apartado. A partir de los estudios realizados por Geomática-UIS (2018 y 2019) y análisis fotogeológicos se pudieron identificar 4 estructuras que atraviesan el área de estudio (ver **figura 13**), dos (2) de dirección NW-SE / N-S y dos (2) transversales de dirección W-E / NW-SE.

Estas fallas son producto de un sistema de Riedel asociado al Sistema de Fallas de Bucaramanga. La Falla Chitota se presenta como un Riedel del Sistema de Fallas Bucaramanga, a partir de esta se forman las fallas encontradas en el área de estudio, siendo de tipo PostRiedel (Geomática-UIS, 2018). Se puede identificar de Norte a Sur, la Falla Chitota anteriormente mencionada, una falla denominada Falla S, que es sintética de la Falla las Chitota, la Falla Las Olas la cual ha sido reportada por Vargas y Niño (1992) en la zona de la quebrada Las Olas, lo que se denominó la Falla Transversal y una Falla Antitética a esta.

Figura 13

Fallas en la zona de estudio.



Nota. Obtenido a partir de análisis fotogeológico e información secundaria.

6. Metodología

El presente trabajo se va a elaborar siguiendo cuatro fases metodológicas que permitan alcanzar los objetivos planteados. En la fase inicial (I) se reunió toda la información del área de estudio, junto con interpretación de imágenes satelitales. La fase dos (II) consta de los análisis de la información secundaria obtenida principalmente de estudios realizados en la zona por el grupo de investigación Geomática. La fase tres (III) juntó los datos y las respectivas interpretaciones para la construcción del modelo geológico-geofísico con ayuda de una librería de Python para el geomodelamiento 3D. Por último, la fase cuatro (IV) se hizo una síntesis de la información obtenida y se procedió a redactar el informe.

En la **figura 14** se representa gráficamente el proceso que se ejecutó en cada una de las fases metodológicas anteriormente mencionadas, mostrando a su vez las subetapas para culminar cada una de las fases. Se utiliza un diagrama de flujo para mostrar la estructura y la vinculación de cada una de las fases, permitiendo así su revisión como un conjunto.

Figura 14.

Gráfico de la metodología del proyecto.



6.1. Fase I

Realizar una búsqueda de información bibliográfica (tesis de grado, investigaciones análogas, libros, informes e información secundaria), que brinde la teoría necesaria para la elaboración de un modelo geológico-geofísico de resistividades. Posteriormente se organiza y clasifica la información por su grado de importancia, verificando la fuente, la utilidad, la vigencia y relevancia de cada documento, esto para establecer un orden al momento de un estudio bibliográfico más riguroso.

Se hizo una indagación sobre estudios previos y una recopilación de documentos locales y regionales como memorias geológicas, planchas, cortes, etc., que brinden una contextualización de las condiciones geológicas de la zona y de los diferentes factores que puedan afectar el desarrollo de los objetivos del proyecto.

En esta etapa se realiza el curado de datos de una serie de tomografías de resistividad eléctrica realizadas por el grupo de investigación Geomática que se encuentran dentro del área de estudio (**figura 15**) de forma que queden organizados y preparados para el análisis posterior.

Figura 15

Distribución de tomografías de resistividad eléctrica adquiridas por Geomática en planta. Tomado de QGIS 3.2.3.



También se utilizarán las imágenes satelitales de Google Earth, modelos de elevación digital (DEM) ASTER y ALOS PALSAR (12.5m res), teniendo en cuenta sus restricciones de uso respectivas, para hacer un análisis de las estructuras falladas presentes por medio de fotogeología.

Las herramientas que se utilizarán para este reconocimiento serán Google Earth, los mapas base del visualizador de ArcGis Online y QGIS 3D map (**figura 16**), imágenes satelitales de ASTER y ALOS PALSAR con resolución de 12.5 m.

MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADES

Figura 16

Visualización 3D MAP en QGIS 3.2.2. Utilizada en fotointerpretación geológica.



En la **figura 16** podemos observar un renderizado 3D que otorga una herramienta de QGIS 3.2.3 con un mapa base de una imagen Satelital hibrida de Google Earth, en conjunto con un DEM de ASTER de resolución 12.5 m dentro del área de estudio, transformado a Hillshade para mayor facilidad en el análisis fotogeológico.

6.2 Fase II: Análisis de información Secundaria

La información secundaria analizada en esta etapa se obtendrá principalmente de los estudios realizados por Geomática:

- Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga (Barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, Villa Helena, Villa Rosa, Villa María, realizado en 2018.
- Estudio de factibilidad y los diseños de ingeniería de detalle, para la construcción de una galería de drenaje en el Barrio La Esperanza II del municipio de Bucaramanga, como medida para la reducción del riesgo por movimiento en masa profundos, realizado en 2019.

En estos estudios se realizaron descripciones litológicas en muestras de núcleos, ensayos de laboratorio y una serie de tomografías de resistividad eléctrica en la zona de estudio.

6.2.1 Definición de litofacies

Como primer paso se organizó la información de estos estudios identificando las facies por medio de evaluación las columnas estratigráficas presentadas en los informes obtenidas a partir de los sondeos realizados (**figura 17**) y corroborándolas con la información adicional. Se hizo un proceso similar para las estructuras definidas por ellos donde se comparó con información adicional y con lo observado por medio de la fotogeología.

Figura 17

Distribución sondeos tomados por Geomática en campañas anteriores.



Los sondeos etiquetados del S1 al S7B se obtuvieron en el estudio realizado en el 2018, estos contaron con una profundidad máxima de 150 m, mientras que los denominados sondeos profundos sacados en el proyecto del 2019 tenían una profundidad máxima de 50 m. Cada sondeo cuenta con su columna estratigráfica descriptiva, como se puede observar en la **figura 18** donde se muestra un acercamiento a las columnas de los sondeos S1 (2018) en la parte superior y S1 (2019) en la parte inferior, las columnas completas se podrán encontrar en los anexos.

Figura 18.

Representación de columnas estratigráficas descriptivas a partir de los sondeos.



6.2.2 Parámetros petrofísicos

Se recogió información disponible de ensayos de laboratorio en donde se hayan recolectado datos de granulometría, difracción rayos X (DRX) y análisis de suelos (CEC, CE) de núcleos de roca pertenecientes al sector.

Los datos obtenidos se utilizaron como parámetros para la estimación petrofísica de las distintas facies, donde se tengan en cuenta los rasgos texturales predominantes de cada una y permita un acercamiento teórico a los parámetros petrofísicos.

6.2.3 Tomografías de resistividad eléctrica

Se reinterpretó las tomografías de resistividad eléctrica adquiridas por el grupo de investigación Geomática en 2019 (**figura 19**), observando el perfil de las propiedades geoeléctricas del subsuelo. Seguido a esto, se correlacionó con las facies de la formación Bucaramanga y su basamento, teniendo en cuenta sus características petrofísicas anteriormente interpretadas, y tener una explicación petrofísica (de manera teórica) lo observado por las ERT. Luego se hizo un renderizado 3D de los resultados obtenidos de las tomografías para visualizar las resistividades y realizar el análisis a partir de esto.

Figura 19



Ejemplo de Tomografía de Resistividad Eléctrica. Tomado de Geomática 2019.

6.2.4 Preparación de los datos

Los resultados conseguidos en esta etapa se tabularán en archivos Excel para mayor facilidad en el modelamiento de GemPy, los datos deben estar debidamente estructurados y se organizarán en base a la cota de elevación, profundidad y ubicación de los sondeos desarrollados en los estudios mencionados. Se empezó representando en una tabla los datos litológicos como una superficie de puntos (**tabla 2**) y en otra se le atribuyen las orientaciones (**tabla 3**) de cada elemento o capa que se va a interpolar.

Tabla 2

Esquema para la tabulación de puntos que delimitan superficies para el modelo geológico.

ID	X	Y	Z	Facies	Asociación	Und	Descripción	Sondeo
1	XXXX	XXXX	XXXX	-	Fault transv	Fault		-
2	XXXX	XXXX	XXXX	Ggc	AF I	Qd		S2
3	XXXX	XXXX	XXXX	Sg	AF II	QmB02		S 3

Tabla 3

Esquema para la tabulación de puntos para las orientaciones del modelo geológico.

ID	Х	Y	Z	AZIMUTH	DIP	POLARITY	FORMATION
1	XXXX	XXXX	XXXX	90	20	1	Fault transv
2	XXXX	XXXX	XXXX	90	40	1	AF I
3	XXXX	XXXX	XXXX	270	70	1	AF II

Nota. Los datos de las dos tablas son inventados, con el propósito de representar la estructura que se tendrá.

6.3 Fase III: Modelamiento 3D

En esta fase se utilizaron los perfiles geoeléctricos anteriormente interpretados, los datos tabulados en la fase anterior, realizando un tratamiento de datos que permita correlacionar cada uno para construir un modelo geológico-geofísico. El código necesario para el modelo se escribirá en un una interfaz web que permite inclusión y ejecución de texto llamado JupytherNotebook. El lenguaje utilizado para el código es Python haciendo uso de la librería GemPy, aunque también se requiere el uso de las librerías NumPy, Pandas y MatplotLib, las cuales fueron descargadas en un entorno virtual con Anaconda (ver **figura 20**).

Figura 20





El proceso de implementación del código (ver **figura 21**) básicamente consiste en la importar las librerías, cargar los datos de los archivos CSV, crear la contenedor o grilla tridimensional con los respectivos rangos de x, y, z que vaya a ocupar el modelo, correlacionar los puntos de las superficies y plantear la relación entre fallas, visualizar los datos e interpolarlos.

Figura 21

Diagrama de flujo para el modelamiento 3D



6.4. Fase IV: Síntesis de la información y redacción del informe final

En esta fase se recogió toda la información obtenida durante el proyecto, se condensó y se puso en un escrito, conectando la información e ideas, expresando de manera clara y ordenada el tema investigado. Se presentó los resultados, su respectivo análisis e interpretación y por último las conclusiones del estudio.

7. Resultados

7.1 Modelo geológico

El modelamiento geológico preliminar se realiza a partir del tratamiento de datos de columnas estratigráficas descriptivas elaboradas a partir de sondeos, apiques y trincheras, en conjunto con fotografías, ensayos de granulometría, difracción de rayos-x (DRX) y extrapolación de todos estos parámetros por medio de un modelo matemático estadístico, teniendo en cuenta la complejidad de describir dominios geológicos a través de términos matemáticos y numéricos, así como incertidumbres que se pueden presentar en cada una de las etapas de construcción del modelo.

Para esto se utiliza una herramienta para generar modelos geológicos estructurales 3D en Python denominada GemPy, diseñado para permitir el modelado probabilístico que aborde incertidumbres de parámetros y modelos.

7.1.1 Litología a partir de columnas estratigráficas

Las columnas estratigráficas se obtuvieron a partir de 13 sondeos (ver **figura 17**) de los cuales se obtuvieron núcleos de roca para su descripción detallada. Las coordenadas de los sondeos se encuentran en la **tabla 4**, separándolos por su ID y campaña.

Tabla 4

ID	X	Y	СОТА	PROFUNDIDAD	CAMPAÑA
S1	1.104.571	1.282.546	750,5	130 m	2018
S2	1.104.872	1.282.566	738,0	112.3 m	2018

Coordenadas magna-sirgas Bogotá de los sondeos.

MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADES

S 3	1.104.766	1.282.770	705,3	81 m	2018
S4	1.105.045	1.282.666	711,3	80.3 m	2018
S 5	1.105.115	1.282.584	742,8	77 m	2018
S6	1.104.979	1.282.333	765,7	146 m	2018
S7B	1.105.312	1.282.410	799,1	150.6 m	2018
S1G	1.104.922	1.282.228	774,0	31.0 m	2019
S2G	1.104.989	1.282.186	796,0	41.0 m	2019
S3G	1.105.045	1.282.166	797,0	22.6 m	2019
S4G	1.105.086	1.282.152	799,0	44.0 m	2019
S5A	1.105.147	1.282.250	796,0	52.0 m	2019
S6A	1.105.312	1.282.283	826,0	72.0 m	2019

Tal como se evidencia en la tabla 4, los sondeos realizados en la campaña del 2019 tuvieron una profundidad mucho menor, por esta razón no se pudieron correlacionar completamente con los sondeos realizados en la campaña del 2018. Cabe mencionar que los sondeos realizados en el 2019 están concentrados en la parte sureste de la zona de estudio (ver **figura 17**), específicamente en el barrio La Esperanza II.

A continuación, se hará una breve descripción del contenido de cada columna estratigráfica, se debe considerar la profundidad que se obtuvieron en las distintas campañas, siendo más superficiales y con menor información los sondeos del 2019 (S1g al S6a). Para mayor detalle acerca de las mismas, consultar los **Anexos** del presente informe.

7.1.1.1 Columna estratigráfica descriptiva S1: Predominantemente arenas de grano medio a fino intercaladas con limos arenoso-gravosos matriz soportados y gravas guijosas de matriz areno lodosa hasta llegar a la parte media del Miembro Órganos Inferior (QbO1) donde se encuentra una predominancia de gravas arenosas (granulosas a guijosas), como base de los depósitos se identificó la Formación Bocas (Jb1) conformada por areniscas conglomeráticas de grano fino bioturbadas y conglomerados de guijos y guijarros. La presencia de fracturas se da hacia la base del Miembro Órganos Removido (Qd), hacia la base del Miembro Órganos Inferior (QbO1) y en la zona que se alcanzó a cubrir de la Formación Bocas (Jb1), siendo esta última donde más inclinación de fracturamiento se evidenció (45°-84°).

7.1.1.2 Columna estratigráfica descriptiva S2: En la parte superior (Miembro Órganos Removido) se encuentra una secuencia de gravas guijosas a granulosas en conjunto con limos areno-gravosos. Seguido a esto en el Miembro Órganos Superior (QbO2) hay una intercalación de capas de aproximadamente 5 m de espesor de gravas guijosas de matriz limo-arenosa con arenas de grano fino a medio. En el Miembro Órganos Inferior (QbO1) sigue esta tendencia, pero, hay una mayor predominancia de gravas guijosas a blocosas ligeramente granulosas hacia su base. El basamento de estos depósitos fue identificado como la Formación Tiburón, compuesta de conglomerados calcáreos de guijos a guijarros, matriz de tamaño arena de muy gruesa a granulosa. Las fracturas son escasas a lo largo de los depósitos cuaternarios, aunque la zona abarcada de la Formación Tiburón está muy fracturada $(40^\circ - 65^\circ)$ y con gran presencia de venillas con relleno de calcita.

7.1.1.3 Columna estratigráfica descriptiva S3: Inicia con una predominancia de gravas guijosas limo arenosas clasto soportadas (Miembros Órganos Removido y Órganos Superior). En el Miembro Órganos Inferior (QbO1) hay una presencia importante capas de arena de grano medio a grueso entre las capas de gravas guijosas ligeramente granulosas. Inferior a los depósitos nos encontramos con la Formación Tiburón empezando con limolitas ligeramente arenosas,
continuando con areniscas arcillosas bioturbadas, ligeramente calcáreas. El fracturamiento se encuentra distribuido moderadamente a lo largo de los depósitos con inclinaciones entre 25° y 45° , pero, altamente concentrados en la Formación Tiburón donde están con inclinaciones mayores entre 45° y 65° .

7.1.1.4 Columna estratigráfica descriptiva S4: Las litologías dominantes a lo largo de esta columna son arenas de grano medio a grueso en ocasiones granulosa y limos areno-gravosos, con algunas apariciones de capas de gravas (principalmente de guijos y guijarros) con matriz areno-lodosa. Hacia la base del Miembro Órganos Inferior (QbO1) el tamaño de grano predominante es grueso, topándonos con una capa de aproximadamente 8 m de grava guijosa seguida de arenas de grano grueso. La unidad infra yacente a los depósitos se identificó como la Formación Tiburón, teniendo un arreglo de areniscas de grano fino a medio y limolitas arcillosas ligeramente arenosas. El fracturamiento en los depósitos es casi nulo, aunque en la Formación Tiburón se encuentran venillas rellenas de calcita y zonas brechadas en areniscas limo-arcillosas.

7.1.1.5 Columna estratigráfica descriptiva S5: En esta columna el Miembro Órganos Removido dispone de gravas guijosas a granulosas lavadas y la presencia ocasional de limos arenosos ligeramente granulosos. En el Miembro Órganos Superior (QbO2) hay una predominancia de arenas de grano medio a grueso con matriz areno arcillosa, tendencia que continua hasta la parte media del Miembro Órganos Inferior (QbO1) donde se encuentran gravas guijosas a guijarrosas en mayor proporción. Subyaciendo estos depósitos se identificó la Formación Tiburón compuesta de limolitas calcáreas bioturbadas. El fracturamiento se da únicamente en la Formación Tiburón, las zonas fracturadas son altamente arcillosas con presencia de venas de calcita. 7.1.1.6 Columna estratigráfica descriptiva S6: La secuencia empieza con bloque prominente de gravas guijosas a guijarrosas parcialmente lavadas pertenecientes al Miembro Órganos Removido (Qd) y a parte del Miembro Órganos Superior (QbO2), seguido de bloque de limos arenosos y arenogravosos de aproximadamente 20 m de espesor. Luego en el miembro Órganos Inferior (QbO1) hay una presencia importante de arenas medias a gruesas y gravas guijosas de matriz areno lodosa, finalizando con unas gravas guijosas blocosas hasta el contacto con un conglomerado lítico de gránulos y guijos que se identificó como la Formación Bocas residual. El fracturamiento es de frecuencia leve con inclinación aproximada de 40°, se evidencia hacia la parte inferior de la columna zonas brechadas hacia las gravas y los conglomerados líticos.

7.1.1.7 Columna estratigráfica descriptiva S7b: La columna empieza con limos arenosos ligeramente gravosos del Miembro Órganos Removido, continuando con un bloque de gravas guijosas arenosas con intercalaciones de arenas gruesas a muy gruesas. El Miembro Órganos Superior (QbO2) e Inferior (QbO1) está conformado principalmente por gravas guijosas a guijarrosas de matriz lodosa y arenas de grano medio a grueso (ocasionalmente finas). La unidad infrayacente a los depósitos se identificó como la Formación Diamante, con predominancia de mudstone masivo y calcarenitas de grano fino a medio, con presencia ocasional de calcilutitas con bioclastos. El fracturamiento se concentra en la Formación Diamante (con inclinación de aproximadamente 50°), donde se ha formado zonas de brechamiento tectónico en mudstone y wackstone.

7.1.1.8 Columna estratigráfica descriptiva S1g: Comienza con gravas guijosas y arenas gravosa lodosa pertenecientes al Miembro Órganos Removido (Qd). Posteriormente, vemos arenas de grano fino a medio en conjunto con gravas guijosas a granulosas arenolodosas, abarcando aproximadamente 20 m del Miembro Órganos Superior (QbO2).

7.1.1.9 Columna estratigráfica descriptiva S2g: El Miembro Órganos Removido (Qd) contiene una intercalación de arena lodosa de grano muy fino y gravas guijosas a guijarrosas. El bloque del miembro Órganos Superior (QbO2) está formado del mismo tipo de litologías, pero su distribución es arena lodosa de grano medio guijosa (gradación inversa y normal) al comienzo, para continuar con gravas guijosas lodo arenosas de gradación normal.

7.1.1.10 Columna estratigráfica descriptiva S3g: La litología principal en este sondeo es grava guijosa y granulosa con matriz areno-lodosa de grano muy fino a medio, con una menor fracción de grano grueso. También nos encontramos con la presencia ocasional de arena lodosa guijosa.

7.1.1.11 Columna estratigráfica descriptiva S4g: Predomina una litología de grava guijosa de matriz arenolodosa de grano fino (aproximadamente en un 55%), con segmentos parcialmente lavados, también hay presencia de pequeñas capas de lodo guijoso arenoso, con guijos pertenecientes a rocas de textura clástica meteorizada.

7.1.1.12 Columna estratigráfica descriptiva S5a: Comienza con una pequeña intercalación de grava guijosa de matriz lodoarenosa y lodo arenoso ligeramente gravoso en el Miembro Órganos Removido (Qd), seguido de una secuencia grande de gravas guijosas y guijarrosas de matriz constituida por lodo y fracciones de arena de grano fino pertenecientes al Miembro Órganos Superior (QbO2), con intercalaciones de segmentos parcialmente lavados de guijos, guijarros y gránulos.

7.1.1.13 Columna estratigráfica descriptiva S6a: El Miembro Órganos (Qd) Removido contiene grava de guijos de matriz arenolodosa junto a arena dina lodosa ligeramente granulosa.El miembro Órganos Superior (QbO2) está conformado principalmente por gravas de guijos y

guijarros de matriz lodoarenosa con segmentos parcialmente lavados hasta de 1.5 m. La sección que alcanza a salir del Miembro Órganos Inferior (QbO1) empieza con arena muy fina lodosa seguida de una capa de grava de guijarros y bloques con matriz lodoarenosa.

7.1.2 Pruebas granulométricas

Se obtuvieron los resultados de los ensayos de granulometría realizados a 105 muestras de roca sacados de los sondeos S5, S6 y S7b, para tener un acercamiento textural de los depósitos y rocas presentes. En la **tabla 5** se presentan la cantidad de ensayos realizados en cada sondeo y como es su relación con las unidades definidas de los depósitos cuaternarios.

Tabla 5

Promedios porcentuales de los resultados de ensayos granulométricos, separados por Sondeo y por Miembro de la Formación Bucaramanga.

SONDEO	UNIDAD	CANT	μ GRAVA	μ ARENA	μ FINOS
S 5	Qd	5	32.526	25.119	42.355
S 5	QbO2	4	7.946	57.570	34.483
S 5	QbO1	19	16.832	45.5422	37.625
S 6	Qd	2	23.891	34.272	41.838
S 6	QbO2	9	17.671	37.778	44.551
S 6	QbO1	23	10.88	44.755	44.3534
S7	Qd	3	25.767	33.892	40.340
S7	QbO2	7	33.734	36.052	30.213
S7	QbO1	22	20.057	47.516	32.427

En la **tabla 5** se evidencia a grandes rasgos como es la distribución de los tamaños de grano en cada uno de los miembros, lo más fácil de identificar es que el tamaño de grano grava es el que mantiene un menor porcentaje teniendo mayor peso en los miembros superiores, por otra parte, el tamaño arena y finos se distribuye el porcentaje restante de forma casi equivalente. La representación gráfica de esta distribución se hizo por medio de histogramas apilados (ver **figura 22**) y un diagrama de dispersión, donde se expone el porcentaje de tamaños de cada muestra versus la profundidad de donde se sacó, acá se puede ver la tendencia indicada en los valores promedio de la **tabla 5**.

Figura 22



Gráficos de la distribución granulométrica de los sondeos S5, S6 y S7b.

Nota. En el diagrama de dispersión (abajo derecha) hay tres puntos por cada muestra, representando el porcentaje de cada tamaño de grano que las conforman.

7.1.3 Difracción de Rayos X (DRX)

Los análisis DRX se obtuvieron de 6 muestras en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander, estas muestras fueron molturadas y homogenizadas en mortero de ágata y llevadas a un tamaño de partícula menor a 38 µm. Posteriormente, los especímenes fueron montados en un porta muestras de polimetilmetacrilato (PPMA) mediante la técnica de llenado frontal. El análisis cualitativo de las fases presentes se realizó mediante la comparación de los perfiles observados con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 (2016) del *Internacional Centre for Diffraction Data* (ICDD). El análisis cuantitativo se realizó mediante el refinamiento por el Método de Rietveld entre los perfiles observados y los perfiles de difracción reportados en la base de datos. Los porcentajes reportados (ver **tabla 6**) corresponden a la relación entre las fases policristalinas refinadas sin considerar el porcentaje de material amorfo.

Tabla 6

Nombre	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Cuarzo	16,0%	43,0%	55,9%	51,6%	54,2%	40,7%
Moscovita-2m	11,8%	32,7%	21,4%	21,7%	30,4%	11,8%
Caolinita	25,6%	8,0%	19,0%	18,6%	12,2%	24,9%
Sillimanita	8,2%	4,1%	-	-	-	-
Albita	-	-	-	1,0%	-	4,1%
Albita Tratada Térmicamente	2,3%	5,1%	-	-	-	-
Paragonita-2mi	22,2%	-	-	-	-	-
Microclina	-	-	-	5,6%	-	4,9%
Microlina Intermedia	-	4,7%	2,7%	-	-	4,1%
Hematita	5,5%	1,1%	0,5%	0,5%	0,4%	0,5%
Calcita	1,5%	-	-	-	-	-
Montmorillonita	5,0%	1,3%	1%	1,2%	1,5%	8,9%

Resultados cuantitativos de las fases cristalinas presentes en las muestras analizadas.

Nota. Las muestras sirven no representan el conjunto total de arcillas, pero sirven para tener una idea de las fases cristalinas de estas.

Como producto de los análisis DRX se percibe que las fases cristalinas que componen los sedimentos finos de las muestras analizadas son principalmente Moscovita-2m y Caolinita, presentes en cada uno de los especímenes, se detecta un porcentaje considerable de Paragonita en el espécimen M1 y una leve presencia de Hematita y Montmorillonita en todas las muestras. La fase con mayor aparición fue de Cuarzo constituyendo los sedimentos de tamaño más grande. En el grupo de los feldespatos se pudo detectar apariciones de Microclina y Albita.

7.1.4 Asociación de litofacies

Para la asociación de facies se tuvo como apoyo las facies registradas en la **tabla 1**. Partiendo de esta base se definieron cuatro (4) asociaciones de facies para los depósitos cuaternarios de la Formación Bucaramanga presentes en la zona, una casi exclusiva del Miembro Órganos Removido (Qd) y las otras tres distribuidas entre el Miembro Órganos Superior (QbO2) y el Miembro Órganos Inferior (QbO2). Las asociaciones y su respectiva descripción se observan en la **tabla 7**.

Tabla 7

Asociación Facial realizada para los miembros de la Formación Bucaramanga.

Asociación	
Facial	Descripción
AS I	Gravas guijosas areno-lodosas seguidas por lodos arenosos guijosos, con presencia ocasional de segmentos lavados. Presenta clastos subesféricos- subangulares.
AS II	Gravas guijosas y guijarrosas arenosas con presencia de clastos subangulares- subelongados, seguidas por arenas granulosas y guijosas finalizando con gravas granulosas a arenas de grano medio.

	Gravas guijosas a granulosas con presencia de clastos subelongados-
AS III	subangulares, intercaladas con arenas de grano fino a muy fino ligeramente
	granulosas finalizando con arcillas o limos gravosos.
ASIV	Arenas gravosas seguidas por limos granulosos en conjunto con arenas
ASTV	ligeramente gravosas de grano fino.

La asociación facial 1 tiene sus apariciones principalmente en el Miembro Órganos Removido y comprende las facies Ggc + Gglv + FSG + FS. La asociación facial 2 tiene un peso mayor en el Miembro Órganos Superior, aunque también se puede encontrar en la base del Miembro Órganos Removido, sus facies son Ggc+Slg+Fg+FSG. La asociación facial 3 aparece siempre en el Miembro Órganos Inferior, desde el medio hasta su base, justo antes del contacto con la formación infrayacente, abarca las facies Ggc + Sg + Sl + AF + FSG. Por último, la asociación facial 4 se encuentra hacia la base del Miembro Órganos Superior y está conformada por las facies Fg + FSG + Slg + Sg. Ver la **tabla 1** para la descripción de cada facie.

Para tener una imagen clara de la relación entre las facies definidas se hizo un renderizado en el software Voxler 4, donde se graficaron las asociaciones de facies presentes en cada sondeo (ver **figura 23**) y tener una aproximación de su variación lateral.

Figura 23

Fotograma del renderizado ejecutado en Voxler donde se representa la Correlación Facial entre los Sondeos realizados.



Los datos se representaron como una dispersión de puntos correlacionados por una línea que representa el cambio lateral entre las asociaciones faciales. Por otra parte, en los planos YZ y XZ se pusieron dos imágenes ortogonales, reflejando la proyección de los valores producidos por cada asociación (punto) si se propagaran por el espacio, esto para ver el peso que tiene cada asociación en esa zona específica.

Se observa que las asociaciones están inclinadas hacia el NW de la zona y van perdiendo espesor hacia el NE donde se encuentra el rio Surata y la Falla Chitota. La asociación facial AS1 siempre es la más superficial ya que corresponde principalmente a las gravas de matriz lavada. Mientras que AS3 se caracteriza por estar en la base de los depósitos cuaternarios. AS2 y AS4 se encuentran en el medio, con una mayor presencia hacia el tope en dirección SE. Estas asociaciones permitirán una correlación con los datos obtenidos de las tomografías de resistividad eléctrica a partir de sus características físicas.

7.1.5 Correlación e interpolación probabilística 2D

Se realizó una correlación de los depósitos cuaternarios de la Formación Bucaramanga y de las Formaciones de roca subyacentes identificados a partir de los sondeos obtenidos en la zona de estudio. Para esto se organizó los datos disponibles de las estructuras geológicas presentes. En esta fase se hará el computo dividiendo la Formación Bucaramanga en los tres miembros anteriormente señalados, incluyendo una capa de suelo superficial. El basamento estará conformado por la Fm. Tiburón, Fm. Diamante y la Fm. Bocas.

Primero se configura la grilla con las coordenadas geoespaciales (en Magna-Sirgas Bogotázone) pertenecientes a la zona y se cargar los datos de entrada para el modelo. Se trabajo con las bases de las capas a representar, en conjunto con las orientaciones adquiridas de la interpolación de sondeos. Después subir la información se procedió a representarla en r3 para corroborar que la ubicación de los puntos introducidos concuerde con lo planteado.

La información se obtuvo de 13 sondeos, 7 sondeos (S1-S7b), concentrados casi en su totalidad en el centro del área, con una profundidad media de 130 m. Los 6 sondeos restantes (S1g-S6a) se disponen con mayor densidad en el SE de la zona y alcanzan una media de 42m identificándose el Miembro Órganos Removido (Qd) y tramos del Miembro Órganos Superior (QbO2) y solo el S6a llego el contacto con el Miembro Órganos Inferior (QbO1). Teniendo los puntos importados se procedió a colocar la topografía. Esto se hizo descargando un DEM ASTER de alta resolución, recortando la imagen y adecuándolo para el caso de estudio particular.

Para un mejor análisis se trazó en el modelo tres (3) secciones que atraviesan la zona de forma diagonal y transversal. Después de establecer el interpolador y realizar el computo, se graficó los perfiles, obteniendo los cortes geológicos (ver **figura 24**) anteriormente establecidos. Se muestran las capas con las dimensiones y disposición espacial calculadas a partir de las aproximaciones matemáticas y probabilísticas implementadas en GemPy para el modelado de estructuras geológicas.

Figura 24

Secciones transversales del modelo geológico realizado en GemPy. En la primera imagen se destaca la vista en planta del modelo.



Nota. Se debe considerar que en las zonas donde la densidad de información es menor, las relaciones tendrán mayor incertidumbre, en especial cuando influyen inconformidades y fallas geológicas.

7.1.6 Visualización del modelo geológico 3D

Para finalizar la representación de las superficies geológicas existentes en el modelo actual, se computa la malla de puntos cargados en superficies tridimensionales (ver **figura 25**), esto permite ver las relaciones de las capas según el modelo y como afectan las discordancias estructurales a las mismas. Con esto se tiene una base para correlacionar las tomografías de resistividad eléctrica con la geología de la zona, se puede realizar un amarre datos geofísicos-geológicos para tener más datos de referencia. Al final del análisis geológico-geofísico se consiguen mayor cantidad de puntos a interpolar, disminuyendo la incertidumbre.

Figura 25

Visualización 3D del modelado realizado por GemPy.





Tal como se aprecia en el renderizado, las dimensiones de las formaciones subyacentes a los depósitos cuaternarios (fm. Tiburón, fm Bocas, fm. Diamante) no están bien representadas, esto sucede por la falta de datos para realizar la interpolación, puesto que los sondeos alcanzan una profundidad máxima de 150 m, esto significa que no se conoce las bases o contactos de estas formaciones para tenerlas como referencia en los espesores de las capas del modelo.

7.2 Parámetros petrofísicos teóricos

En esta sección se hará un estimado de los parámetros petrofísicos de resistividad y porosidad analizando los resultados obtenidos de ensayos de laboratorio de granulometría, análisis de suelo y humedad, comparándolos con valores estándar de resistividad y porosidad de los materiales presentes en la zona.

Se empezará con la resistividad para las distintas facies de la zona, considerando el CEC se obtenido por análisis de química suelo realizados a veinte (20) muestras como se puede ver en la **tabla 8**, sopesando los valores de CEC para minerales arcillosos principales reportados por García & Suarez en 2013 (ver **figura 26**). Se observa que el valor máximo de capacidad de

intercambio catiónico en las muestras analizadas es de 20 meq/100g, lo cual concuerda con las fases cristalinas más comunes (moscovita y caolinita) reportadas en los análisis de difracción de rayos x, con esta consideración se estimará los valores de resistividad en base a su porcentaje de finos en conjunto con los resultados de porcentaje de humedad (ver **tabla 9**) y comparándolos con los valores promedio de resistividades planteados por Loke (2004) para algunos materiales terrestres (ver **figura 7**).

Tabla 8

Valores de Capacidad de Intercambio Catiónico y Conductividad Eléctrica, obtenidos de 20 muestras por medio de análisis químico.

Sondeo	Profundidad	CEC (<i>meq</i> /100 <i>g</i>)	CE (mmhos/cm)
S1	14.30-15.25	13.4	0.09
S1	55.25-55.50	5.40	0.07
S1	90.65-91.00	12.0	0.09
S2	17.45-17.55	2.60	0.08
S2	37.75-38	2.40	0.04
S2	76.00-76.85	12.2	0.08
S 3	25.8-26.1	8.40	0.05
S 3	59.00-59.50	10.4	0.11
S 3	72.60-73	10.4	0.08
S4	27.95-29.00	16.6	0.09
S4	65.40-65.60	11.8	0.07
S 5	25.45-25.65	10.2	0.05
S 5	42.45-42.90	20.8	0.10
S 5	63.95-64	7.2	0.05
S6	22.00-22.30	11.4	0.06
S6	54.90-55.0	8.40	0.07
S6	110.70-111.1	17.4	0.09
S7B	79.60-80.20	15.4	0.12
S7B	16.57-17.80	11.0	0.10

Figura 26

Valores de CEC para minerales arcillosos principales.

Mineral	CEC (cmolkg ⁻¹)
Kaolinite	5-15
Illite	25-40
Vermiculite	100-150
Montmorillonite	80-120
Chlorite	5-15

Para tener una referencia de la saturación que pueden llegar a tener las distintas capas en el subsuelo, se tienen pruebas de porcentaje de humedad realizadas a partir de ensayos de peso unitario húmedo/peso unitario seco, de estas pruebas se realizaron primero a 14 muestras tomadas de los sondeos S1 al S7b, los datos relevantes de pesado y su cálculo de porcentaje en agua se registran en la **tabla 9**.

Tabla 9

Sandaa	Drofundidad	Peso Unitario	Peso Unitario	Volumen De
Sondeo	Profundidad	húmedo	Seco	Humedad
S1	56.5-56.9	2.218	2.19	1.262398557
S2	9.3-9.65	2.303	2.248	2.388189318
S2	17.05-17.95	2.632	2.011	23.59422492
S2	37.85-38.25	1.967	1.923	2.236908998
S 3	71.20-72.60	2.273	2.231	1.847778267
S4	65.40-65.80	1.896	1.87	1.371308017
S 5	4.2-4.7	2.478	2.382	3.87409201
S 5	25.05-25.45	2.199	2.185	0.636653024
S 5	29.75-29.85	2.172	2.039	6.123388582
S6	16.80-17.20	2.133	1.937	9.188935771
S6	41.20-41.60	2.003	1.968	1.747378932

Resultados de los ensayos de peso unitario húmedo vs seco para cálculo de porcentaje de humedad.

S6	54.50-54.90	2.286	2.057	10.01749781
S6	73.20-73.60	1.908	1.883	1.310272537
S7	58.20-58.60	2.208	2.203	0.226449275

En la tabla 9 encontramos valores altos de porcentaje de humedad de mayores a 5% en volumen en peso para las muestras analizadas de los sondeos S2 (~17 m de profundidad) asociado a un limo gravoso, S5 (~29 m de profundidad) asociado a una arena granulosa a guijosa con matriz lodosa muy mal seleccionada y S6 (~17 m y ~54 m de profundidad) correspondientes a arcilla arenosa ligeramente granulosa-guijosa y a limos arenosos gravosos. Posteriormente, a partir de 150 ensayos más se usaron para determinar el contenido de agua con mayor densidad de muestreo en los pozos S1, S2, S3 y S4, los datos se graficaron por medio de un diagrama de columnas para mostrar la profundidad de las muestras y en otro eje representando el porcentaje de humedad se utilizó una línea poligonal (ver **figura 27**).

Figura 27



Gráfica de porcentaje de humedad en las muestras de los sondeos S1, S2, S3, S4.

Se observa que las rocas de los sondeos S2 y S3 tienen una saturación de agua mayor a nivel superficial que las de los sondeos S1 y S4. El porcentaje máximo de humedad alcanzado se encuentra en S2 como se había observado en la muestra de la **tabla 9.** Se encuentra mayor

porcentaje de humedad general en rocas con alto contenido de finos (lodos y arenas lodosas), en rocas mal seleccionadas con poca presencia de matriz o matriz lodosa.

Por último, con los resultados obtenidos en los ensayos de granulometría y las pruebas de peso unitarios húmedos vs pesos unitarios secos se realizó un estimado de porosidad a partir de relaciones entre pesos específicos relativos, esto se comparó con los valores promedio de porosidad para algunas rocas no compactas en Vélez Otálvaro (1999) para establecer el rango de porcentaje de porosidad (ver **tabla 10**).

Los resultados de los rangos de valores teóricos para estos parámetros petrofísicos en las principales facies presentes en la zona de estudio se presentan en la tabla 10.

Tabla 10

Facie	Descripción	% Finos	CEC (meq/ 100g)	% Humedad	% Porosidad	Res (ohm.m)
Ggc	Gravas arenosas a guijosas clasto soportado matriz arenolodosa.	12-30	5-15	5-10	15-30	150-800
Gglv	Grava guijosa con matriz lavada arenosa arcillosa.	23-40	5-20	4-18	15-25	100-500
Sg	Arena de grano medio a granuloso.	15-45	8-22	2-10	20-30	30-400
Slg	Arena de grano fino a medio ligeramente gravosa.	25-60	3-18	3-15	15-35	20-180
FSG	Limo arenoso ligeramente guijoso.	40-75	6-25	5-22	30-45	10-150

Parámetros petrofísicos estimados y valores de ensayos de laboratorio.

Nota. Los valores de porosidad y conductividad son una estimación teórica. Se requiere la realización de ensayos de laboratorio a los núcleos tomados en los sondeos para la obtención de datos confiables

7.3 Modelo de resistividades

En el modelo de resistividades se tendrán en cuenta 36 tomografías adquiridas en el área de estudio entre el año 2017 y 2019 por Geomática (ver **figura 15**), en campañas que se hicieron con el propósito de caracterizar los movimientos en masa e identificar las aguas subterráneas. Los arreglos utilizados en la adquisición de estas tomografías son Schlumberger y Wenner-Schlumberger, con un espaciamiento entre electrodos de 2 hasta 9 m, dependiendo de la longitud de la tomografía. Las longitudes varían desde 165 m hasta 495 m, con una media de 240 m aproximadamente. La profundad máxima prospección fue de 120 m en un arreglo Wenner-Schlumberger de 495 m de longitud, aunque la profundidad media de prospección rondaba los 50m en arreglos de menor longitud.

A continuación, se presenta algunos perfiles de las tomografías adquiridas por Geomática ubicadas al SW (G17 - G22), NW (G19 - G20), NE (G4 - G12) y SE (G8 – G10), para dar una noción de cómo se comportan las resistividades en los depósitos y rocas presentes en cada cuadrante antes de realizar cualquier interpolación. Por esta razón se escogen dos tomografías por cuadrante (ver **figuras 28, 29, 30** y **31**) y su respectiva información relevante de campo (ver **tablas 11, 12, 13** y **14**).

Tabla 11

Información	general de	e adquisición	para las	tomografías	G17 -	<i>G22</i> .

ID	Punto de Inicio	Punto Final	Longitud	Sep. elec	Tipo Arreglo	
G17	X:1'104.769.57	X:1104547.68	240 m	3 m	Schlumberger	
	Y:1'282.351.77	Y:1282425.98				
G22	X: 1104710.04	X: 1104477.10	400 m	5 m	Schlumberger	
	Y: 1282125.22	Y: 1282439.97				

Figura 28

Perfiles de Tomografías de resistividad eléctrica G17 - G22, ubicadas al SW de la zona de estudio.



Nota. Perfiles invertidos por Geomática reinterpretados y dispuestos en la imagen representando el SW, para ver la totalidad de tomografías dirigirse a la figura 15.

Al SW de la zona podemos encontrar valores de resistividad relativamente altas (~900 ohm-m) debido a la presencia de fracturamiento como se puede observar en la **figura 35**, esto permite pequeñas concentraciones de agua entre los espacios producidos por el fracturamiento. Estas concentraciones de agua se dan a nivel superficial, siendo una posible fuente de recarga constante las aguas lluvia.

ID	Punto de Inicio	Punto Final	Longitud	Sep. elec	Tipo Arreglo
G19	X: 1'104.741,41 Y: 1'282.753,08	X: 1'104.709,22 Y: 1'283.030,61	280 m	3.5 m	Schlumberger
G20	Y: 1'104.860,74 Y: 1'282.790,03	X: 1'104.584,75 Y: 1'282.758,94	280 m	3.5 m	Schlumberger

Información general de adquisición para las tomografías G19 - G20.

Figura 29

Perfiles de Tomografías de resistividad eléctrica G19 - G20, ubicadas al NW de la zona de estudio.



Nota. Perfiles invertidos por Geomática reinterpretados y dispuestos en la imagen representando el NW, para ver la totalidad de tomografías dirigirse a la figura 15.

En el cuadrante NW los valores de resistividad se tornan más constantes y moderados (~50-100 ohm-m), con algunas zonas altas también debido a fracturamiento, permitiendo la concentración de agua entre esos espacios (G20), a nivel superficial se puede distinguir algunos niveles donde aumenta levemente la resistividad (150 m) a causa de la mala compactación y selección del Miembro Órganos Removido (G19).

Figura 30





Nota. Perfiles invertidos por Geomática reinterpretados y dispuestos en la imagen representando el NE, para ver la totalidad de tomografías dirigirse a la figura 15.

ID	Punto de Inicio	Punto Final	Longitud	Sep. elec	Tipo Arreglo
G04	X: 1'105.033,25 Y: 1'282.701,61	X: 1'105.080,55 Y: 1'282.914,80	220 m	4 m	Wenner- Schlumberger
G12	X: 1'105.105,21 Y: 1'282.860,53	X: 1'104.945,43 Y: 1'282.901,49	165 m	3 m	Wenner- Schlumberger

Información general de adquisición para las tomografías G04 - G12.

La parte NE de la zona conserva un valor moderado de resistividad hacia el interior del cuadrante donde no están en contacto con las Fallas Transversal y Falla S. Las dos tomografías escogidas (G4 y G12) se encuentran en las inmediaciones de estas dos fallas por lo cual presentan un fracturamiento mayor aumentando sus valores de resistividad. Esto también se observa a nivel superficial por la textura de los depósitos coluviales recientes.

Tabla 14

Información general de adquisición para las tomografías G08 - G10.

ID	Punto de Inicio	Punto Final	Longitud	Sep. elec	Tipo Arreglo
					Wenner-
G08	X: 1'105.253,42	X: 1104948.71	337 m	6 m	Schlumberger
	Y: 1'282.376,55	Y: 1282313.23			Semumberger
G10	X: 1105109.06	X: 1104961.84	275 m	5 m	Wenner-
010	V: 1282228.00	N: 1292564.04	275 m	5 111	Schlumberger
	1:1282338.09	1:1282504.94			

Figura 31



Perfiles de Tomografías de resistividad eléctrica G8 - G10, ubicadas al SE de la zona de estudio.

Nota. Perfiles invertidos por Geomática reinterpretados y dispuestos en la imagen representando el SE, para ver la totalidad de tomografías dirigirse a la figura 15.

En el cuadrante SE las resistividades son más elevadas a nivel superficial, marcando una diferencia entre miembros. El miembro Órganos superior se identifica a unos 20 m de profundidad con valores de resistividad de entre 60-300 ohm-m, relativamente altos, sin mostrar rastros evidentes de concentraciones de agua hasta alcanzar los 40 m de profundidad (G10).

Continuando con el análisis se cargaron las 36 tomografías a un software de modelamiento de datos llamado Voxler. Este cuenta con herramientas útiles para interpolar métodos geofísicos,

permitiendo visualizar la información en 3D y utilizar las distintas herramientas matemáticas en el proceso. En la **figura 32** podemos ver las tomografías en el espacio después de ser cargadas al programa, se muestran dos perspectivas desde una vista inferior y superior.

Figura 32

Tomografías para el análisis, cargadas en Voxler, perspectivas desde vista inferior y superior.



Después de cargados los datos se hizo una representación de isosuperficies, valores iguales de resistividades, utilizando el método de interpolación de distancia inversa ponderada, es decir, el programa determinó los valores de cada celda de una combinación ponderada linealmente, tomando un conjunto de puntos de muestra. Se escogieron valores para mostrar las concentraciones de resistividades a diferentes niveles (ver **figura 33**).

Figura 33





Nota. Los valores de resistividad (ohm-m) mostrados en la barra lateral de cada figura se dan en escala logarítmica base 10. En esta representación se utiliza una interpolación y extrapolación volumétrica, conllevando a exageraciones en los resultados al no tener un mallado de tomografías preciso y dispuesto adecuadamente.

MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADES

En la figura 33.A se establecen valores bajos de resistividad (~6.04 ohm-m) donde se pudieron identificar concentraciones de agua. En la figura 33.B son valores medios-bajos de resistividad (~34.67 ohm-m) para identificar arenas con presencia de arcilla que aporte a la conductividad de la roca. Para la figura 33.C se escogieron valores medio-altos de resistividad (~180.82 ohm-m), buscando rocas cuya textura no permite una buena conductividad, relativamente seca, con mala selección y con arcilla en forma diseminada. Por último, para la figura 33.D se escogieron los valores más altos de resistividad para la escala manejada en la zona (~600 ohm-m) determinando las zonas más afectadas por fracturamiento que no permiten un flujo de corriente.

Como último proceso, se escogieron los valores de resistividad de las 36 tomografías (ver figura 34) y se hizo un proceso de filtrado, eliminando lo que se establecieron como valores atípicos, estos incluyeron los valores muy cercanos a 0 y los valores mayores a 5000 ohm-m con el fin de no afectar los valores adyacentes en el proceso de interpolación. Después del calibrado se utilizaron dos herramientas de análisis matemático de los datos obtenidos, el primero (ver figura 34.A) fue establecer un mallado de proyecciones ortogonales, luego se procedió al renderizado del volumen tridimensional de los valores de resistividad en la zona (ver figura 34.B), se utilizó el mismo método de interpolación de distancia inversa ponderada, con una propagación isotrópica en el espacio.

Estos métodos bajan su precisión a medida que se aleja de un dato real, por lo cual los valores lejanos a zonas con buen mallado y alta densidad de tomografías pueden ser erróneos, se recomienda considerar su incertidumbre al momento de buscar un valor de resistividad real. Por conveniencia, como se observa en la barra lateral de la figura 34, se utilizó una escala logarítmica para la representación de los valores de resistividad, debido a la amplia gama de valores que da la

medición. También se muestran dos vistas de diferentes perspectivas (norte y sur) de la zona, en donde se alcanzan a observar tanto planos superiores (XY) como laterales (YZ-ZX) del modelo.

Figura 34

Renderizado 3D de los valores de resistividad eléctrica en la zona. **A**) *Vista perspectiva Sur.* **B**) *Vista perspectiva Norte.*



Como se observa en la figura 34, el sector SW de la zona de estudio se concentran valores más altos de resistividad, esto posiblemente se debe a un aumento de grietas y discordancias en las rocas producto de movimientos en masa (deslizamientos) en los depósitos cuaternarios del abanico de Bucaramanga en conjunto con la falla antitética de la Falla Transversal (ver figura 13), en el lado Oeste del sector (plano YZ) pasa la Falla Las Olas, produciendo mayor inestabilidad en el subsuelo, dando de resistividad entre 600-800 ohm-m. El sector NW presenta los valores más bajos y constantes de resistividad en el modelo, siendo consistentes con los resultados teóricos para areniscas lodosas (~100 ohm-m) relativamente secas, los valores aumentan hacia el Oeste donde también está afectado por la Falla Las Olas. En el NE se identifican los valores más altos en la parte baja del cuadrante donde ocurre la intersección de la Falla Transversal y la Falla S, por otro lado, al norte del cuadrante las resistividades son bajas, se identificaron niveles saturados de depósitos de terrazas y en la Formación Tiburón, esto a causa de fracturamiento por la Falla Chitota y la recarga hídrica del Río Surata. Lo correspondiente al SE de la zona también está afectada por la intersección entre fallas, en la parte más Norte del cuadrante se interseca la Falla Transversal y la Falla S y más abajo se encuentra la intersección de la de la Falla S con la falla antitética de la Falla Transversal, eso produce una elevación en las resistividades en ese sector y crea espacio para almacenar volúmenes de agua casi inmediatamente después a las zonas de intersección.

7.4 Integración de los modelos

Para la integración de modelos se crearon tablas (ver **tabla 15-23**) donde se condense la información geológica y geofísica relevante recolectada en los modelos anteriormente descritos. Las descripciones se harán dividiendo la zona de interés en nueve (9) sectores (ver **figura 35**) por organización y para tener una mejor estructura en la presentación de los datos.

Figura 35

División en sectores utilizada en la descripción geológico-geofísica.



Tabla 15

Integración de datos sector 1.

Asociación Facial	Facies	Prof. (m)	Res (ohm-m)	Descripción
AS I	Ggc-Gglv	3-14	100-120	Gravas guijosas a guijarrosas con segmentos ligeramente lavados.
AS II	Ggc-Slg-Sg	28-48	12-30	Gravas granulosas, arenas gruesas y arenas de grano fino con algunas concentraciones de agua, con presencia de fracturas (25- 55°).
AS III	Ggc-Gglv	15-23	30-70 150-270	Grava guijosa de matriz areno limosa, los valores más altos de resistividad se deben a que tiene muy mala selección.
	Ggc-Sg- Fgop	48-67	20-40 30-65	Gravas de matriz areno-limosa, arenas de grano medio a grueso, limolitas arenosas ligeramente calcáreas, bioturbadas y fracturadas (50°-70°).
AS IV	Fgop -FSG	23-27	54-100	limos arenosos producto de alteración de rocas ígneas y metamórficas.

Asociación Facial	Facies	Prof. (m)	Res (ohm-m)	Descripción
AS I	Gglv	2-10	100-120	Gravas guijosas a guijarrosas con segmentos ligeramente lavados.
AS II	Ggc -Sg	18-40	12-30	Gravas granulosas, arenas gruesas húmedas, depósitos coluviales y depósitos de canal fracturados
AS III	Gglv-Ggc- Sg	42-50 48-56	20-120 40-70	Gravas de guijosa matriz lavada, arenas de grano medio a grueso saturadas.
AS IV	Sl-FSG	23-27	54-100	Arena muy fina limosa, arena fina ligeramente granulosa a guijosa
Fm. Tiburón	Т	50-60	60-250	Arenisca arcillosa de grano muy fina con bioturbación, muy fracturada (55°-66°), la roca posiblemente húmeda.

Integración de datos sector 2.

Tabla 17

Integración de datos sector 3.

Asociación	Facies	Prof.	Res	Descripción
Facial		(m)	(ohm-m)	
AS I	Gglv-Fs	4-10	2-40	Grava de matriz arenolodosa lavada, lodos arenosos. Ambos saturados.
AS II	Ggc-FSG- Slg	10-16 30-38	2-30 50-150	Gravas de matriz arenolodosa, limos granulosos. En algunas zonas (cercanas a fracturas) tienen cuerpos de agua importantes.
AS III	Sg-FSG	40-46	100-450	Arena fina ligeramente, lodo guijoso, relativamente secos en comparación. Los cuerpos de agua están a niveles más superficiales
AS IV	Sg	11-29	31-150	Areniscas de grano fino a medio ligeramente guijosas, humedad moderada.
Fm. Tiburón	Т	46-72	2000-4500 150-700	Arenisca de grano fino, ligeramente calcárea. Tiene partes secas de resistividades mayores, y partes fracturadas y saturadas con resistividades menores.

Nota. Este sector se encuentra en las inmediaciones del Rio Surata y no cuenta con datos estratigráficos confiables, lo que se tienen son a partir de extrapolación a profundidad de los demás sondeos.

Integración de datos sector 4.

Asociación Facial	Facies	Prof. (m)	Res (ohm-m)	Descripción
AS I	Gglv-Fs	8-16	200-540	Gravas guijosas con matriz lavada, limos ligeramente arenosos. Secos, de mala selección.
AS II	Ggc-Slg	17-30 55-77	74-134	Gravas guijosas clastosoportadas, arena media ligeramente gravosa, humedad media-alta.
AS III	Ggc-Slg- FSG	80-110	150-300	Gravas blocosas, guijosas con bloques, arenas de grano grueso ligeramente granulosas. Mala selección. Relativamente secas.
AS IV	Ggc-Sg	30-55	83-220 9-55	Gravas granulosas y arenas lodosas de grano medio. En algunas zonas próximas a fallas está parcialmente saturada.

Tabla 19

Integración de datos sector 5.

Asociación Facial	Facies	Prof. (m)	Res (ohm-m)	Descripción
AS I	Ggc-FSG- Gglv	6-14	50-160	Grava guijosa grano soportada matriz lavada, limo arenoso ligeramente granuloso. Ligeramente húmedo.
AS II	Ggc-FG- FSG	15-25	5-35	Gravas guijosas de matriz arcillosa, limos arenosos gravosos y limos granulosos, saturados en la mayor parte de la zona. Fracturados (30°-50°).
AS III	Ggc-AG- FSG-Slg	46-85	10-60	Gravas guijosas a guijarrosas, limos y arcillas arenosos a guijosas. Alto porcentaje de matriz, moderadamente saturada.
AS IV	Ggc-Slg-FS	21-55	5-50	Arena de grano grueso, guijosa, arenas medias a finas, arcillas guijosas. Se pueden encontrar cuerpos de agua.

Nota. En este sector se encuentran cuerpos de agua de volumen considerable en el subsuelo como se resalta en los valores bajos de resistividad.

Integración de datos sector 6.

Asociación Facial	Facies	Prof. (m)	Res (ohm-m)	Descripción
AS I	Ggm-FS- Ggc	5-19	60-250	Grava guijosa matriz soportada, limo arenoso ligeramente granuloso. Humedad leve.
AS II	Ggc-AG- Slg-Sl	32-50	59-120 3-30	Grava granulosa clastosoportada, arcilla granulosa, arena de grano fino-medio. En algunas zonas se encuentra saturada, mientras que en otras muestra una humedad leve.
AS III	Ggc-SRL- SL	51-60	40-150	Grava guijarrosa de matriz areno arcillosa, suelo residual ocasional, arena de grano fino granulosa. Se observa presencia de fracturas.
AS IV	Ggc-FSG- Slg	20-35	35-60	Grava granulosa clastosoportada, arenas, limos arenosos ligeramente gravosos. Humedad moderada.
FM. TIBURON	Т	60	500-1000	Arenisca de grano fino a muy fino, limolita. Bioturbación alta, rocas brechadas.

Tabla 21

Integración de datos sector 7.

Asociación Facial	Facies	Prof. (m)	Res (ohm-m)	Descripción
AS I	Ggc-Gglv	4-15	100-450	Gravas guijarrosas parcialmente lavadas con matriz lodo arenosa. En algunas zonas tiene acumulación de agua debido al espaciado entre fracturas.
AS II	Ggc-Slg	50-80	400-700	Gravas guijosas a granulosas, arena ligeramente gravosa.
AS III	Ggc-Slg	90-110	500-1100	Arenas medias a gruesas ligeramente gravosas de matriz limo-arenosa.
AS IV	Slg-Sg	34-60	1.923	Arena de grano grueso, guijosa, arena de grano fino, limosa ligeramente granulosa. Fracturamiento ocasionado por deslizamiento.

Nota. Este sector no cuenta con datos lito estratigráficos confiables, ya que son producto de extrapolación.

Integración de datos sector 8.

Asociación Facial	Facies	Prof. (m)	Res (ohm-m)	Descripción
AS I	Gglv-Slg- Sg-Asg	12-25	4-17 150-350	Grava guijosa con matriz lavada, arena arcillosa greno fino, granulosa, arcilla arenosa guijarrosa. En algunas zonas puede tener valores bajos de resistividad debido a plumas.
AS II	Ggc-Slg-Fg	60-90	100-400	Gravas guijosas a granulosas, arena media a gruesa. Mal sorting. Grano grueso. Fracturas por deslizamiento.
AS III	Ggc-Slg-Sl- AF	100-120	20-150	Grava guijosa ligeramente blocosa, areniscas de grano medio. Altamente fracturadas. Algunas zonas parcialmente saturadas.
AS IV	Sg-FSa	34-60	10-80	Arena de grano grueso guijosa, limo arenoso ligeramente granoso. Algunas zonas saturadas.

Tabla 23

Integración de datos sector 9.

Asociación Facial	Facies	Prof.	Res	Descripción
ASI	Gglv-FSG	6.5-17.5	100-300	Gravas clastosoportadas matriz lavada, lodos arenosos granulosos. Se encuentran fracturadas (45°-70°).
AS II	Ggc-Sg	46-58	500-900	Gravas guijosas, arena de grano medio ligeramente guijosa. Se encuentra intensamente alterados. Fracturadas.
AS III	Ggc-Slg-AS	58-69	800-1300	Gravas arenosas de clastos ígneos y metamórficos, arcilla arenosa, limosa granulosa. Se encuentran moderadamente alterados. Con fracturas en gravas (45°-70°).
AS IV	Ggc-Sglv- FG	18-46	10-40 150-900	Gravas arenosas a guijosas, arena grano grueso lavada, limo arenoso guijoso. Algunas zonas entre fallas están saturadas, pero en la fractura tiene valores altos de resistividad.

7.5 Visualización del modelo geológico-geofísico

Para finalizar se hizo la correlación entre la información geológica-geofísica vista anteriormente, para modelar por medio de GemPy los miembros (Qd, QbO2, QbO1) de la formación Bucaramanga en la zona de estudio, se interpolaron 107 puntos a partir de las descripciones de columnas y el amarre geofísico con las tomografías eléctricas, las unidades que forman parte del basamento (fm. Diamante, fm. Bocas, fm. Tiburón) se dejaron fuera del modelo, siendo representadas únicamente en el mapa geológico (ver **figura 36**), debido a que no se tienen datos suficientes por la profundidad de las tomografías y sondeos. En la figura 36 vemos secciones transversales al modelo, donde se puede comparar con las obtenidas en la figura 24.

Figura 36



Visualización cortes trazados en el modelo y mapa geológico.

Se observa mayor presencia aflorante del miembro órganos Superior a comparación del mapa geológico original (sin el amarre geofísico), esto ocurre especialmente en las depresiones de altitud del terreno (ver **figura 37**), hacia el centro de la zona. Hacia el NE podemos ver que aflora Órganos Inferior seguido de la Formación Tiburón, concordando con la figura 2.

Figura 37

Visualización modelo geológico-geofísico 3D.



Aunque el desplazamiento en la Formación Bucaramanga producido por las fallas no es tan pronunciado como en el primer modelo (ver **figura 24**), las capas muestran la misma tendencia de disminuir su espesor y tener la inclinación hacia al NE y al N cerca a la Falla Chitota.

8. Análisis de resultados

A partir del análisis de las columnas estratigráficas se hizo una caracterización litológica en donde se identificaron 12 facies pertenecientes a los depósitos cuaternarios y se agruparon en 4 asociaciones faciales, donde tres se relacionaron con secuencias grano crecientes (AS I, AS III, AS IV) y una de una secuencia grano decreciente, estas variaciones son comunes en los depósitos de abanicos aluviales, como lo son los depósitos cuaternarios recientes de la Formación Bucaramanga. El tamaño de grano se mantiene con las mismas proporciones a lo largo de la zona de estudio, donde predomina tamaño arena y finos (30-50% cada uno), pero con una presencia importante de tamaño grava (10-30%), la cual aumentaba hacia el Sureste del área de estudio, concordando con la proximidad al ápice del abanico. Las fases cristalinas presentes en los tamaños de grano fino (arcillas) son Moscovita y Caolinita, ocasionalmente con presencia de sillimanita y montmorillonita encontrándose valores de CEC entre 10-20 meq/100g.

Las rocas no consolidadas con mala selección que llegan hasta profundidades entre 50-70m aproximadamente, sumado a la presencia de fracturas y alto grado de alteración en algunas zonas, crea las condiciones propicias para zonas geológicamente inestables.

Se encuentran fracturas distribuidas por toda el área, especialmente en las formaciones que sirven como basamento a los depósitos cuaternarios. Las zonas donde el fracturamiento es más intenso se encuentra en las intersecciones de fallas, como Falla Transversal-Falla S y falla Antitética-Falla S. La parte NE está afectada por la Falla Chitota, la cual es una falla mayor que pasa en la misma dirección del Rio Surata de la cual se desprende la Falla S.

Los miembros definidos (Qd, QbO2, QbO1) disminuyen su espesor de forma general hacia el norte-noreste de la zona de estudio, encontrándose la formación subyacente a menor profundidad, para el caso de la parte norte la Formación Tiburón, esto puede deberse a la distancia
con el ápice del abanico, en conjunto con movimientos tectónicos (Falla Chitota, Falla S) y a la erosión.

El modelo de resistividades nos da un indicio sobre la ubicación de cuerpos o concentraciones de agua, así como de rocas que están más saturadas que otras. Los cuerpos de agua se pudieron identificar con mayor facilidad en la mitad de la zona de estudio, preferiblemente entre dos fallas que permitan el espaciamiento para el tránsito y almacenamiento agua (ver figura 40.A) y hacia la zona NE en las inmediaciones del Rio Surata, donde también se encuentra la Formación Tiburón saturada, las rocas saturadas se podían encontrar en las capas más superficiales (ver figura 40.B). En el resto de la zona se encuentran resistividades consistentes con areniscas lodosas entre 30-200 ohm-m en los depósitos cuaternarios, mientras que las formaciones infrayacentes pueden alcanzar valores hasta de 3000 ohm-m.

Los valores más altos de resistividades en los depósitos cuaternarios se producen en las zonas falladas, principalmente donde se intersecan las fallas de sentido N-S y E-W, aunque también se identificó hacia el norte de la zona en sectores influenciados por la Falla Chitota.

9. Conclusiones

El modelamiento de estructuras geológicas a partir de la interpolación de puntos y métodos de inversión está limitado a la cantidad de información de entrada al modelo y a la capacidad que tiene un computador de crear modelos acertados explicado todas las observaciones realizadas. Es de gran importancia contar con un volumen suficiente de información para disminuir las incertidumbres de nuestro modelo, además se debe contar con un análisis de parte del geocientífico, debido a la cantidad de variables involucradas en los distintos ambientes geológicos. Sin embargo, con el avance en las ciencias de la computación se debe hacer uso de las herramientas

tecnológicas modernas (cada día más eficientes) para el desarrollo de modelos geológicos e inversión geofísica.

El modelo geológico más probable permitió observar la disposición de las capas de roca en la zona e identificar como son afectadas por las fallas presentes. Se observa una tendencia N-NE que tiene el buzamiento de los miembros de la Formación Bucaramanga y el desplazamiento provocado por las fallas en especial donde ocurren las intersecciones, originando una gran densidad de fracturamiento en sus zonas contiguas.

En el modelo de resistividades se observa un aumento de resistividad (> 1000 ohm-m) justo en los planos de falla, siendo más marcado en las intersecciones de dos fallas, lo que causa esto es que los espacios impiden que el flujo de corriente pase, sin embargo, este espaciamiento es la entrada a la acumulación de agua, ya que sirve para el tránsito de agua, permitiendo su acumulación en los depósitos cuaternarios posteriores a los planos de falla, por ejemplo encontramos el miembro Órganos Superior Saturado hacia la parte central de la zona de estudio. También se encontraron rocas más saturadas en la superficie y así como en las inmediaciones del Rio Surata, como es de esperarse.

La presencia de arcillas influye los resultados de las resistividades, especialmente en esta zona donde la presencia de finos en las muestras analizadas por granulometría es de ~40%. Las fases cristalinas principales en los resultados DRX (Moscovita y Caolinita) no tienen una gran capacidad de intercambio catiónico (<20 meq/100) lo cual no disminuye de forma abrupta los valores de resistividad. Sin embargo, esto complica considerablemente la formulación de un modelo petrofísico en los depósitos cuaternarios de presentes.

10. Recomendaciones

Desarrollar campañas donde se puedan obtener más sondeos al norte y suroeste de la zona, en los barrios Villa María, La Cemento, Los Ángeles y Miramar, para completar la información faltante en el área de estudio y poder elaborar interpolaciones más precisas de las estructuras geológicas presentes.

Aumentar el porcentaje de datos estructurales adquiridos localmente, para prescindir de la interpolación entre los contactos de los miembros definidos en depósitos cuaternarios y formaciones, disminuyendo la incertidumbre producida por las fracturamiento de la zona, ya que al ser un sector influenciado por fallas cercanas (con actividad reciente reportada), se requiere, para un modelo geológico, datos de entrada con un volumen suficiente de información estructural.

Profundizar en la caracterización petrofísica de los núcleos por medio de ensayos de laboratorio de porosidad, permeabilidad y resistividad para realizar un modelo petrofísico robusto que permita una correlación de los parámetros obtenidos con los métodos resistivos, y llegar a tener una noción más acertada de volumen hídrico que influye en los resultados geofísicos.

Estructurar una base de datos organizada con toda la información obtenida en la zona a partir de cada campaña realizada, para facilitar el análisis de datos y poder implementar algoritmos de filtrado y correlación de datos. Esto aumentara la efectividad de cada análisis e interpretación que se realice en el futuro.

Referencias Bibliográficas

- Andersen, M., Duncan, B. & McLin, R. (2011). Los núcleos en la evaluación de formaciones. Oilfield Review Spanish. 25(2).
- Archie, G., (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. In: Petroleum Technology. Houston, Texas.
- Bates, R.L. & Jackson, J.A. (1980) Glossary of Geology. 2nd Edition, American Geological Institute, Virginia.
- Betancourth, D., Gomez C., J., Mosquera, J. & Tirado-Mejía, L., (2010). Análisis por Difracción de Rayos X de rocas provenientes de región esmeraldífera. Scientia et Technica, 44.
- Blair, T. & McPherson, J., (1994). Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. Sedimentary Research, 64(3), pp.450-489.
- Boggs, S. (2006). Principles Of Sedimentology and Stratigraphy. 4th ed. New Jersey: Pearson, pp.246-248.
- Botía, W. (2015). Manual de Procedimientos de Ensayos de Suelos y Memoria de Calculo. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, pp.31-32.
- Bracamontes, M. (2015). Propiedades eléctricas de rocas de yacimientos petroleros mojadas por agua y mojadas por aceite. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Petrolero. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Bueno E., Solarte A. (1994). Geología y Comportamientos Erosivos del Área de Reserva Forestal de Bucaramanga. Tesis de grado para optar al título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander. Departamento de Geología.
- Castilla Gomez, J. & Herrera Herbert, J., (2012). El Proceso De Exploración Minera Mediante Sondeos. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de explotación de recursos minerales y obras subterráneas. Madrid
- Clavier, C., Coates, G. & Dumanoir, J. (1984). Theoretical and Experimental Bases for the Dual-Water Model for Interpretation of 'Shaly Sands.
- Clavijo, J., Mendoza, H., Royero, J.M., Bernal, L., & Reyes, G. (1993). Contribución al conocimiento de la geología de los Santanderes. Cuarto Simposio de Geología Regional. Bucaramanga. INGEOMINAS. Documento interno, pp.99.

- Clavijo, J. & Royero Gutierrez, J., (2001). Mapa Geologico Generalizado del Departamento de Santander. Memoria Explicativa. Bogota, pp.40-47.
- Colombo, F. (2010). Abanicos aluviales: procesos de transporte y acumulación de materiales detríticos. In: A. Arche, ed., Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp.85-86.
- Cullity, B. & Stock, S., (2014). Elements of X-Ray Diffraction. 3rd ed. Harlow, England: Pearson, pp.305-306.
- Empresa De Desarrollo Urbano EDU (2017). Informe geología y geomorfología sector norte de Bucaramanga. Bucaramanga.
- Galán, D. & Mora K. F. (2011). Modelo Estructural preliminar para el área de Bucaramanga. Tesis de grado para optar al título de Geólogo. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- Geomática Universidad Industrial de Santander & AMB (2018). Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga (Barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, villa helena, villa rosa, villa maría). Geología Estratigrafía y Evolución Geológica. Bucaramanga.
- Geomática, Universidad Industrial de Santander & AMB (2019). Estudio de factibilidad y los diseños de ingeniería de detalle, para la construcción de una galería de drenaje en el Barrio La Esperanza II del municipio de Bucaramanga, como medida para la reducción del riesgo por movimiento en masa profundos. Geología Modelo Geológico. Bucaramanga.
- Geotechnical Engineering Bureau (2015). Test Method for the grain-size analysis of granular soil materials. New York: Office of Technical Services, pp.3-6.
- Gómez-Villar, A. (1996). Dinámica Geomorfológica y Conos Aluviales En Pequeñas Cuencas Torrenciales De Montaña. Universidad de Zaragoza, España.
- Gómez, J., Montes, N.E., Nivia, Á. & Diederix, H., compiladores. (2015). Mapa Geológico de Colombia 2015. Escala 1:1 000 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá.
- Goldsmith, R., Marvin, R., & Mehnert, H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper, Vol. 750-D, D41-D49.
- Griffiths, D. & Barker, R., (1993). Two-dimesional resisitivity imaging and modelling in areas of complex geology. In: Journal of Applied Geophysics, 3rd ed. Birmingham B15 2TT, UK: School of Earth Sciences, University of Birmingham, pp.211-226.
- INGEOMINAS (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Subdirección de amenazas geoambientales. Bogotá.

- INGEOMINAS (2004). Modelo geológico geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga. Subdirección recursos del subsuelo. Evaluación del agua subterránea en el área metropolitana de Bucaramanga, Santander. Bogotá.
- 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. Subdirección de geología básica. Bogotá.
- INGEOMINAS, (2010). Integración Geológica e hidrogeológica del centro de Santander. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá, pp.31-60.
- Jiménez, G. (2013). Relationship between curved thrust belts, rift inversion, oblique convergence and strike-slip faulting an example of Eastern Cordillera in Colombia. Doctorado. geologia dell'ambiente e delle risorse.
- Jiménez, G., Speranza, F., Faccenna, 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, 57, 12–22.
- Juárez, B. & Rodríguez, R. (2005). Mecanica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tomo 1, México.
- Keller, G.V. & Frischknecht, F.C. (1966). Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Pergamon Press, Oxford.
- Loke, M. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. [ebook] Disponible en: <u>https://sites.ualberta.ca/~unsworth/UA-classes/223/loke_course_notes.pdf</u>. [Acceso 01 Jun. 2021].
- López Isaza, J. & Zuluaga, C., (2017). Geoquímica de roca total de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, Macizo de Santander.
- Mejía, C. (2011). Metodología para el desarrollo de modelos petrofísicos aplicados a la optimización de producción en campos maduros. Tesis de grado para optar al título de Geología. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- Melgarejo, J., Proenza, J., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. In Boletín de la Sociedad Geológica mexicana (pp. 1-23). Sociedad Geológica Mexicana.
- Paris, G., Machette, M., Dart, R. and Haller, K. (2000). USGS. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. Denver, Colorado.
- Ramírez, J., & Hernández O. (2018). Caracterización hidroestratigráfica del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga en la zona occidental del municipio de Bucaramanga,

Santander. Tesis de grado para optar al título de Geólogo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

- Restrepo-Pace, P.A., (1995). Late Precambrian to early Mesozoic tectonic evolution of the colombian Andes, based on new geochronological, geochemical and isotopic data. Unpub. Ph.D. thesis, University of Arizona, pp.1-195.
- Reynolds, J., (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd., pp.423-424.
- Sam-Marcus, J., Enaworu, E., Rotimi, O. & Seteyeobot, I. (2018). A proposed solution to the determination of water saturation: using a modelled equation. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. & Sheriff, R.E. (1990) Resistivity Methods. In: Applied Geophysics, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 353-358.
- Universidad de Chile (2019). Antecedentes teóricos para registros geofísicos. Informe para MECESUP. [ebook] Disponible en: <u>http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/geo_mod0.pdf</u>. [Acceso 04 Jul. 2020].
- Velandia, F., (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga. Ph.D. Universidad Nacional de Colombia.
- Vélez Otálvaro, M. V. (1999). Hidráulica de aguas subterráneas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Walker, R. G. (1984). Facies Models. 2nd ed. Toronto: Geological Association of Canada.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz B., J., & Restrepo A., H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. Boletín Geológico, 21(1-3), 1-134.
- Ward, D.; Goldsmith, R.; U.S., Geological Survey; Jimeno, A.; Cruz, J.; Restrepo, A. & Gómez, E., (1977): Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga. INGEOMINAS.
- Waxman, MH., Smits, LJ. (1968) Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. In: Society of petroleum engineers 42nd annual fall meeting. Society of Petroleum Engineers, Houston, Texas, pp 107–122.
- Wilke BM. (2005) Determination of Chemical and Physical Soil Properties. In: Monitoring and Assessing Soil Bioremediation. Soil Biology, vol 5. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-28904-6_2