

Caracterización Geológica Y Geomorfológica Aplicada al Análisis de Estabilidad de Taludes del Corredor Vial Bucaramanga – Barrancabermeja, En el Sector Km 64+570 al Km 68+720.

Autor:

David José Afanador Quiñonez

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director:

Carlos Alberto Ríos Reyes
PhD en Geociencias Aplicadas

Co-Director:

Germán Alfonso Reyes
Geólogo MSc en geomorfología y riesgos

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

2018

Dedicatoria

“La cosa más hermosa que podemos experimentar es el misterio. Es la fuente de toda arte y toda ciencia”

-Albert Einstein.

A mis padres, a mi alma mater y a la Ciencia.

Agradecimientos

A la empresa Ingeoexploraciones y particularmente al geólogo Carlos Wandurraga por haberme facilitado la información geofísica disponible sobre la zona de estudio que me ayudo a complementar este trabajo. Así mismo al grupo de Geomática de la UIS por su colaboración para la adquisición de datos geoelectricos.

A mis directores de tesis, especialmente al profesor Germán por sus conocimientos, apoyo y orientación. ¡Gracias!

Tabla de Contenido

Introducción	17
1. Generalidades del Área de Estudio	19
1.1 Objetivos	19
1.1.1 Objetivos Generales	19
1.1.2 Objetivos Específicos	19
1.2 Localización	20
1.3 Antecedentes	21
1.3.1 Breve Resumen Histórico de la Vía Bucaramanga – Barrancabermeja	21
1.4 Metodología	23
1.4.1 Revisión Bibliográfica	23
1.4.2 Fase de Campo	23
1.4.2.1 Inventario de Estaciones y Caracterización del Macizo Rocosó	23
1.4.2.2 Levantamiento de Datos Geofísicos	24
1.4.3 Procesamiento de la Información de Campo y Elaboración del Libro	24
2. Marco Teórico	26
2.1 Movimientos En Masa	26
2.1.1 Tipos de Movimientos en masa	27
2.1.1.1 Caída (Fall)	27
2.1.1.2 Volcamiento (Toppling)	28
2.1.1.3 Deslizamientos	28

2.1.1.4 Propagación Lateral	30
2.1.1.5 Flujos	30
2.1.1.6 Reptación	31
2.2 Tomografía Eléctrica	32
3. Marco Geológico	34
3.1 Sismotectónica Norandina	34
3.2 Estratigrafía Subregional	36
3.2.1 Formación Girón	36
3.3.2 Miembro Órganos (Fm. Bucaramanga)	38
3.3 Geología Estructural	39
3.3.1 Sistemas de Fallas Locales	39
3.3.1.1 Falla del Suarez	39
3.3.1.2 Falla Río de Oro	40
3.4 Litoestratigrafía Local	41
3.4.1 Formación Girón	41
3.4.2 Miembro Órganos (Fm. Bucaramanga)	43
3.4.3 Depósitos de Cuaternarios	43
4. Geomorfología	46
4.1 Ubicación de la Zona de Estudio Según la Categorización Geomorfológica	46
4.1.1 Plataforma de Lebrija (Región Geomorfológica)	46
4.1.2 Escarpe de Palonegro/Cantalta (Unidad geomorfológica)	49
4.1.3 Subunidades Geomorfológicas.	49
4.2 Ambientes Morfogenéticos del Área de Estudio	50

4.3 Cartografía de Elementos Geomorfológicos	51
4.3.1 Geoformas De Origen Fluvial	51
4.3.2 Geoformas De Origen Denudacional	51
4.3.3 Geoformas Antropogénicas	53
4.4 Procesos Morfodinamicos	56
4.4.1 Inventario de Movimientos en Masa	57
4.4.1.1. Flujo de Detritos y Rocas	57
4.4.1.2 Movimiento en Masa complejo zona critica (reptación y flujos)	58
4.4.1.3 Caída de Rocas	58
4.4.1.4 Deslizamiento en cuña	59
5. Unidades Geológicas Superficiales (UGS)	60
5.1 Geología Para Ingeniería	60
5.2 Metodología utilizada para el Estudio de las UGS	61
5.2.1 Factores Considerados para Caracterizar las Unidades de Roca	62
5.2.1.1 Grado de Meteorización	63
5.2.1.2 Índice Geológico de Resistencia (G.S.I.)	65
5.2.1.3 Grado de fracturamiento o discontinuidades	66
5.2.2 Factores Considerados para Caracterizar las Unidades de Suelo	65
5.3 Nomenclatura de las UGS	66
5.4 Cartografía de Unidades Geológicas Superficiales (UGS)	67
5.4.1 Unidades de Roca Sedimentaria Dura	67
5.4.2 Unidades de Roca Sedimentaria Intermedia	68
5.4.3 Unidades de Roca Sedimentaria Blanda (Rb)	70

5.4.4 Unidades de Suelo Residual	72
5.4.5 Unidades de Suelo Transportado (St)	72
5.4.6 Unidades de Suelo Translocado (Str)	73
5.4.7 Unidades de Suelo Antrópico (Sa)	77
6. Zonas Homogéneas de Estabilidad	78
6.1 Tipos de Zonas Homogéneas de Estabilidad	78
7. Conclusiones	80
8. Recomendaciones	81
Referencias Bibliográficas	83

Lista de Tablas

Tabla 1. Antecedentes de MM sobre la vía Bucaramanga – Barrancabermeja	21
Tabla 2. Tipos y Subtipos de Movimientos en Masa	27
Tabla 3. Estratigrafía del Grupo Girón según Cediell (1968)	37
Tabla 4. Ubicación de la zona de estudio según la categorización geomorfológica	47
Tabla 5. Caracterización en campo de las unidades de roca y suelo	62
Tabla 6. Clasificación de las UGS en el área de estudio.	67

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del área de estudio. A) CC (Cordillera Central), EC (Cordillera Oriental), SB (Sistema de fallas de Bucaramanga), WC (Cordillera Occidental), Adaptado de Osorio (2016). B) MR (Mesa de Ruitoque), MS (Macizo de Santander), Mst (Mesa de los Santos). C) AB (Abanico de Bucaramanga), PL (Plataforma de Lebrija), en Amarillo (Eje vial desde el peaje al casco urbano de Girón), sombreado en rojo (zona de estudio).....	20
Figura 2. Noticias sobre la vía de estudio presentadas por vanguardialiberal.com (2016) y vanguardialiberal.com (2018). Consultadas el 26 de Abril de 2018.....	22
Figura 3. Esquema de la Metodología para la zonificación básica de la estabilidad de taludes y laderas a escala 1:5000.....	25
Figura 4. Esquema de la caída de rocas, tomado de: GEMMA (2007) b) Esquema de un deslizamiento de traslación. Modificado de Suarez (2009).....	29
Figura 5. Izquierda, movimiento de reptación. Modificado de Highland y Bobrowsky (2008). Derecha: Movimiento en masa complejo. Tomado de: Vargas Cuervo (2000).....	32
Figura 6. Configuración tectónica y estructuras mayores en los Andes del Norte y movimientos relativos de las placas con respecto a la placa Sudamericana. La flecha señala la zona de trabajo Adaptado de: Sarmiento, 2001.....	35
Figura 7. Cabalgamiento de la Falla del Río de Oro emplazando la Formación Girón sobre depósitos del miembro Órganos (Abanico de Bucaramanga). F.E (Flujo de Escombros provenientes de la Fm. Girón desagregada en la zona de falla), M.O (Miembro Órganos).....	41
Figura 8. Características litológicas de la formación Girón. Abajo Izquierda, meteorización esferoidal de areniscas de grano fino, E: AFA-2. Abajo Derecha, hidroclastismo de limolitas micáceas de color violáceo E: AFA-1.....	42
Figura 9. Depósito del Abanico (Miembro Órganos), altamente erosionado generando tierras malas, una característica de estos depósitos. 44	
Figura10. Mapa Geológico a escala 1:10000 (Documento visible en pdf en Apéndice C. Mapa Geológico).....	45
Figura 11. Ubicación y delimitación de la plataforma de Lebrija. <i>Arriba</i> , mapa de sombras generado a partir del DEM Alos Palsar, sombreado en Rosa la zona donde se realizó el mapa geológico. <i>Abajo</i> , Limites escarpados, al Sur el rio Sogamoso; Al W: Sinclinal de Nuevo Mundo; N: Rio Lebrija y E: Escarpe Palonegro/Cantalta asociado al Rio de Oro. Tomado de: Google Earth (2018).....	48
Figura 12. Escarpe de Palonegro/Cantalta, conocido localmente simplemente como escarpe de Palonegro, Resaltado en rojo, Trazo de la falla Suarez y en Amarillo, Vía de estudio. Tomado de: Google Earth (2018).....	49

Figura 13. Geformas del área de estudio. a) Laderas muy inclinadas. b) y c) Corona y cuerpos de movimiento en masa. d) Corte vertical de ladera, talud con alta amenaza. e) Deposito de detritos asociados a un deslizamiento rotacional en cuña. f) Laderas inclinadas y tierras malas.....	55
Figura 14. Perfil esquemático de una ladera y la relación entre la forma de la misma y los procesos generados en ella. Tomado y modificado de Delrymple y otros 1968 en Carvajal (2004).....	56
Figura 15. Flujo de detritos localizado 50m hacia el sur desde la estación AFA-9. a) Bloques y arenas lodosas transportados por el flujo. b) Canal de flujo, el flujo llega hasta la vía que se observa en parte superior derecha.....	57
Figura 16. Caídos y rodamiento de detritos, con bloques rocosos de hasta 1 m de diámetro, estación: AFA-5. Se evidencia obstrucción total de un carril como consecuencia. Imágenes tomadas de http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/galeria-118228-vea-el-derrumbe-que-ocasiono-el-cierre-de-una-calzada-de-la-via	58
Figura 17. Deslizamiento en rocas estratiformes de la Formación Girón. En la parte central se nota un cono detrítico, proveniente de los depósitos cuaternarios, hacia el tope. Ubicado en el Km 67 + 156, este deslizamiento se genera por la intersección del plano de estratificación (P.E) con un plano de discontinuidad (P.D), también se observan escalones de falla.....	59
Figura 18. Perfil general de meteorización para un material de origen sedimentario. Tomado de Suarez (1998).....	64
Figura 19. Factor G.S.I para macizos rocosos. Tomado de: Hoek et al (1998).....	65
Figura 20. a) y b) Afloramientos donde se presentan las unidades Ria 1 y Ril 1 con distinto control estructural, Estaciones AFA-9 y AFA-2 respectivamente. Rda (Roca dura de arenisca) que infrayace las limolitas. c) macizo rocoso parcialmente estable de la unidad Ria1. d) Rocas intermedias de limolitas afectadas por rodamiento de rocas.....	71
Figura 21. Suelo coluvial asociado a un deslizamiento traslacional. Unidad Strc4, en la estación AFA-3.....	76
Figura 22. Izquierda a) Depósito coluvial con obras ingenieriles de control insuficientes (gaviones). Derecha b) Depósito coluvial Sub-vertical con evidencias de planos de falla y altamente erosionado.....	77

Lista de Apéndices

Apéndice A. Modelo Geofísico 3D de la Estratigrafía Típica de la Zona.....	88
Apéndice B. Inventario de Movimientos en Masa.....	103

“Los demás apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS”

Apéndice C. Estaciones Geológicas: Caracterización del Macizo Rocoso, Caracterización de la masa de Suelo, análisis de discontinuidades y caracterización geomorfológica.

Apéndice D. Datos Geofísicos, Tomografía Eléctrica 2D.

Apéndice E. Mapas

Lista de Anexos

**“Los anexos están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca
UIS”**

Anexo 1. Datos Meteorológicos Suministrados por el IDEAM, Estación: Aeropuerto Palonegro.

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA APLICADA AL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES DEL CORREDOR VIAL BUCARAMANGA – BARRANCABERMEJA, EN EL SECTOR Km 64+570 AL Km 68+720.*

AUTOR: AFANADOR QUIÑONEZ, DAVID JOSE**

PALABRAS CLAVE: Movimientos En Masa, Geomorfología, deslizamientos, Tomografía Eléctrica.

Con el propósito de determinar las zonas homogéneas de estabilidad del corredor vial comprendido entre la salida del casco urbano de Girón y el peaje del Aeropuerto de Palonegro se realizó un estudio geológico y geomorfológico a escala 1:5.000 sobre una franja de 50m de ancho paralela al eje vial. Se estructuró una geodatabase de las estaciones geológicas, con la caracterización del macizo rocoso, un análisis de sistemas de fracturación y el inventario de movimientos en masa. Por otra parte se efectuaron y recopilieron métodos geofísicos disponibles sobre el área como tomografía eléctrica 2D y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV). La data fue tratada mediante los software, Earthimager y ArcGIS, a través de este último se generaron diferentes mapas temáticos, luego la delimitación de las laderas y taludes con mayor inestabilidad y finalmente a través de la información geoelectrica se realizó un modelo geofísico 3D de la estratigrafía típica de la zona.

La geología local está representada por los miembros medios de la Formación Girón, integrados por areniscas, areniscas conglomeráticas y limolitas intercaladas repetitivamente, estas rocas están cubiertas por 5 tipos de depósitos Cuaternarios coluviales. Por otra parte el área de estudio se encuentra dentro de la Región Geomorfológica: “Plataforma de Lebrija” y corresponde a la unidad del escarpe nororiental de dicha plataforma. Se asocian tres tipos de geoformas: denudativas principalmente, fluviales y antropogénicas, también se presentan de origen estructural sobre la zonas adyacentes al área de estudio. Así mismo se presentan movimientos en masa (MM) de tipo deslizamiento, flujos y rodamientos de rocas por gravedad. En definitiva la geomorfología abrupta de la zona es consecuencia del control estructural de la Falla del Suárez, que a su vez genera que los macizos rocosos tengan alta densidad de fracturamiento, siendo un factor contribuyente de las inestabilidades.

*Trabajo de grado

**Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes

ABSTRACT

TITLE: GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION APPLIED TO THE ANALYSIS OF STABILITY OF SLOPES OF THE ROAD CORRIDOR BUCARAMANGA - BARRANCABERMEJA, IN THE SECTOR Km 64 + 570 TO Km 68 + 720. *

AUTHOR: AFANADOR QUIÑONEZ, DAVID JOSE **

KEY WORDS: Mass Movements, Geomorphology, landslides, Electrical Tomography

In order to determine the homogeneous areas of stability of the road corridor between the exit of the urban area of Giron and the Palonegro Airport toll, a geological and geomorphological study was carried out at a scale of 1:5.000 on a 50m wide strip parallel to the road shaft. A geodatabase of the geological stations was structured, with the characterization of the rocky massif, an analysis of fracturing systems and the inventory of mass movements. Moreover, geophysical methods available on the area such as 2D electrical tomography and Vertical Electrical Soundings (VES) were performed and compiled. The data was treated by the software, Earthimager and ArcGIS, through the latter, different thematic maps were generated, then the delimitation of hillsides and slopes with greater instability and finally through geoelectrical information was made a 3D geophysical model of the typical stratigraphy of the area.

The local geology is represented by the middle members of the Giron formation, composed of sandstones, conglomerate sandstones and siltstones interspersed repeatedly, these rocks are within the Geomorphologic Region: "Lebrija platform" and corresponds to the unit of the northeast escarpment of the platform. Three types of geofoms are associated: denudative mainly, fluvial and anthropogenic, they are also presented of structural origin over the areas adjacent to the study area. Likewise, mass movements (MM) of sliding type are presented, flows and rock bearings by gravity. In short, the abrupt geomorphology of the area is a consequence of the structural control of the Suarez fault, which in turn makes the rocky massifs have a high fracturing density, being a contributing factor of the instabilities.

*Bachelor Thesis

**Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes

Introducción

Los movimientos en masa (MM) son fenómenos naturales asociados a los procesos geomorfológicos que moldean la superficie terrestre, estos ocurren cuando áreas susceptibles a este tipo de fenómenos por sus características geológicas, geomorfológicas, geomecánicas y del suelo son afectadas por la acción de la gravedad y otros factores como la meteorización, la erosión, intensas precipitaciones, los sismos y las actividades antrópicas. Por su parte, Colombia presenta múltiples eventos históricos que dan una idea del alcance destructivo de estos movimientos y gran parte de sus cascos urbanos son vulnerables a esta situación por su ubicación sobre las cordilleras en donde el alto gradiente de pendiente crea un contexto geomorfológico que favorece la ocurrencia de MM.

A primera vista los taludes y laderas presentes en el eje vial de estudio (Salida del casco urbano de Girón – Peaje del Aeropuerto Palonegro) se pueden considerar como estables, pero en realidad por su contexto geomorfológico, evolución geológica, obras de infraestructuras realizadas en los últimos años (ampliación de la vía a doble calzada) y MM registrados, se demuestra lo contrario. Considerando que esta vía tiene una gran importancia para el desarrollo de las actividades socio-económicas del área metropolitana de Bucaramanga y que es la única vía de acceso al Aeropuerto Internacional de Palonegro, es apremiante realizar una zonificación de la estabilidad de estas laderas y taludes.

En la zona de estudio se han realizado trabajos enfocados en determinar sus características geomecánicas y geotécnicas, dentro de los cuales se consideran trabajos de grado por parte de las escuelas de Geología e Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander (UIS) como los realizados por Duarte y Roa (2016); Estupiñán y Murcia (2013) y otros estudios tales como los

POT del municipio de Girón, sin embargo estos abordan las zonas rurales desde una escala muy general. Por lo tanto no se cuenta con un inventario de MM de la zona ni con estudio geotécnico detallado.

Por lo tanto, para hacer una gestión del riesgo es necesario contar con la zonificación de la estabilidad de los taludes, esta herramienta permitirá identificar y calcular la distribución de los sectores de mayor y menor riesgo, brindando de esta forma un punto de partida en la evaluación de las implicaciones socioeconómicas generadas por MM.

De modo que este estudio se enfocara en realizar una compilación de datos básicos para localizar en el espacio y tiempo un conjunto de MM y sintetizar sus principales rasgos de acuerdo con sus atributos de tipo geológico, geomorfológico, y de daño ambiental. De esta manera dar un aporte al conocimiento con una base de datos confiable para una futura evaluación de amenazas o riesgos.

1. Generalidades del Área de Estudio

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Llevar a cabo una caracterización geológica y geomorfológica del corredor vial Bucaramanga– Barrancabermeja en el sector comprendido entre el Km 64+570 al Km 68+720 para determinar las zonas homogéneas de estabilidad.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar el mapa geológico a escala 1:10.000 recopilando la información disponible y el control en campo efectuado.
- Efectuar y compilar los métodos geofísicos disponibles en el corredor vial y generar un modelo 3D de la estratificación típica en el subsuelo.
- Generar un mapa temático de geomorfología, abordando los elementos geomorfológicos y los procesos morfodinámicos, además de un inventario de movimientos en masa.
- Elaborar el mapa de unidades geológicas para ingeniería
- Elaborar un mapa de zonas homogéneas de estabilidad en base a la información de campo y los resultados obtenidos.

1.2 Localización

El área de estudio está ubicada entre las veredas Carrizal y Lagunetas del municipio de San Juan de Girón, el cual está ubicado a 7 kilómetros de Bucaramanga. Girón presenta una altitud de 777 metros sobre el nivel del mar. Su cabecera está localizada a los 07° 04' 15" de latitud norte y 73° 10' 23" de longitud oeste. (INGEOMINAS, 2007).

El eje vial, trazado en la Figura 1.C., se encuentra en el flanco oriental de la Cordillera Oriental Colombiana, entre las planchas 120-II-A-2 y 120-II-A-4 (1:10000) del IGAC y comprende la parte final de la vía troncal Barrancabermeja – Bucaramanga. El área de influencia está limitada por los escarpes de la meseta de Lebrija al occidente y al oriente por el cauce del río de Oro.

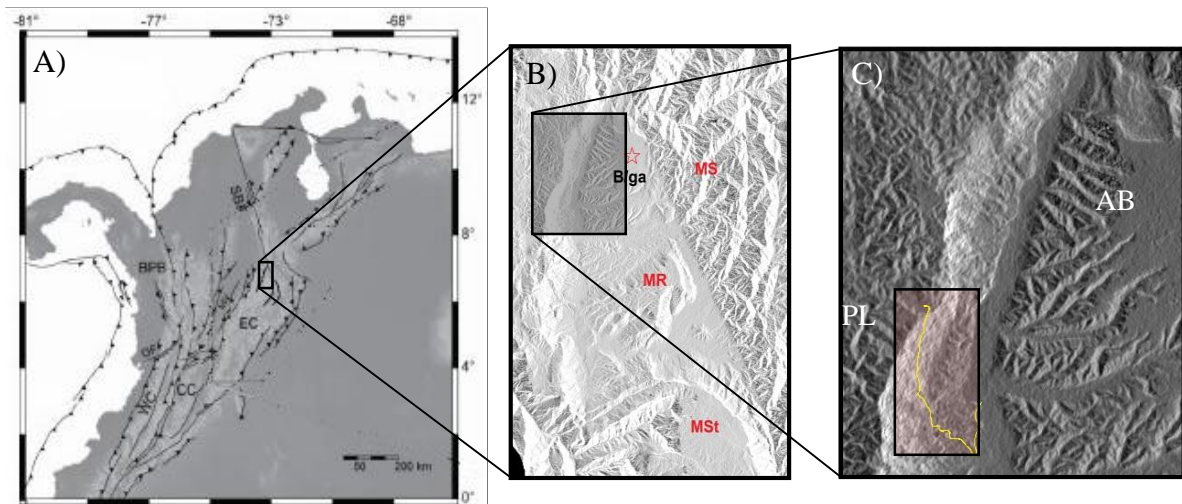


Figura 1. Localización del área de estudio. A) CC

(Cordillera Central), EC (Cordillera Oriental), SB (Sistema de fallas de Bucaramanga), WC (Cordillera Occidental), Adaptado de Osorio (2016). B) MR (Mesa de Ruitoque), MS (Macizo de Santander), Mst (Mesa de los Santos). C) AB (Abanico de Bucaramanga), PL (Plataforma de Lebrija), en Amarillo (Eje vial desde el peaje al casco urbano de Girón), sombreado en rojo (zona de estudio).

1.3 Antecedentes

1.3.1 Breve Resumen Histórico de la Vía Bucaramanga – Barrancabermeja: La vía de estudio es categorizada por INVIAS como de “Primer Orden” su código es el 6602, tramo: transversal Tribuga – Arauca, sector: Lebrija – Palenque. Es administrada actualmente por Idesan, su abscisado termina en el Km 72+690. A continuación se muestra la Tabla 1. Que describe sucintamente los principales eventos históricos ocurridos sobre la vía en orden cronológico.

Tabla 1. *Antecedentes de MM sobre la vía Bucaramanga - Barrancabermeja*

AÑO	EVENTO
1957	La vía inició su construcción entre Bucaramanga y Lebrija, con cuatro contratos entregados en dos años por la Gobernación de Santander, a: A. Niño, M. Blanco y P. Chinchilla y SIAC Ltda. Desde el principio los tramos fueron muy complicados y se presentaron problemas de todo tipo.
1961-1964:	Primeras inestabilidades graves en la carretera, según ETA Ltda. Por las lluvias se deslizan unos 2 km y se destruye totalmente el puente quebrada Mata de Cacao. Geólogos recomiendan abandonar otro tramo de 4 km y hacer nueva variante de 5 km por su parte baja, bordeando el coluvión de Caño Seco y hasta la q. Santa María. *
70's a 2000	La mayoría de los MM se presentan en el sector de la Leona (Km 33+475 al 34+930). Y en el tramo comprendido entre la Azufrada, La Renta hasta Capitancitos.
2005	Inciso de las obras de ampliación de la vía Girón – Lebrija de calzada sencilla a doble calzada por parte de la empresa GRODCO.
2011	Fuertes lluvias provocan deslizamientos sobre el Km 65+ 500, el deslizamiento tapa totalmente la calzada que comunica desde el Peaje de Lebrija hacia B/manga el 21 de agosto. *
2017	Época de fuertes lluvias originan el 21 de Junio, un flujo de detritos cuyo frente de bloques alcanza la carretera en el Km 67+200 sobre el intercambiador, obstruyendo el flujo vehicular por unas horas. *
2018	Flujo o rodamiento de detritos afecta la vía Peaje de Lebrija – Aeropuerto de Palonegro.

Nota: * Dentro del tramo vial de estudio. Complementado de Reyes (2016)

Actualmente la vía está relacionada con numerosas actividades por parte de los habitantes del área metropolitana de Bucaramanga, esencialmente como ruta para el transporte de personas y

mercancías con el municipio de Barrancabermeja. Por otra parte, conecta con la única vía de acceso al aeropuerto internacional de Palonegro. Cabe subrayar las siguientes noticias expuestas en la prensa regional Vanguardia Liberal, las cuales dan a conocer una amenaza latente sobre la vía y justifican una evaluación de las laderas y taludes que la componen.

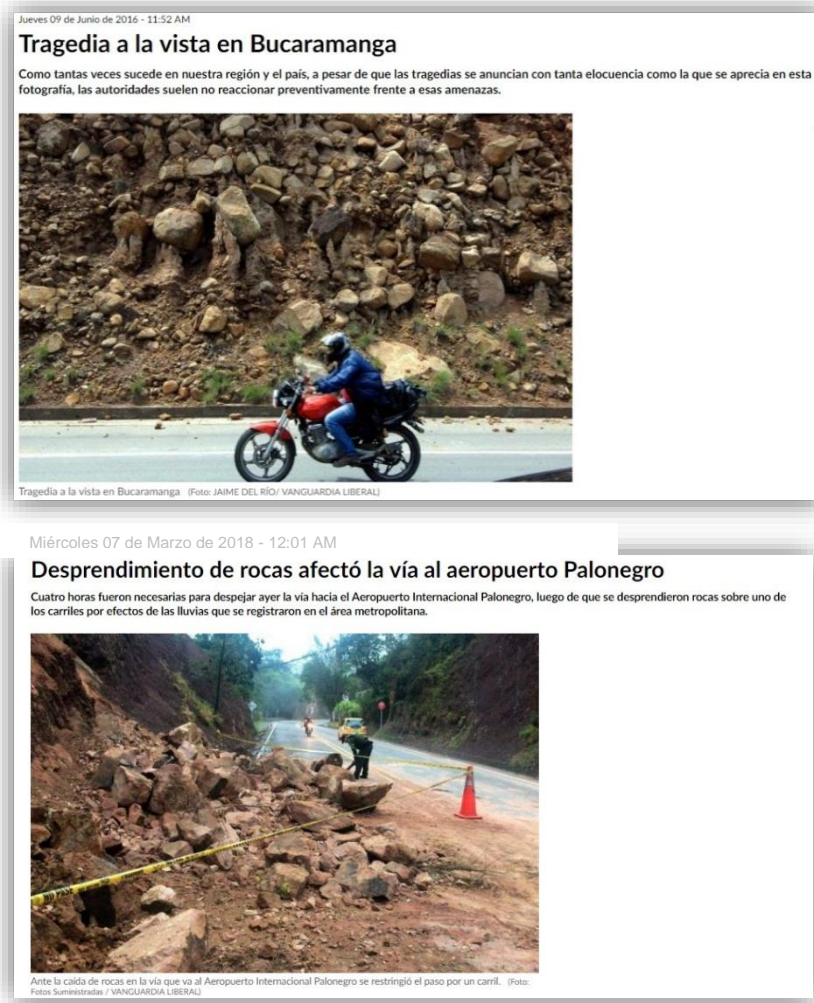


Figura 2. Noticias sobre la vía de estudio presentadas por vanguardiaoliberal.com (2016) y vanguardiaoliberal.com (2018). Consultadas el 26 de Abril de 2018. Ver referencia completa en la bibliografía.

1.4 Metodología

A continuación se describen las fases que se llevaron a cabo en el presente estudio con el fin de establecer en base a las propiedades geológicas, geotécnicas básicas y geomorfológicas, una delimitación de las zonas homogéneas de estabilidad de los taludes y laderas. Por último un modelo geofísico 3D de la estratigrafía típica del área de influencia de la zona de estudio.

1.4.1 Revisión Bibliográfica: La primera actividad realizada fue la recopilación de información existente en el área de estudio, entre los estudios recopilados en esta fase se encuentran: los trabajos de grado de Duarte y Roa (2016); Estupiñán y Murcia (2013) y los informes de INGEOMINAS (2007-2008). Se realizó también una recopilación de información existente en la CDMB, la Alcaldía municipal de Girón (P.O.T), la oficina regional del IDEAM sede Bucaramanga y otros documentos que alimentaron los insumos iniciales del trabajo.

1.4.2 Fase de Campo: Esta fase se puede dividir en dos: el control en campo de las UGI y los elementos geomorfológicos establecidos preliminarmente con imágenes satelitales y fotografías aéreas, junto con la generación de un inventario de estaciones. Y por otra parte la adquisición y recopilación de datos geofísicos (geoeléctricos) para la elaboración de un modelo geofísico de la estratigrafía típica de la zona.

1.4.2.1 Inventario de Estaciones y Caracterización del Macizo Rocoso: En esta fase se llevaron a cabo varias salidas de campo donde se caracterizaron las propiedades de las rocas y los suelos. Las tareas de campo fueron realizadas teniendo en cuenta las técnicas de campo de la

geología aplicada, empleando brújula, GPS, teodolito y otros elementos necesarios. Para la toma de datos geológicos y geomorfológicos se usaron los formatos disponibles en el apéndice A.

1.4.2.2 Levantamiento de Datos Geofísicos: Se realizó una campaña de adquisición de datos geoelectrónicos (tomografía 2D) con el fin de determinar un perfil estratigráfico del sector, fallamiento y contactos entre unidades estables e inestables. Para esto se utilizó el equipo SuperSting R8, del grupo de Geomática de la UIS. En el apéndice B. se describe ampliamente el proceso de recolección de datos, su interpretación y las conclusiones respectivas.

1.4.3 Procesamiento de la Información de Campo y Elaboración del Libro.

Con base en los trabajos de control de campo se realizaron los mapas de UGS, elementos geomorfológicos y un inventario de MM, posteriormente se realizó la delimitación de zonas homogéneas de estabilidad.

Por otra parte se trabajó a través del Software Arcgis la elaboración del modelo geofísico 3D de estratigrafía típica del Área. Finalmente se elaboró el libro de trabajo con las respectivas conclusiones y se plantearon recomendaciones sobre los sitios que presentaron mayor inestabilidad.

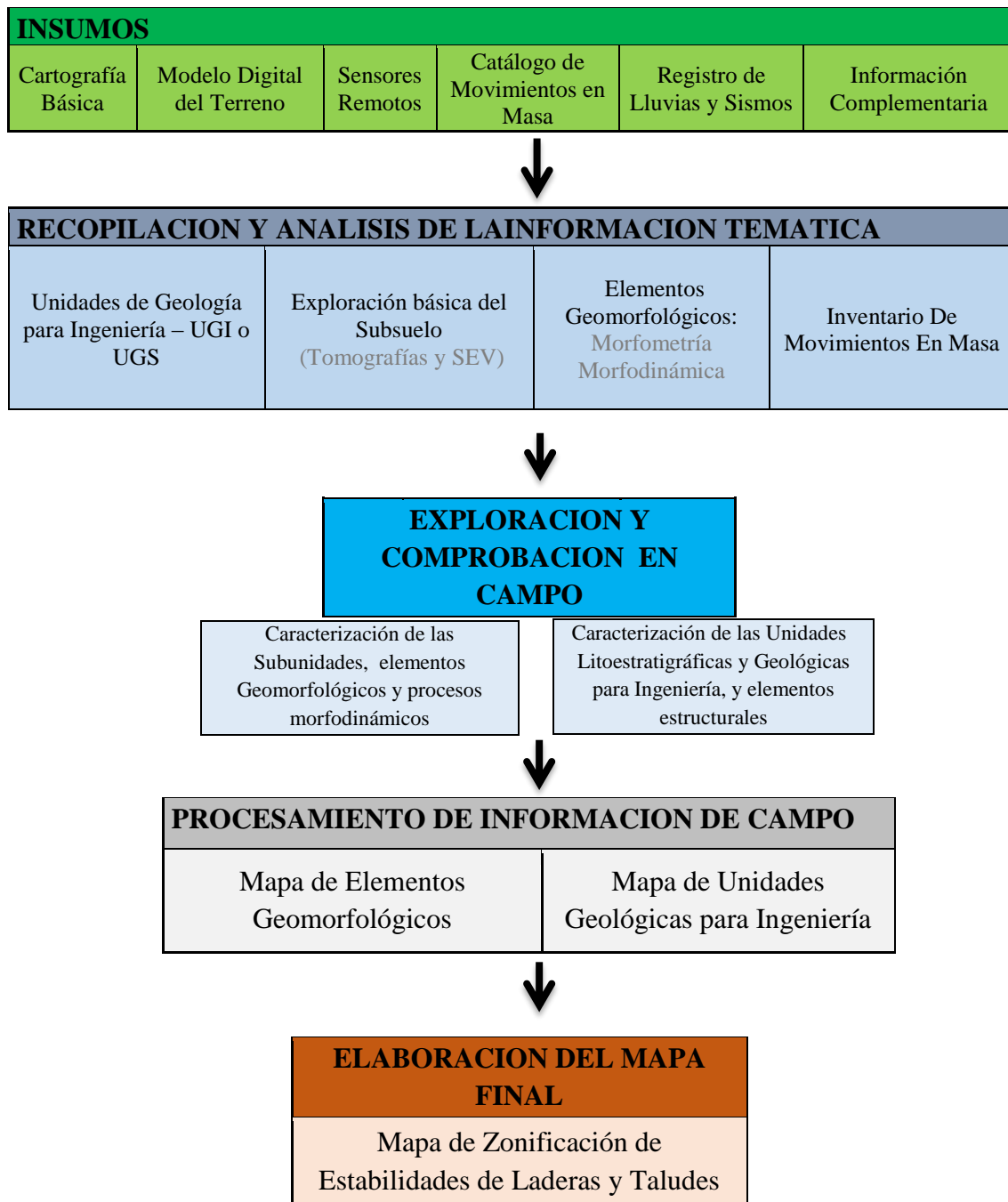


Figura 3. Esquema de la Metodología para la zonificación básica de la estabilidad de taludes y laderas a escala 1:5000.

2. Marco Teórico

Este capítulo se abordará de manera sucinta los principales conceptos y metodologías que se utilizarán en el desarrollo de este proyecto. En primer lugar se explicará el concepto de movimientos en masa (MM) y se expondrán sus diferentes tipos, usando entre otras, la excelente publicación del Proyecto Multinacional Andino (PMA, 2007) Conviene subrayar que estos conceptos serán ampliados y discutidos en los siguientes capítulos. Luego se expondrá el concepto de tomografía eléctrica.

2.1 Movimientos En Masa

El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo, de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Estos MM pueden ser lentos e incluso imperceptibles como la reptación, así como también, puede desarrollar una alta velocidad como los deslizamientos. A continuación se presentarán los principales tipos de movimientos en masa de una manera breve, conservando los conceptos más usados a nivel global.

Las clasificaciones de movimientos en masa de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988) son, hoy en día, los sistemas más ampliamente aceptados en el mundo de habla inglesa e hispana. Varnes (1958 y 1978) emplea como criterio principal en la clasificación, el tipo de movimiento y en segundo lugar, el tipo de material. Así, divide los movimientos en masa en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos. Además, divide los materiales en dos clases: rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y tierra. De esta manera, presenta definiciones para varias posibles combinaciones de tipo de movimiento y material. Abordaremos estos tipos de movimientos y también el concepto de reptación. A continuación, se presenta una

tabla con los tipos y subtipos de movimientos (Tabla 2), estos definidos según el tipo de material o velocidad.

Tabla 2. *Tipos y Subtipos de Movimientos en Masa*

Tipo	Subtipo
Caídas	Caída de rocas (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamiento de roca (bloque) Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)
Flujos	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (arena, limo, detritos, roca fracturada)
Reptación	Reptación de suelos Solifluxión gelifluxion (en permafrost)

Fuente: Modificado de PMA (2007)

2.1.1 Tipos de Movimientos en masa

2.1.1.1 Caída (Fall): La caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable (Figura 2a). Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento (Varnes, 1978). Dependiendo del material desprendido se habla de una caída de roca, o una caída de suelo.

Los mecanismos detonantes para este tipo de movimiento según Highland y Bobrowsky (2008) pueden ser: “el socavamiento de la pendiente por procesos naturales tales como arroyos y ríos o

intemperización diferencial, actividades humanas tales como la construcción o mantenimiento de carreteras o los sismos”.

2.1.1.2 Volcamiento (Toppling): Se denomina así a un tipo de movimiento en masa en el cual hay una rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior (Figura 2). Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978).

2.1.1.3 Deslizamientos: Un deslizamiento (Figura 2b) es el movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante (PMA, 2007). Generalmente son causados por intensas lluvias, sismicidad o una erosión intensa. Estos efectos incrementan el esfuerzo de cizalla o disminuyen en la resistencia de cizalla de los materiales que conforman el talud o ladera. Por su parte las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra, debido a que generalmente se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia tales como el relieve, la sismicidad, la meteorización y las fuertes lluvias (Suarez, 2009).

En el sistema de Varnes (1978), se clasifican los deslizamientos, según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material, en traslacionales y rotacionales. Los deslizamientos traslacionales a su vez pueden ser planares o en cuna. Sin embargo, las superficies de rotura de movimientos en masa son generalmente más complejas que las de los dos tipos anteriores, pues

pueden consistir de varios segmentos planares y curvos, caso en el cual se hablara de deslizamientos compuestos (Hutchinson, 1988)

- **Deslizamiento Traslacional:** Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. En general, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual o transportado que yace sobre ella (Cruden y Varnes, 1996).

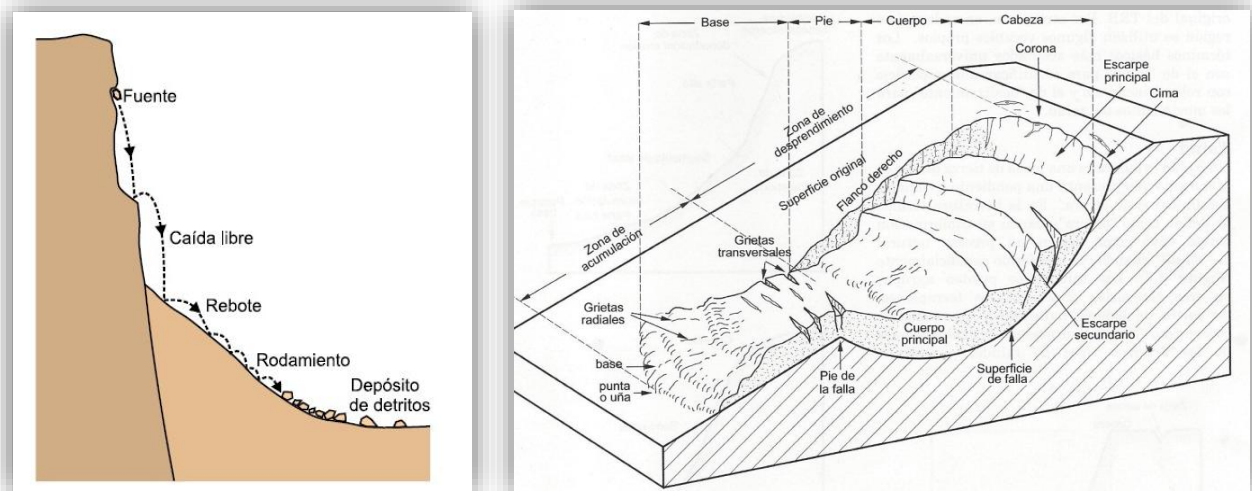


Figura 4. Esquema de la caída de rocas, tomado de: PMA (2007) **b)** Esquema de un deslizamiento de traslación. Modificado de Suarez (2009)

En los casos en que la traslación se realiza a través de un solo plano se denomina deslizamiento planar (Hoek y Bray, 1981). El deslizamiento en cuña (wedge slide), es un tipo de movimiento en el cual el cuerpo del deslizamiento está delimitado por dos planos de discontinuidad que se intersectan entre si e intersectan la cara de la ladera o talud, por lo que el cuerpo se desplaza bien siguiendo la dirección de la línea de intersección de ambos planos, o el buzamiento de uno de

ellos. Este tipo de deslizamiento se presenta en la zona de estudio y será ampliado en el apéndice B. Inventario de movimientos en masa.

- ***Deslizamiento Rotacional:*** Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava. Los movimientos en masa rotacionales muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal. (PMA, 2007).

2.1.1.4 Propagación Lateral: Se denomina propagación o extensión lateral a un tipo de movimiento de masa donde el desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material, las componentes del movimiento son principalmente laterales. Las propagaciones laterales pueden considerarse como la etapa final en una serie de movimientos donde la deformación interna predomina decididamente sobre otros mecanismos de desplazamiento como los que imperan en el deslizamiento o el flujo (PMA, 2007).

2.1.1.5 Flujos: Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978).

- ***Flujo de Detritos:*** Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (Índice de plasticidad menor al 5%), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Los materiales se van triturando por el mismo proceso del flujo y se observa una diferencia importante de tamaños entre la cabeza y el pie (o

cola) del movimiento (Hungry et al., 2001). Este tipo de movimiento fue registrado en la zona de estudio durante la realización del trabajo y será ampliado en el capítulo 8.4 inventario movimientos en masa.

- ***Crecida de detritos:*** Flujo muy rápido de una crecida de agua que transporta una gran carga de detritos a lo largo de un canal, usualmente también llamados flujos hiperconcentrados (Hungry et al., 2001). Es difícil distinguir entre un flujo de detritos y una crecida de detritos con base en la concentración de sedimentos, por lo que deben diferenciarse según el caudal pico observado o potencial. Las crecidas de detritos se caracterizan por caudales pico 2 o 3 veces mayores que el de una crecida de agua o inundación (PMA, 2007).

Este tipo de flujos torrenciales son similares a los desarrollados durante la tragedia originada por las lluvias de febrero de 2005 en Girón. Los valles aluviales de la mayoría de las microcuencas del área de Girón, incluyendo Las Papas, Valle de los Caballeros, Zamarcanda y La Fical, entre otras, fueron cubiertos por material proveniente de estos flujos, cuyos espesores en algunos casos superaron los 4 m (INGEOMINAS, 2007).

2.1.1.6 Reptación: La reptación se refiere a aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla. La reptación puede ser de tipo estacional, cuando se asocia a cambios climáticos o de humedad del terreno, y verdadera cuando hay un desplazamiento relativamente continuo en el tiempo. Se debe agregar, que la reptación de suelos y la soliflucción son importantes en la contribución a la formación de delgadas capas de suelo coluvial a lo largo de laderas de alta pendiente. Estas capas pueden ser subsecuentemente la fuente de deslizamientos de detritos superficiales y de avalanchas de detritos (PMA, 2007).

El mecanismo disparador en este caso es la precipitación pluvial, así como también pueden ser causados por la intemperización química o física, drenaje deficiente o diferentes tipos de construcciones desestabilizantes (Highland y Bobrowsky, 2008).

- **Movimientos complejos:** Por último se presentan los MM complejos, los cuales son producto de la presencia diferentes tipos de mecanismos de ruptura o de falla y la combinación de dos o más movimientos en masa.

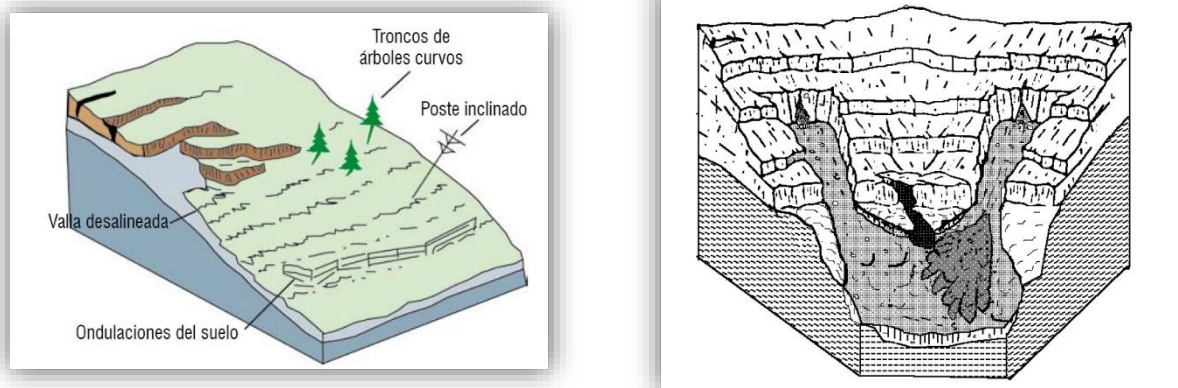


Figura 5. *Izquierda:* movimiento de reptación. Modificado de Highland y Bobrowsky (2008).

Derecha: Movimiento en masa complejo. Tomado de: Vargas Cuervo (2000).

2.2 Tomografía Eléctrica

Para la elaboración del presente estudio se utilizó también el método Geoeléctrico de prospección por Tomografía Eléctrica 2D, el cual consiste que desde la superficie se inyecta corriente eléctrica a través del subsuelo mediante un arreglo electródico especial para luego medir la diferencia de potencial entre puntos variables, observando los cambios drásticos en

resistividad y estableciendo las características estructurales, litológicas sin causar daños o problemas de inestabilidad en la superficie.

Esta metodología prospectiva técnica permite la determinación de los cambios litológicos lateralmente y en profundidad, aprovechando el contraste de la resistividad entre las diferentes formaciones litológicas. Este método se basa en que toda roca, como conductor de la corriente eléctrica, se le puede considerar como un agregado que consta de un esqueleto sólido mineral, de líquidos y de gases.

Los resultados obtenidos en la campaña de campo para la obtención de datos geofísicos (tomografía eléctrica 2D) y sus respectivas conclusiones se presentan en el apéndice B, además de un marco conceptual más amplio.

3. Marco Geológico

3.1 Sismotectónica Norandina

Los Andes del Norte en Colombia son una región tectónica compleja configurada por la interacción de la placa continental Sudamericana con las placas oceánicas Caribe y Nazca, además por la influencia que ejerce el Bloque Chocó (Taboada et al., 2000). Como resultado de esta unión triple se genera el comportamiento de un bloque móvil independiente que ha sido llamado Bloque de los Andes del Norte o Bloque Norandino (Kellogg & Vega, 1995 en Cortes et al., 2005; Cediél et al., 2003). El movimiento actual de este bloque con respecto a una placa Sudamericana fija es ESE (Sarmiento, 2001) (Figura 3).

El orógeno andino se divide en tres cordilleras al alcanzar el territorio colombiano: Cordillera Occidental, Cordillera Central y Cordillera Oriental, separadas por los valles de los ríos Cauca y Magdalena respectivamente. Cada una de estas cadenas montañosas tiene un origen distinto condicionado por la acreción de terrenos en el borde occidental continental (Toussaint, 1995; Cediél, 2003; Cortes, 2005).

Respecto a la Cordillera Oriental, es un orógeno divergente cuyos flancos se transportan tectónicamente hacia las cuencas que lo bordean (Valle del Magdalena al oeste y Cuenca de los Llanos al este) está compuesto principalmente por potentes secuencias sedimentarias Meso-Cenozoicas depositadas sobre basamentos ígneo-metamórficos Paleo-Mesozoicos que afloran en algunos sectores asociados a grandes fallas. La Cordillera Oriental tiene un rumbo general SW-NE, hasta un punto de inflexión, donde cambia de rumbo a SE-NW, ubicado en el Nevado el Cocuy, en este punto se encuentran las sucesiones sedimentarias Cretácicas de mayor espesor (Fabre, 1985 en Osorio, 2016). El cambio de rumbo en las estructuras puede ser atribuido a la

configuración estructural y estratigráfica de las antiguas cuencas extensionales que fueron sometidas a inversión tectónica (Tesón et al., 2013)

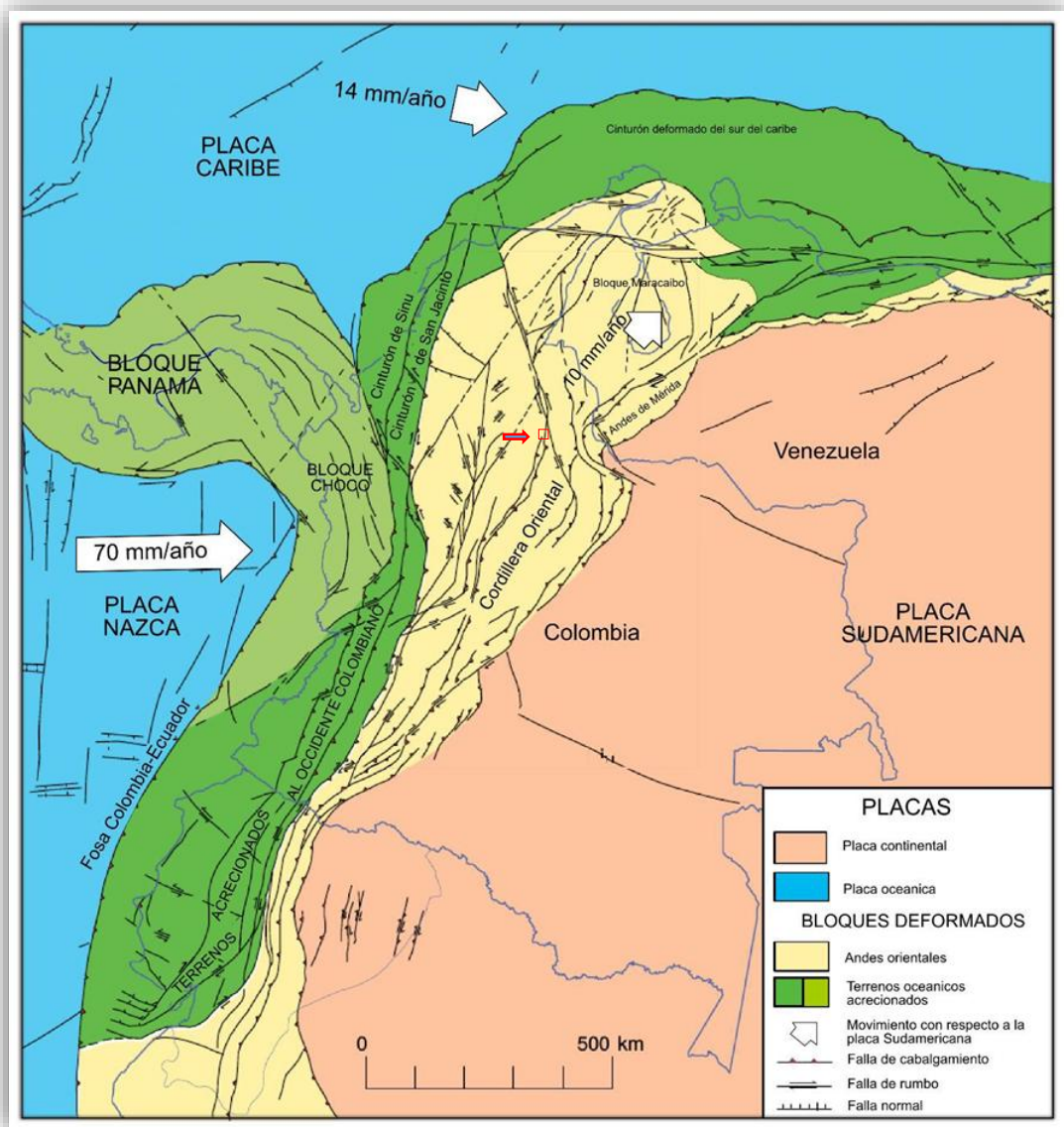


Figura 6. Configuración tectónica y estructuras mayores en los Andes del Norte y movimientos relativos de las placas con respecto a la placa Sudamericana. La flecha señala la zona de trabajo. Adaptado de: Sarmiento, 2001.

El territorio Santandereano es geológicamente complejo y tectónicamente dinámico, relacionado con las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Suramericana. Se caracteriza por presentar tres estilos estructurales: Uno, de fallamiento en bloques en la región oriental, otro de fallamiento inverso y plegamiento en la región central, y un tercero representado por el Graben del Magdalena en la región occidental (INGEOMINAS, 2007). Estas son regiones bien delimitadas por importantes rasgos tectónicos como los sistemas de fallas de Bucaramanga-Santa Marta, Suárez y de La Salina.

3.2 Estratigrafía Subregional

3.2.1 Formación Girón (*Jurásico Superior*): Royero y Clavijo (2001) resumen los principales estudios realizados sobre esta formación de esta forma:

Inicialmente el término “Girón Series” fue creado por Hettner (1892) para designar una mega secuencia aflorante al occidente de Bucaramanga en los alrededores de Girón, Santander. Posteriormente Langenheim (1959) fijó la sección tipo en la angostura del Río Lebrija y la dividió en tres miembros: uno inferior arenoso (750 m), uno intermedio lodoso (1.250 m) y otro superior arenoso (1.500 m) para un espesor total de 3.500 m. Así mismo uno de los estudios más detallados y completos es el de Cediél (1968), quien en la sección tipo del Río Lebrija, describió y midió un total de 4.650 m y lo dividió en ocho conjuntos litológicos (A-H) (Tabla 4), que corresponden a las formaciones Girón (Conjuntos A-G) y Los Santos (H).

La gruesa sección de la Formación Girón se extiende en una faja de dirección norte - noreste, al este y paralela a los afloramientos de las formaciones del Cretáceo y del terciario. Cediél (1968) concluye que el Grupo Girón es un depósito típico de molasa en el cual el tipo principal de roca es la sub-grawaca, según la clasificación de Pettijohn (1957).

A nivel general la Formación Girón está compuesta por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomerático, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, estratificación cruzada, en capas gruesas, con interestratificaciones de limolitas y lodolitas, de color rojo violeta, grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo hasta de 4 cm (Royero y Clavijo, 2001).

Tabla 3. Estratigrafía del Grupo Girón según Cediel (1968)

Conjunto	Espesor (m)	Descripción
A	610	Arenisca de grano grueso, conglomerática y lechos delgados de conglomerados de cuarzo con algunas intercalaciones de lentes lutíticos de color gris azulado.
B	590	Interestratificación de areniscas gris azulosas de grano medio a grueso con red beds, presencia de lutitas de color gris verdoso.
C	430	Areniscas de grano medio a grueso con estratificación cruzada, con frecuencia se encuentran capas de conglomerados de cuarzo.
D	650	Interestratificación de areniscas con red beds, en la parte superior se presentan conglomerados de cuarzo.
E	1040	Areniscas de color gris azulado grano medio, compactas que pasan lateral y verticalmente a lutitas y ocasionalmente arcillolitas, algunos restos de carbón.
F	250	Interestratificación de areniscas con red beds.
G	1080	Areniscas de grano grueso con estratificación cruzada, hacia el tope se presenta lechos de conglomerado.
H (Fm. Los Santos)	190	Areniscas de grano fino bien calibradas de color naranja claro con intercalaciones de bancos de color rojizo y red beds (Formación Los Santos).
Espesor total Grupo Girón: 4840 m.		

Nota: Los conjuntos C y D de este autor son correlacionables con los segmentos aflorantes de la Fm Girón en la vía evaluada. Modificado de Cediel (1968)

3.3.2 Miembro Órganos (Fm. Bucaramanga) (*pleistoceno medio*): Definido por Hubach (1951) es la unidad más potente de la formación Bucaramanga, estimándose que su espesor podría superar los 180 m. De acuerdo con Bueno y Solarte (1994), corresponde a una serie monótona de niveles polimícticos de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, con alternancia de capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura. Por su parte INGEOMINAS (2007) describe el Miembro Órganos de la siguiente manera:

Niveles de aspecto “conglomerático” que conforman depósitos de gravas y bloques, débilmente consolidados, clasto-soportados y grano soportados, dispuestos en forma de capas gruesas a muy gruesas, con espesores hasta de 15 m. El tamaño de los cantos varía entre 10 y 30 cm, alcanzando bloques mayores de 1 m de diámetro. Estos se componen en su mayoría de areniscas silíceas de grano medio, bien cementadas y en menor proporción de fragmentos de rocas ígneas ácidas de textura fanerítica, neis micáceos de color amarillo hasta rosado, areniscas lodosas rojizas de grano fino y alto contenido de micas, cuarzo lechoso, liditas y cherts. Todos los fragmentos tienen formas redondeadas a sub-redondeadas, esfericidad baja a media y mala selección. Los niveles gravosos presentan matriz arcillosa, pardo amarillenta, con algunas variaciones a gris amarillento. Los niveles finos corresponden a arcillas arenosas y arenas arcillosas. El ambiente de depositación de este miembro se relaciona con flujos de escombros y flujos torrenciales, e interdigitación de facies de corrientes de canal, correspondiendo a la parte proximal y media del Abanico de Bucaramanga. La edad del Miembro Órganos podría abarcar el Pleistoceno medio.

3.3 Geología Estructural

Desde el punto de vista tectónico, las rocas del Área Metropolitana de Bucaramanga y sus alrededores han estado sometidas a procesos endógenos muy intensos, cuyo origen está asociado con la evolución geológica de la cordillera Oriental de Colombia, originando principalmente, estructuras de falla que presentan actualmente desplazamientos de rumbo sinextral, como es el caso de los sistemas de Fallas Bucaramanga – Santa Marta y del Río Suárez, con orientaciones predominantes N 15° W y N 50° E, respectivamente. Esta actividad tectónica ha producido intenso fracturamiento en los macizos rocosos, con un incremento en las tasas de meteorización y erosión produciéndose depósitos de carácter coluvial y coluvio – aluvial. (INGEOMINAS, 2007).

La geología local está conformada por la Fm. Girón principalmente, Fm. Bucaramanga (miembro Órganos) y depósitos de ladera, coluviales o aluviales (Apéndice C. Mapa Geológico) (figura 4). Respecto al control tectónico local, se destacan la Falla Suarez y Rio de Oro, descritas a continuación:

3.3.1 Sistemas de Fallas Locales

3.3.1.1 Falla del Suarez: La Falla Suárez ha sido trazada sobre una distancia de 110 km desde el pueblo de la Paz en el Sur hasta el sector de Vijagual en el norte a unos pocos kilómetros de la ciudad de Bucaramanga, donde converge con la Falla Bucaramanga (INGEOMINAS, 2008). Esta falla corta las rocas sedimentarias del Jurásico y Cretácico, y los depósitos aluviales del Cuaternario que forman la “Terraza de Bucaramanga”. Presenta un rumbo promedio de $21.1^{\circ} \pm 8^{\circ}$ (N $21.1^{\circ}E \pm 8^{\circ}$), el sentido del movimiento es sinistral y presenta una inclinación promedio de $60^{\circ} - 90^{\circ}$. (Paris y Sarria, 1986; Paris y Romero, 1994). Al Occidente del pueblo de Girón, afecta capas de la Formación Girón, las cuales se pliegan por arrastre alcanzando posiciones verticales y en algunos

casos invertidos. En cercanías de la falla se observa un fuerte fracturamiento y un alto grado de meteorización de las rocas hasta el punto de llegarse a confundir con depósitos cuaternarios (Julivert, 1963).

El Sistema Falla Suárez consiste en realidad de dos ramales principales y localmente unos “splays” de menor importancia. El ramal occidental es la Falla Suárez propiamente dicha y ejerce el principal control sobre el escarpe. A poca distancia al Este, el otro ramal es conocido como *la Falla del Río de Oro* y tiene carácter de cabalgamiento sobre la mayor parte de su extensión (INGEOMINAS, 2008).

Julivert (1958) describe que cerca del contacto fallado, los depósitos del Abanico de Bucaramanga presentan discordancias progresivas, evidencia del sintectonismo de la deposición del Abanico con el movimiento de la falla. Un ejemplo de esto se observó en la zona de estudio sobre el tramo final donde se presentan depósitos del miembro Órganos que son suprayacidos por flujos de escombros originados de la Fm. Girón levantados por la acción reciente de la falla en contacto discordante (figura 5).

Cabe resaltar que el comportamiento de la Falla Suárez a través de la Formación Girón, la secuencia sedimentaria cretácica y el Abanico cuaternario, es muy homogéneo, siempre se ha observado un bloque colgante con estratificación sub-horizontal con estratos que buzcan hacia el W, mientras que el bloque yacente se presentan sub-verticales en general hacia el E o cuando se ha invertido la secuencia hacia el W, indicando la formación de un característico pliegue de arrastre que sugiere claramente la componente inversa principal de esta falla (INGEOMINAS, 2008).

3.3.1.2 Falla Río de Oro: INGEOMINAS (2008) describe esta falla de la siguiente manera: “La Falla del Río de Oro es una falla satelital o “splay” que se origina a poca profundidad en la Falla Suárez y tiene carácter de falla de cabalgamiento, superponiendo la Formación Girón sobre depósitos del Abanico de Bucaramanga. Su configuración cartográfica muestra salientes y bahías emergiendo de y regresando a la traza de la Falla Suárez. Desde Chocoa hacia el sur las dos fallas, Suárez y Río de

Oro se unen en un solo cabalgamiento, para luego continuar hacia el sur hasta el Río Sogamoso como una única Falla Suárez con carácter de falla inversa”.



Figura 7. Cabalgamiento de la Falla del Río de Oro emplazando la Formación Girón sobre depósitos del miembro Órganos (Abanico de Bucaramanga). F.E (Flujo de Escombros provenientes de la Fm. Girón desagregada en la zona de falla), M.O (Miembro Órganos).

3.4 Litoestratigrafía Local

A renglón seguido se describen las unidades litoestratigráficas que conforman el área de estudio, las cuales fueron un de los factores principales para caracterizar las Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI) (ítem 4.4).

3.4.1 Formación Girón: Intercalación repetitiva de capas de areniscas conglomeráticas, areniscas y limolitas de color violáceo (5 R 2/2) primordialmente, pero en algunos sectores puntuales se presenta con color verde amarillento (10 GY 6/4). Las areniscas presentan un calibre pobre a medio y la redondez de los granos es sub-angular a sub-redondeado. Mientras

que las limolitas presentan un buen calibrado y forma de los granos sub-redondeados. Los contactos entre las areniscas son netos, mientras que entre las areniscas y lodolitas son ondulosos. Capas correlacionables con los conjuntos C y D propuestos por Cediel (1968).

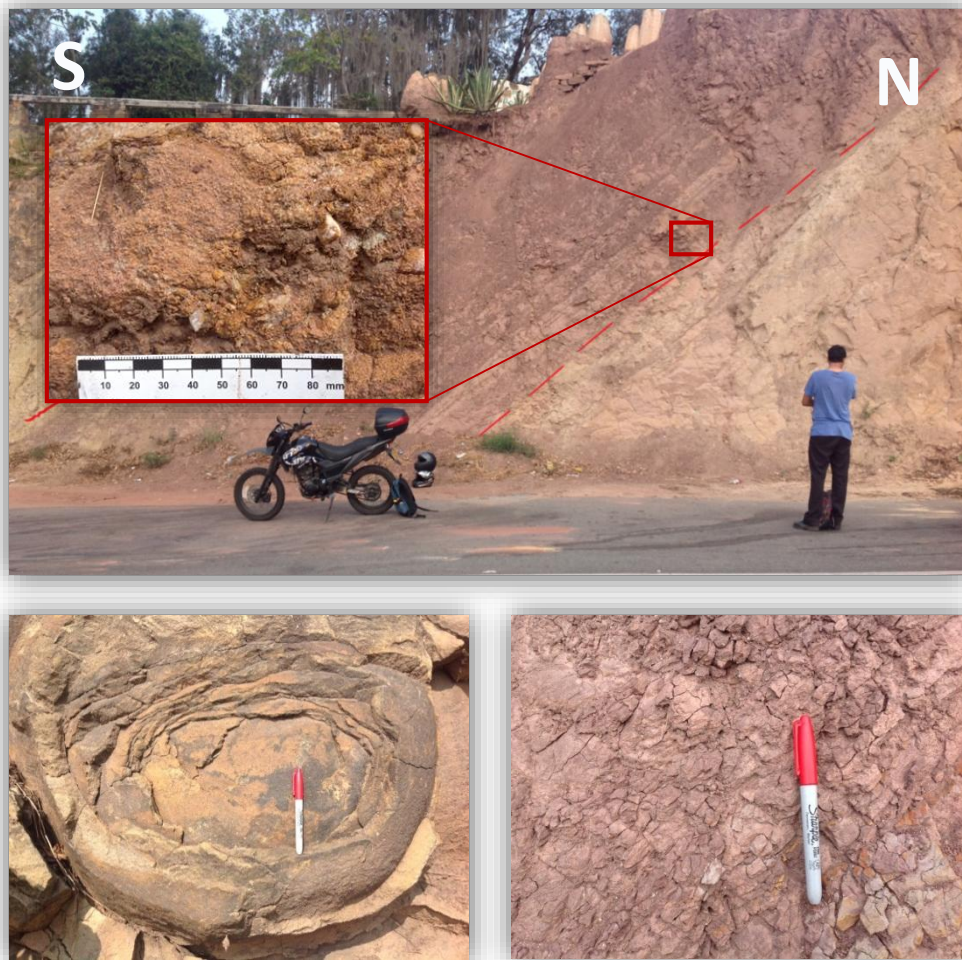


Figura 8. Características litológicas de la formación Girón. *Abajo Izquierda:* meteorización esferoidal de areniscas de grano fino, E: AFA-2. *Abajo Derecha:* hidroclastismo de limolitas micáceas de color violáceo E: AFA-1.

Otro rasgo de las rocas de arenisca en particular es la meteorización concéntrica que se presenta en la estación (AFA-2). Mientras que en las limolitas una característica de importancia es la erosión en hidroclastismo que se expone en la mayoría de los afloramientos donde se encuentra (ver figura 8).

3.4.2 Miembro Órganos (Fm. Bucaramanga): Depósito fluvio-torrencial matriz soportado compuesto en relación 60-40 %. Matriz limo-arcillosa de colores grises, pardos y rojizos en algunos sectores, por su naturaleza es un depósito altamente erodable, constituido por bloques y cantos sub-redondeados a redondeados de arenisca cuarzosa con menor proporción de micas y feldespatos, con presencia de fragmentos de limolitas rojas alteradas, cantos de cuarzo y conglomerados, mala selección.

Morfológicamente este miembro constituye valles en “V”, en la zona de estudio, sobre la ladera de la Mesa de Lebrija, esta unidad forma interfluvios de filos ondulados con crestas agudas ramificadas formando drenajes dendríticos. Debido a su susceptibilidad a la erosión pluvial se generan surcos, cárcavas y tierras malas (figura 9).

3.4.3 Depósitos de Cuaternarios: Estos depósitos son producto de la intensa fracturación y diaclasamiento de las rocas de areniscas y limolitas de la formación Girón, lo cual contribuye a su fácil desagregación. Los depósitos se encuentran lo largo de todo el escarpe, en algunos casos cubriendo el contacto fallado entre la Formación Girón y el miembro Órganos.

Como se mencionó anteriormente, en la zona se encontraron puntualmente depósitos coluviales provenientes de la F. Girón sobre suelos del miembro órganos, lo que implica una actividad cuaternaria de la falla del Suarez (figura 7).

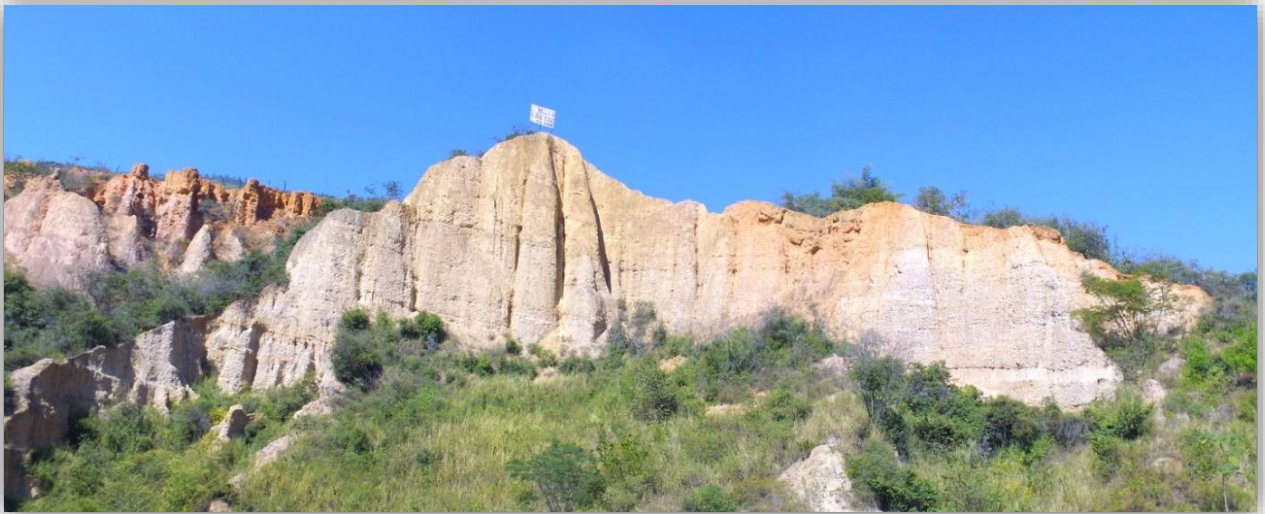


Figura 9. Depósito del Abanico (Miembro Órganos), altamente erosionado generando tierras malas, una característica de estos depósitos.

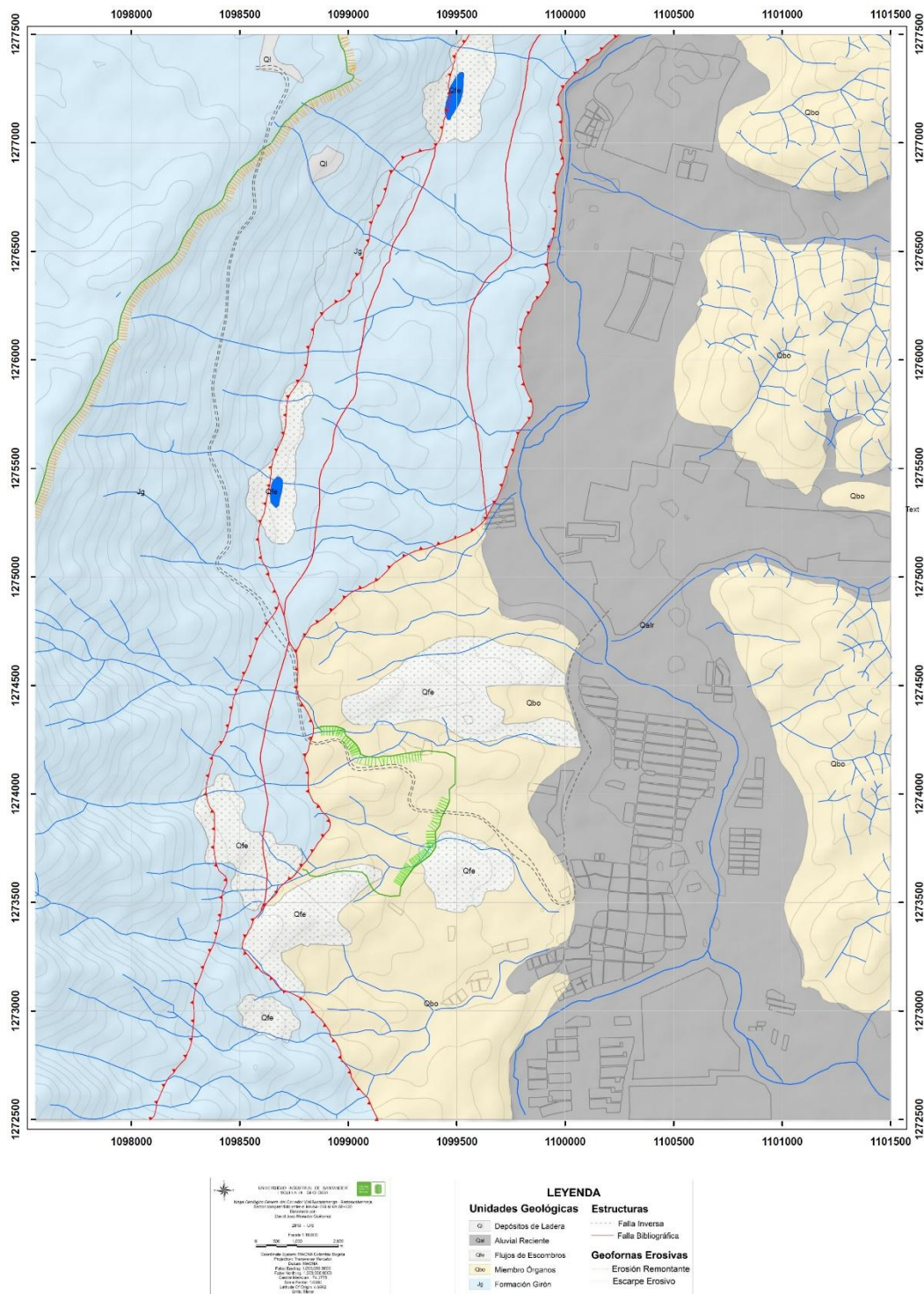


Figura10. Mapa Geológico a escala 1:10000 (Documento visible en pdf en Apéndice E. Mapa Geológico)

4. Geomorfología

El análisis geomorfológico propuesto en el presente estudio se basó en los trabajos de (Zuidam, 1986; INGEOMINAS y CDMB, 2002; Carvajal et al., 2004; INGEOMINAS, 2007, entre otros). El presente estudio realiza una descripción e interpretación geomorfológica a partir de imágenes de satélite y una recopilación de fotografías aéreas para luego confirmar y corregir los resultados con el análisis en campo.

Por su parte la interpretación de elementos se hace necesaria para estudios detallados a escala 1:5.000 a partir de la cual ciertos datos pueden ser usados para investigaciones geológicas más profundas (Paleosísmicas, hidrogeológicas, amenazas ambientales, entre otros) (INGEOMINAS, 2007).

4.1 Ubicación de la Zona de Estudio Según la Categorización Geomorfológica

La zona de estudio se encuentra dentro del relieve Andino Colombiano en su Cordillera Oriental (Figura 1), la cual fue descrita en el capítulo 4. A continuación se presenta la categorización geomorfológica para el área de estudio a partir de la categoría de Región.

4.1.1 Plataforma de Lebrija (*Región Geomorfológica*): Esta geoforma está dominada principalmente por la influencia de la Falla del Suarez al este y por el plegamiento regional al oeste (borde oriental del Sinclinal de Nuevo Mundo), en su parte central se desarrollan pliegues suaves en dirección NE-SW; asociados a la Falla del Suarez en el flanco oriental se encuentran una serie de plegamientos en dirección NW-SE que afectan a las formaciones Los Santos y Girón. El frente deformativo de la Falla del Suarez se caracteriza por desarrollar fallas de bajo ángulo

(Falla La Virgen, Falla Río de Oro) que afectan principalmente los depósitos cuaternarios a lo largo de la vía Girón – Zapatoca. (INGEOMINAS, 2008)

Tabla 4. *Ubicación de la Zona de Estudio Según la Categorización Geomorfológica*

Categoría	Escala	Descripción	Nombre
Zona Geoestructural	< 1:2.500.000	Grandes áreas que se caracterizan por estructuras topográficas y geológicas regionales	Relieve Andino Colombiano.
Provincia Geomorfológica	1:1'000.000 a 1:500.000	Conjunto de regiones con geoformas similares (mega geoformas)	Cordillera Oriental Colombiana
Región Geomorfológica	1:500.000 a 1:250.000	Geoformas relacionadas a la génesis de los paisajes y definidas por un marco de ambiente morfogenético	Plataforma de Lebrija
Unidad Geomorfológica	1:100.000 a 1:25.000	Elementos básicos que componen un paisaje, los cuales están definidos con criterio genético, morfológico y geométrico en función de la escala del proceso natural que los conformo.	Escarpe Palonegro/ Cantalta (particularmente Escarpe de Palonegro)
Subunidad Geomorfológica	1:25.000 a 1:10.000	Definida principalmente por contrastes morfométricos que relacionan la topografía del terreno y el tipo de roca, y los procesos dinámicos activos	Ladera denudacional y vertientes que componen el escarpe de la plataforma de Lebrija

Nota: Categorías Basadas en: Carvajal, 2012

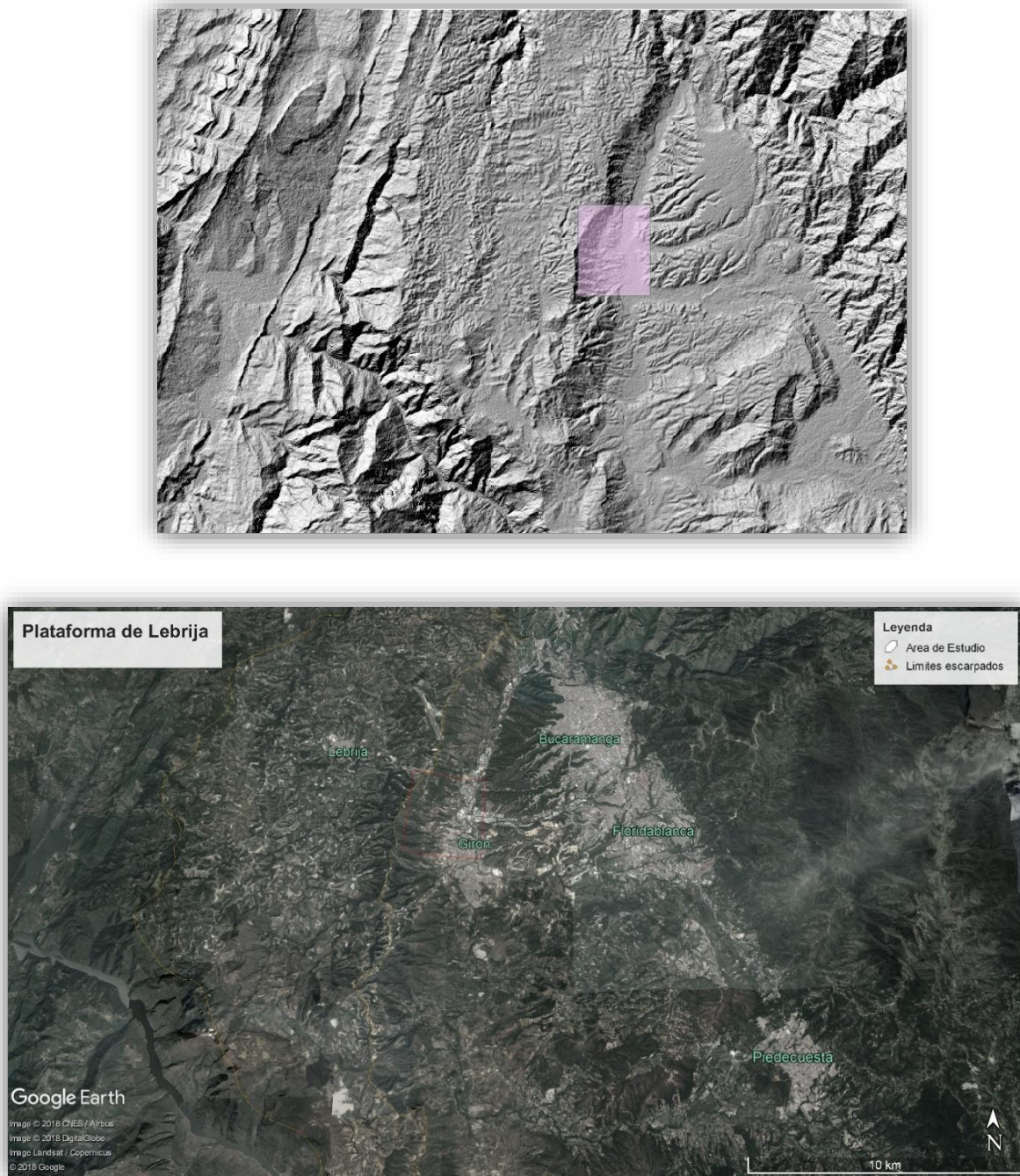


Figura 11. Ubicación y delimitación de la plataforma de Lebrija. *Arriba*, mapa de sombras generado a partir del DEM Alos Palsar, sombreado en Rosa la zona donde se realizó el mapa geológico. *Abajo*, Límites escarpados, al Sur el río Sogamoso; Al W: Sinclinal de Nuevo Mundo; N: Río Lebrija y E: Escarpe Palonegro/Cantalta asociado al Río de Oro. Tomado de: Google Earth (2018).

4.1.2 Escarpe de Palonegro/Cantalta (*Unidad geomorfológica*): Regionalmente es muy notoria la presencia del escarpe asociado con la Falla Suárez que en la zona de estudio se conoce como el escarpe de Palonegro. INGEOMINAS (2008) describe sus características así: “este varía en altura entre 450 m y 720 m sobre el actual nivel del Río de Oro y entre 270 m y 620 m respectivamente sobre el nivel superior de los depósitos del Abanico a su pie (INGEOMINAS, 2008).



Figura 12. Escarpe de Palonegro/Cantalta, conocido localmente simplemente como escarpe de Palonegro, Resaltado en rojo, Trazo de la falla Suarez y en Amarillo, Vía de estudio. Tomado de: Google Earth (2018).

4.1.3 Subunidades Geomorfológicas: A manera general el área de estudio se reconoció como una zona de laderas y vertientes, debido a los escarpes que la componen y al drenaje, el cual oscila entre dendrítico a subparalelo, según la escala en que se mire. Sin embargo se identificaron otros rasgos y geoformas que hacen parte de esta categoría de Subunidades las cuales son descritas a continuación.

- **Terraza o berma de fallamiento:** Se presenta como un escalón alargado en forma de terraza, de morfología alomada o colinada, limitada por escarpes de falla del sistema de fallas del Suárez.

El origen de esta geoforma se asocia a escalonamientos diferenciales desarrollados por procesos de fallamiento.

- **Terrazas erosivas:** Es una superficie plana a suavemente ondulada, limitada por la falla del río de Oro al occidente y la geoforma asociada al cauce del Río de Oro. Por lo tanto su origen está relacionado tanto con procesos tectónicos como a procesos de erosión fluvial. Dentro de esta subunidad se asocia una geoforma erosiva, erosión remontante, la cual afecta la parte final de la zona de estudio (zona Sur) incluyendo los barrios Paraíso Bajo y Alto.

- **Cuchilla de Palonegro:** Divisoria de aguas que marca el inicio del escarpe oriental de la mesa de Lebrija, cabe recordar que el área de estudio se encuentra en la parte norte de este escarpe. Además, la cuchilla se asocia a un escarpe erosivo (geoforma erosiva), debido a alta pendiente $40 - 70^\circ$.

4.2 Ambientes Morfogénicos del Área de Estudio

Los ambientes morfogénicos presentes en la zona son los siguientes:

- **Ambiente Denudacional:** determinado por la actividad dominante de procesos erosivos hídricos y de fenómenos de transposición o de remoción en masa sobre geoformas pre-existentes (Carvajal et al., 2004). Este tipo de ambiente es el de mayor predominio sobre la zona de estudio.

- **Ambiente Antropogénico:** Geoformas generadas por actividad humana con fines ingenieriles o urbanísticos, modificando la superficie natural del terreno. En este caso la construcción de una carretera y su posterior ampliación a doble calzada.

- **Ambiente Morfoestructural:** Corresponde a las geoformas generadas por la dinámica de la Tierra. Especialmente las asociadas a plegamientos y fallamientos (Carvajal et al., 2004). La zona

de estudio también presenta geoformas asociadas a la actividad tectónica reciente y que se ha extendido durante el cuaternario (Ambiente Neotectónico).

4.3 Cartografía de Elementos Geomorfológicos

Se refiere a las geoformas más detalladas del terreno según la categorización geomorfológica. Aplicada en este caso para conocer la inestabilidad de los taludes y laderas presentes en el área de estudio. Se elaboró un mapa de elementos geomorfológicos sobre el eje vial de la zona de estudio abarcando 50m a lado y lado de la carretera, a continuación se presentan las geoformas identificadas para esta categoría.

4.3.1 Geoformas De Origen Fluvial

- ***Cauce o Lecho Actual de Quebradas (Fca.):*** delimitada por las áreas donde circulan las quebradas o vertientes que se abren paso ladera abajo hasta encontrar el cauce del río de Oro. Según la época del año, debido a la intensidad de precipitación, estas geoformas pueden presentar pequeñas variaciones. Los barrios El Paraíso Bajo y Alto se encuentran en medio del cauce aluvial de la quebrada Macanas, como ya se mencionó en el anterior capítulo (UGI), este es un cauce activo, de aproximadamente 5 m de ancho, se encuentra canalizado en algunos sectores y varias viviendas se han construido a una distancia menor de 10 m.

4.3.2 Geoformas De Origen Denudacional

- ***Laderas subhorizontales (Dlh):*** Son superficies del terreno con inclinaciones muy suaves debido a algunos procesos denudacionales que han actuado sobre ellas. Sus pendientes son

menores al 10%. En algunos casos se han intervenido con el fin de explanarlas y utilizarlas como lugares de almacenamiento o depósito.

- **Escarpe Denudacional (Ded):** Es una ladera vertical o semi-vertical la cual presenta un ángulo de inclinación que sobrepasa los 70° , en este caso asociados a la cuchilla de Palonegro (divisoria de aguas de la mesa de Lebrija) o a fuertes procesos erosivos sobre depósitos coluviales o suelos asociados al Abanico de Bucaramanga.

- **Hondonadas paralelas (Dh):** Representadas por depresiones alargadas debido a corrientes de agua que causan una erosión profunda, las depresiones son paralelas a la pendiente. Las más importantes son la generada por la quebrada Macanas y la corriente de agua que atraviesa la vía en el Km 66 + 910.

- **Laderas muy inclinadas (Dlmi):** Superficies naturales del Terreno con inclinaciones entre 50° y 70° debido a procesos severos de tipo denudacional. Debido a su inclinación presentan menor cobertura vegetal que las zonas más planas y además, en algunos casos se asocian a erosión en cárcavas o surcos.

- **Laderas moderadas (Dlm):** Superficies naturales cuyas inclinaciones varía entre 10° a 30° , son principalmente pendientes onduladas y con buena cobertura vegetal en general, estas laderas se extienden por toda la zona de estudio, especialmente al margen oriental de la vía.

- **Depósitos de Tipo Coluvial (Dco):** Son las geformas asociadas a las UGI de tipo translocado de suelos coluviales (Strc). Son el resultado de la acumulación de materiales como suelo o fragmentos de roca transportados por gravedad o agua.

- **Laderas Inclinadas (Dli):** Superficies con inclinaciones entre 30° a 50° formadas por procesos denudacionales. Se presentan cerca de los cortes verticales de talud, en los escarpes de la mesa de Lebrija y sobre las inclinaciones asociadas al trazo de la falla del Suarez.

- ***Depósito o Cuerpo de Movimiento en Masa (Dmm)***: Acumulación de materiales de roca, suelo o una combinación de ambos como resultado de un movimiento en masa. Se presenta en los sitios con cercanía inmediata al trazo de la falla del Suarez y lugares con fuertes inclinaciones, relacionados con escarpes de corona.

- ***Flujo de detritos y lodo (Dfd)***: movimiento en masa que se presentó al costado derecho de la vía (costado occidental) sobre el Km 67+300. Flujo principalmente de detritos de un volumen pequeño, producido por corrientes superficiales en un cauce intermitente debido a una época de fuertes precipitaciones. Esta información se amplía en el capítulo 8.5 inventario de MM

- ***Tierras Malas (Dtm)***: Zonas afectadas por una fuerte erosión hídrica produciendo el desarrollo de cárcavas profundas (mayores a 1m) y estoraques, en estos sectores la cobertura vegetal es nula. Estas tierras malas se presentan al final de la zona de estudio sobre los suelos del miembro Órganos (Km 68+460 aprox).

- ***Laderas Erosionadas (Dle)***: Laderas con inclinaciones entre moderadas a muy inclinadas las cuales han sufrido procesos de erosivos como: erosión laminar y en surcos. Son bastante comunes en macizos rocosos compuestos por el miembro Órganos y en limolitas de la Fm. Girón, las cuales presentan además, hidroclastismo.

4.3.3 Geformas Antropogénicas: Incluye las geformas originadas como resultado de la intervención del hombre sobre el terreno, en la mayoría de los casos con el objetivo de realizar construcción de vivienda, obras de ingeniería, disposición escombros o adecuación de vías.

- ***Llenos de escombros (Alle)***: Se denomina así a la acumulación de residuos sólidos producto de construcción de obras civiles u otras actividades de construcción, los cuales son dispuestos

generalmente de forma caótica (no técnica). También son utilizados para acondicionar terrenos inclinados en superficies planas con el fin de construir viviendas.

- ***Corte Vertical de Ladera (Acv)***: Taludes cortados de forma vertical o subvertical con el objetivo de crear vías de acceso intermunicipales o locales, estos taludes presentan diferentes estabilidades según su pendiente y contexto geológico.

- ***Ladera Explanada (Ale)***: Geoforma asociada con los cortes verticales de ladera y/o materiales inconsolidados que han sido intervenidos con el propósito adecuar el terreno (explanarlo) para el desarrollo de obras de ingeniería o infraestructura donde generalmente los materiales resultantes del corte han sido dispuestos para llenar las zonas adyacentes, en este caso con el fin de construir la vía y más recientemente con el interés de ampliarla a doble calzada.

- ***Corte Vertical de Ladera (Critico) (Acvc)***: Elemento geomorfológico especial utilizado para definir el talud de alto riesgo presente en la estación AFA-5, este es un talud verticalizado compuesto por un depósito coluvial de un amplio espesor, asociado a la UGI (Strc4). La información sobre este afloramiento es ampliada en el apéndice de estaciones y en su UGI correspondiente.

- ***Laderas Terraceadas (Alt)***: Superficies modificadas por el hombre con fines de estabilización de taludes y laderas como es el caso de las laderas ubicadas al costado del retorno en el Km 67+300 y también con fines urbanísticos o ingenieriles.

En varios sectores sobre la base del escarpe de la mesa de Lebrija se han terraceado laderas con el fin de venderlas y construir barrios, lo cual implica generalmente que las laderas queden expuestas a erosiones severas lo que genera condiciones de inestabilidad altas.



Figura 13. Geoformas del área de estudio. a) Laderas muy inclinadas. b) y c) Corona y cuerpos de movimiento en masa. d) Corte vertical de ladera, talud con alta amenaza. e) Deposito de detritos asociados a un deslizamiento rotacional en cuña. f) Laderas inclinadas y tierras malas.

4.4 Procesos Morfodinámicos

El análisis geomorfodinámico de laderas, ver figura 13, es importante debido a que los materiales involucrados en estos procesos originan nuevas geoformas con propiedades del material diferente al original. Igualmente se modifican las propiedades físicas y mecánicas de los materiales ubicados cerca de las zonas afectadas.

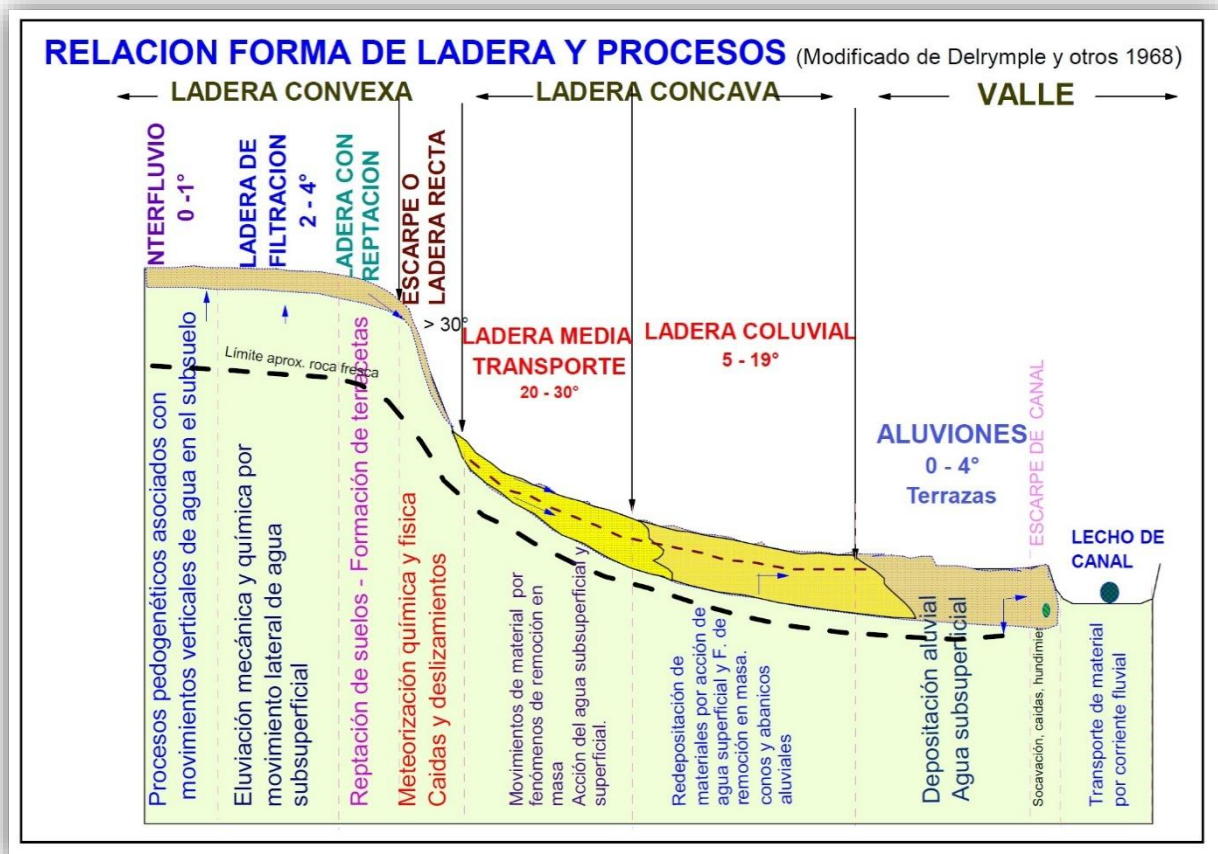


Figura 14. Perfil esquemático de una ladera y la relación entre la forma de la misma y los procesos generados en ella. Tomado y modificado de Delrymple y otros 1968 en Carvajal (2004).

• **Procesos Erosivos:** La zona de estudio presenta taludes y laderas con erosión hídrica laminar, cárcavas y surcos. La severidad de la erosión está relacionada con el tipo de material afectado y la morfometría de la ladera o talud. Por otra parte cabe destacar la erosión en hidroclastismo que presentan sobre buena parte de la vía los afloramientos compuestos por limolitas. (Ver figura 12-**b, d y e**)

4.4.1 Inventario de Movimientos en Masa

A continuación se presentan sucintamente los MM identificados en el área de estudio; el formato utilizado para caracterizarlo y una ampliación de estos movimientos se encuentran en el Apéndice B, al final del libro. Además el mapa de elementos geomorfológicos muestra su ubicación (apéndice F. Mapa Geomorfológico)

4.4.4.1. Flujo de Detritos y Rocas: Asociados a una época de evento torrencial generado por una época de fuerte precipitación que provocó el flujo de detritos saturados con grandes bloques individuales de hasta 1 metro de diámetro, sobre un canal o cauce intermitente. El frente de bloques alcanzó el tramo vial, obstruyendo la vía por unas horas.



Figura 15. Flujo de detritos localizado 50m hacia el sur desde la estación AFA-9. **a)** Bloques y arenas lodosas transportadas por el flujo. **b)** Canal de flujo, el flujo llegó hasta la vía que se observa en parte superior derecha.

4.4.1.2 Movimiento en Masa complejo (reptación y flujos)

En agosto de 2011 se presentó un rodamiento y caída de rocas por gravedad asociado a avalancha de detritos y rocas (debido a la presencia de rocas altamente fracturadas). Esto debido a una temporada de fuertes precipitaciones que saturó el depósito coluvial ubicado en este sector, el cual según los estudios geofísicos hechos en esta zona puede llegar a tener un espesor de 5 a 20m (anexo 2. Tomografía 1). Esta zona también presenta evidencia de sufrir reptación. (Para ampliación de los antecedentes se remite al lector a la noticia en la página web de vanguardia liberal, el link adjunto a la figura 16)



Figura16. Caídos y rodamiento de detritos, con bloques rocosos de hasta 1 m de diámetro, estación: AFA-5. Se evidencia obstrucción total de un carril como consecuencia. Imágenes tomadas de <http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/galeria-118228-vea-el-derrumbe-que-ocasiono-el-cierre-de-una-calzada-de-la-via>

4.4.1.3 Caída de Rocas: Caída de bloques y detritos que se desprenden de la ladera. Estas rocas son altamente fragmentadas; este movimiento también puede ser asociado a la erosión

diferenciada entre capas competentes sobre capas incompetentes. Sobre la base se acumula un depósito de detritos.

4.4.1.4 Deslizamiento en cuña: Movimiento limitado por dos planos de discontinuidad, uno es un plano estructural de familias de diaclasas y el otro es el plano de estratificación que también tiene un plano de diaclasamiento con rumbos y buzamientos similares (Figura 17). Esta zona se encuentra sobre el trazo de la falla del Suarez en los mapas establecidos en el anexo C. Esto es concordante con las evidencias presentes como: escalones de falla sobre la parte superior de un flanco del deslizamiento, planos de falla y es probable que la influencia de la falla sea la causa del levantamiento de la carpeta asfáltica unos metros delante de la estación 9.

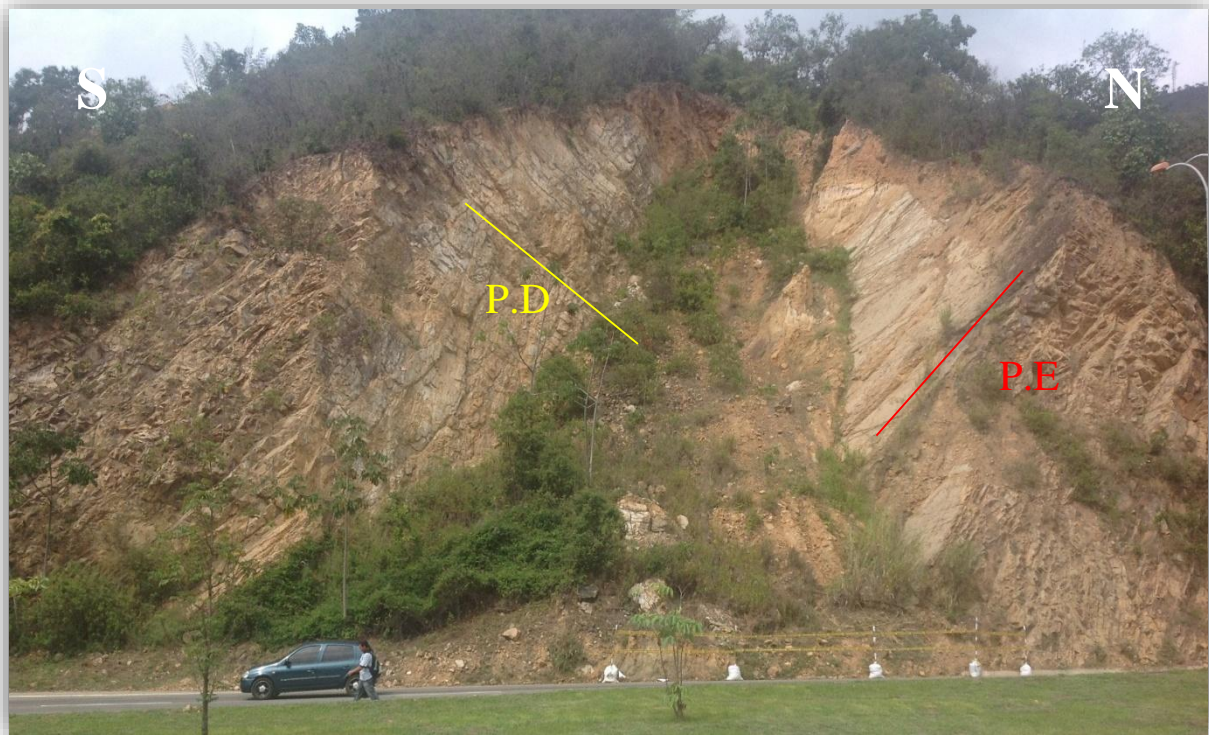


Figura 17. Deslizamiento en rocas estratiformes de la Formación Girón. En la parte central se nota un cono detrítico, proveniente de los depósitos cuaternarios, hacia el tope. Ubicado en el Km 67 + 156, este deslizamiento se genera por la intersección del plano de estratificación (P.E) con un plano de discontinuidad (P.D), también se observan escalones de falla.

5. Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

Deseo dejar claro en primer lugar que estas unidades se establecieron siguiendo la metodología planteada por la SGC (2015) para Unidades Geológicas para Ingeniería. Sin embargo debido a que las dimensiones estrechas del área de trabajo no permitían cartografiar las áreas mínimas requeridas para una UGI a la escala utilizada, estas unidades se denominaron como UGS.

5.1 Geología Para Ingeniería

De acuerdo con la guía metodológica para elaboración de mapas de geología para ingeniería del SGC (2015) un mapa de geología para ingeniería es: “Un tipo de mapa geológico que muestra información sobre la distribución y propiedades físicas y mecánicas de las rocas y los suelos, el agua subterránea, las características del relieve y los procesos geodinámicas actuales, que son considerados los componentes básicos del ambiente geológico, de suma importancia en estudios de geología aplicada a la ingeniería”

Las Unidades Geológicas Superficiales del área de estudio corresponden a zonas que presentan un alto grado de homogeneidad con respecto a las propiedades geológicas, geomorfológicas, y geomecánicas y con base en la caracterización de las Unidades Litoestratigráficas descritas en el capítulo 3.4. Este mapa es necesario para el posterior análisis amenazas y, si fuera el caso de requerir un análisis de susceptibilidad por movimientos en masa o gestión del riesgo.

5.2 Metodología utilizada para el Estudio de las UGS

Las siguientes son las actividades realizadas para estudiar las Unidades Geológicas Superficiales

- **Recopilación de la información:** Se consultaron las entidades nacionales, metropolitanas y los trabajos de grado de la universidad UIS para coleccionar la información disponible en cuanto a cartografía geológica, geomorfología, topografía, hidrogeología, imágenes de satélite y exploración del subsuelo.

- **Revisión de imágenes de satélite del área de estudio,** realizándose una interpretación preliminar para determinar las formaciones geológicas, unidades de roca, procesos geomorfológicos (morfodinámicos), suelos residuales y transportados y rasgos estructurales, entre otros.

- **Verificación, reconocimiento y ajuste de la información geológica mediante trabajo de campo;** descripción de las unidades litoestratigráficas (ítem 3.4) y cartografía de las unidades geológicas superficiales; caracterización de los elementos estructurales como son las fallas, pliegues, discontinuidades menores, entre otros (ver Tabla 5).

- **Evaluación y procesamiento de la información de campo,** elaboración de mapas y bases de datos geológicos.

- **Redacción de la memoria técnica explicativa.**

5.2.1 Factores Considerados para Caracterizar las Unidades de Roca: En la cartografía geológica para ingeniería, la clasificación de rocas y suelos está basada en las propiedades físicas de dichos materiales y en su estado actual dependiendo de la combinación de factores como el origen, la diagénesis, la historia tectónica, el metamorfismo y los procesos de meteorización, los

cuales gobiernan el comportamiento mecánico de los materiales (resistencia, deformabilidad, durabilidad, y permeabilidad, entre otros) (INGEOMINAS, 2007). Para la descripción y caracterización de las Unidades Geológicas Superficiales, se tuvieron en cuenta:

Tabla 5. *Caracterización en campo de las unidades de roca y suelo.*

MATERIAL GEOLÓGICO		PROPIEDADES (DESCRIPCIÓN DE CAMPO)
ROCAS		
	Masa Rocosa	Rasgos estructurales Perfil de meteorización Discontinuidades Litología Color
	Material Rocoso	Grado de meteorización Resistencia Textura – fabrica Tamaño y forma del grano
SUELOS		
	Masa de suelo	Textura y composición Perfil del suelo Humedad natural Permeabilidad cualitativa Estructuras
Material de suelo	Clastos	Tipo Color Forma Redondez Orientación Grado de meteorización
	Matriz	Color Granulometría Resistencia (cualitativa)

Nota: Caracterización basada en la propuesta de la SGC, 2015

5.2.1.1 Grado de Meteorización: Es uno de los aspectos importantes en la caracterización de las unidades superficiales, se define como la descomposición física y química *In situ* de los materiales cercanos a la superficie de la tierra. Infiuye en la formación de los suelos residuales, estabilidad de las laderas y en la acción de los procesos erosivos, al igual que sobre las propiedades físico–mecánicas de las rocas tales como densidad, esfuerzo a la comprensión inconfiada, esfuerzo a la tensión inconfiada, porosidad, permeabilidad, deformabilidad y consistencia. Para definir el grado de meteorización de las rocas se utilizaron los perfiles generalizados de Suarez (1998) (Figura 8) y Deere y Patton (1971).

5.2.1.2 Índice Geológico de Resistencia (G.S.I.): Corresponde a un parámetro de evaluación de la resistencia de la masa rocosa, que evalúa la calidad del macizo rocoso en función del grado y características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades. La determinación del G.S.I. permite calificar el macizo rocoso entre 0 y 100, dependiendo de la variación del entrabamiento y la calidad de la roca en la superficie (Figura 10). Esta calificación de Hoek et al (1998) permitió dividir las unidades de roca en 3 grandes grupos: Rocas duras, intermedias y blandas según fueran, buenas a muy buenas, moderadas o pobres a muy pobres, respectivamente. (Ver Figura 9)

5.2.1.3 Grado de fracturamiento o discontinuidades: Se definen como planos o fracturas de origen mecánico o sedimentario que independizan o separan bloques de roca. Se muestra una de las clasificaciones del grado de fracturamiento tenida en cuenta en el estudio de las discontinuidades (INGEOMINAS, 2007). Para la caracterización de las discontinuidades se tuvieron en cuenta parámetros geométricos como: Orientación, espaciamiento, persistencia,

rugosidad, abertura, relleno, presencia de agua y número de familias de diaclasas (Ver apéndice.

A.)

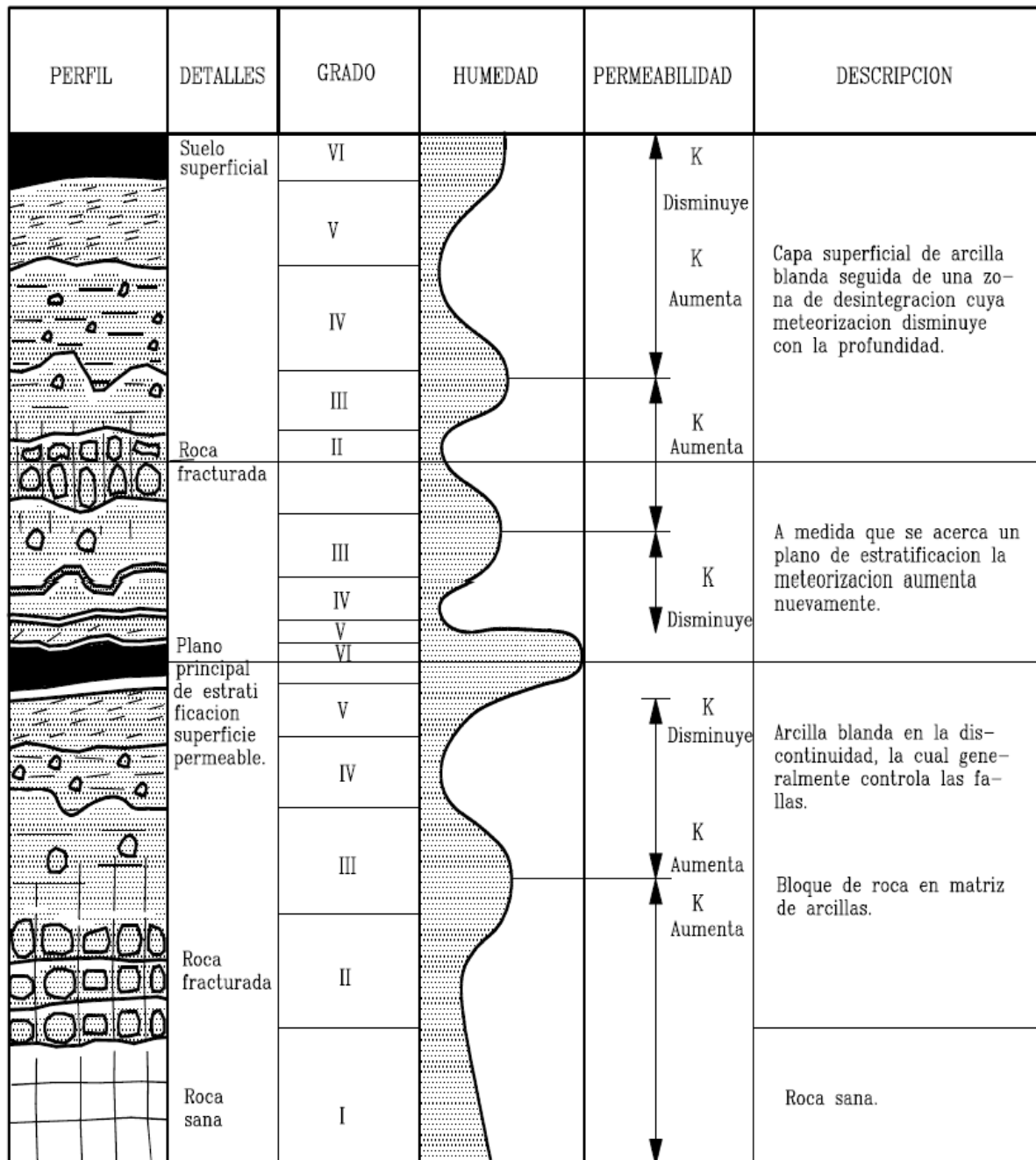


Figura 18. Perfil general de meteorización para un material de origen sedimentario. Tomado de Suarez (1998).

Geological Streng Index (G.S.I)



Estimativo del Índice de Resistencia de la masa rocosa IRMR (GSI - Geological strength Index), basado en descripciones geológicas.

Figura 19. Factor G.S.I para macizos rocosos. Tomado de: Hoek et al (1998)

5.2.2 Factores Considerados para Caracterizar las Unidades de Suelo: Se definen como suelos aquellos materiales sueltos o inconsolidados, compuestos de una mezcla de materia orgánica, fragmentos de roca, arcilla y minerales, producto de la descomposición in situ del material rocoso o de sedimentos transportados por diferentes medios. Se consideran materiales

que se pueden excavar fácilmente por métodos manuales y se clasifican como suelos residuales (horizonte VI del perfil de meteorización de Dearman, 1995) y transportados (depósitos de gravedad-coluvial y aluviales, entre otros) (SGC, 2015).

En la cartografía geológica para ingeniería se consideran como suelos los materiales granulares cementados o no cementados (arena, limo, grava y bloques) y arcillas plásticas cohesivas y la combinación de estos dos tipos. (INGEOMINAS, 2007). En el presente trabajo se agruparon los suelos de acuerdo con su origen en residuales, transportados y translocados, y, antrópicos (ver Tabla 5). Los principales factores que se analizaron para caracterizar y evaluar los materiales del suelo fueron: Composición litológica y mineralógica, color, tamaño y forma de los granos (textura), consistencia y estructuras.

5.3 Nomenclatura de las UGS

Una vez establecidas las UGS, identificadas por su origen y litología, se establece su nomenclatura. El sistema de nomenclatura sigue la propuesta de la guía metodológica para amenazas por movimientos en masa de la SGC (2015) y es el siguiente:

- La primera letra, en mayúscula, indica si es roca (R) o suelo (S).
- Si es roca (R), la segunda letra, en minúscula, indica su calidad, según sus características de resistencia cualitativa, grado de meteorización y el diaclasamiento, entre otras, la cual se ajustara según la caracterización realizada cuantitativamente, que se denomina dura (d), intermedia (i) y blanda
- La cuarta letra indica la textura o tamaño de grano del material
- Si es suelo (S), la segunda letra indicara el origen: transportado (t), residual (r), translocado (tr) o antrópico (a).

- Se pueden agregar al nombre otras letras que indiquen las características u origen del material.

En la tabla 5 se presentan las nueve UGS identificadas, utilizando variables geológicas y geomecánicas ya indicadas (véase ítem 3.4 y tabla 4).

Tabla 6. Clasificación de las UGS en el área de estudio.

TIPO DE MATERIAL	UNIDADES	ORIGEN	TIPO DE UGS	UGS IDENTIFICADAS
Rocas (R)	Dura (Rd)	Derivados de roca <i>in situ</i>	Roca inalterada Sedimentaria	Rda
	Intermedia (Ri)			Ria1; Ria2; Ril1; Ril2
	Blanda (Rb)			Rba
Suelos (S)	Residual (Sr)	Derivados de roca <i>in situ</i> de Rocas sedimentarias	Suelo residual	Sr
	Transportados (St)	Fluvial	Aluviones recientes o de lecho de río	Star; Stft
	Translocados (Str)	Depósitos de ladera, de vertiente o coluviales	Coluvión	Strc 1,2,3,4 y 5
			Flujos (de lodo, detritos y de escombros)	Strf
			Derrubios de pendiente	Strd
Antrópico (Sa)	Depósitos Antrópicos	Escombreras o botaderos	Sar1; Sar2	

5.4 Cartografía de Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

5.4.1 Unidades de Roca Sedimentaria Dura: Las unidades de roca dura se identifican con las letras **Rd**, las cuales comprenden los macizos rocosos en los que el material se presenta como roca fresca a débilmente meteorizada, es decir los grados I y II del perfil de meteorización de

Dearman (1974) y Suarez (1991). Por lo general las unidades de roca dura tienen resistencia alta y están bien cementadas. Son rocas poco fracturadas a masivas y un índice de resistencia geológico bueno a muy bueno ($GSI > 60\%$). Estos valores variaron de acuerdo a la afectación producida por la cercanía a la zona de influencia directa de la falla del Suarez y sus fallas satélites. La unidad de rocas duras comprende únicamente la unidad litoestratigráfica de areniscas de grano grueso a conglomerático con un alto contenido de cuarzo y moscovita.

• **Roca de arenisca de la Fm. Girón (Rda):** La litología corresponde a conglomerados y areniscas (cuarzo-arenisca), de color amarillo-naranja y gris, areniscas de grano grueso con niveles lenticulares de areniscas conglomeráticas de color gris claro con intercalaciones de paquetes de limolitas rojo-violáceas. Areniscas de fábrica clástica consolidada, tamaños de grano arena y subredondeados. La roca presenta una composición litológica principalmente de cuarzo (75-85%) y otros minerales como feldespato y moscovita. Según la clasificación de Folk (1974) para la clasificación composicional de las areniscas la roca es una sublitarenita.

Estas areniscas se encuentra sobre el Km 64+570 al Km 64+600 sobre el margen derecho de la vía (costado occidental), rocas de arenisca con guijos de cuarzo de hasta 1,5 cm, la morfología que caracteriza la unidad corresponde a un escarpe inclinado. En este sector la unidad litoestratigráfica (areniscas) no se presenta tan fracturada ni cizallada. El macizo rocoso presenta una dureza media a alta, grado de fracturamiento moderado, índice geológico de resistencia bueno ($GSI > 60\%$) y grado de meteorización moderado.

5.4.2 Unidades de Roca Sedimentaria Intermedia: Se denominaron con las letras Ri a las unidades de roca intermedia, que comprenden las rocas de dureza media a blanda. Son rocas fracturadas a moderadamente fracturadas (espaciamiento 20-60 cm), con un índice de resistencia

regular a bueno (GSI=40 – 60%) y grados de meteorización moderado a alto (grados III y IV). Estas unidades intermedias comprenden las unidades litoestratigráficas de areniscas y limolitas de la Fm. Girón.

- **Roca de arenisca de la Fm. Girón (Ria1):** Esta unidad de rocas intermedias también aflora en un macizo rocoso moderadamente fracturado, se ubica sobre el trazo de la falla Rio de Oro. La unidad es suprayacida por depósitos coluviales con erosión moderada. A pesar de encontrarse cerca al trazo la falla Rio de Oro, este es un talud estable. Duarte y Roa (2016) evalúan este talud según la clasificación SRM de Romana (1993) como clase III. Normal, parcialmente estable.

- **Roca de arenisca de la Fm. Girón (Ria2):** Las características litoestratigráficas de esta unidad son similares a las de la unidad (Rda) pero con un grado de fracturamiento mayor. La unidad Ria2 se ubica sobre el Km 67+150, como una unidad mucho más potente (de mayor espesor) intercalada con pequeñas capas de limolitas (menores a 1m) (figura 10a). En este sector se ubica sobre el trazo de la Falla Suarez, lo cual genera que el macizo rocoso tenga una densidad de fracturamiento muy alta (espaciamiento de 6-20 cm) (Ver Apéndice A, AFA-9), se registraron espejos y estrías de falla. Además en el costado sur de esta unidad se presenta un deslizamiento en cuña que será profundizado en el capítulo de inventario de MM en el cual se registró sobre su parte alta, en su flanco derecho escalones de falla.

- **Roca de limolitas de la Fm. Girón (Ril):** Las rocas de limolitas se encuentra en varios sectores de la zona de estudio en capas de espesores variables de 0.5 a 5 m, intercaladas con areniscas. Con partículas de tamaño lodo y limo a limo-arenosas, se caracteriza por su color pardo-violáceo (5 R 2/2), compuesta principalmente por cuarzo y además feldespato, moscovita y fragmentos de roca, en algunos sectores los contenidos de cuarzo disminuyen y se aumenta el porcentaje de moscovita y fragmentos de roca. Además presenta una erosión de hidroclastismo

que genera la desagregación de la roca. Esta unidad se encuentra en varios sectores infrayaciendo estratos de areniscas y creando de esta forma perfiles estratigráficos de materiales competentes sobre materiales incompetentes, lo cual genera una situación inestabilidad en algunos casos.

- **Roca de limolitas de la Fm. Girón (Ril 1):** Capas de rocas limolitas intercaladas con areniscas generando capas de rocas competentes (Rocas de areniscas) sobre capas incompetentes (Rocas de Limolita) (Figura 10b), el macizo rocoso está altamente fracturado en las rocas de arenisca y moderadamente fracturado sobre las limolitas, se registró una falla satélite del Suarez que afecta el afloramiento (ver Apéndice A, estación: AFA-2).

- **Roca de limolitas de la Fm. Girón (Ril 2):** Limolitas rojo-violáceas intercaladas con areniscas de grano fino en capas de 1 a 2m. El macizo rocoso tiene un dureza alta y grado de fracturamiento moderado a muy fracturado debido a la cercanía al sistema de fallas de Suarez. Este afloramiento se ubica sobre el Km 66+980 y está asociado a un pequeño MM, caída de rocas, generado por la inclinación subvertical del talud y la intercalación de capas competentes sobre incompetentes.

5.4.3 Unidades de Roca Sedimentaria Blanda (Rb): Las unidades denominadas como roca blanda se identificaron con las letras **Rb**, son poco cementadas, frágiles, con fracturamiento alto a muy alto, índice geológico de resistencia pobre a muy pobre (GSI= 0-40%) y altamente meteorizada. Incluye las unidades litoestratigráficas de areniscas.

Roca de areniscas de la Fm. Girón (Rba): Rocas de arenisca fuertemente afectadas por tectonismo y asociadas a un MM combinado y complejo ubicado en este sector (estación: AFA5). La unidad presenta una dureza baja, altamente fracturada, en algunas zonas con un espaciamiento menor a 6 cm (fragmentada o triturada) y grado de meteorización alto, (GSI= 20- 35 %).

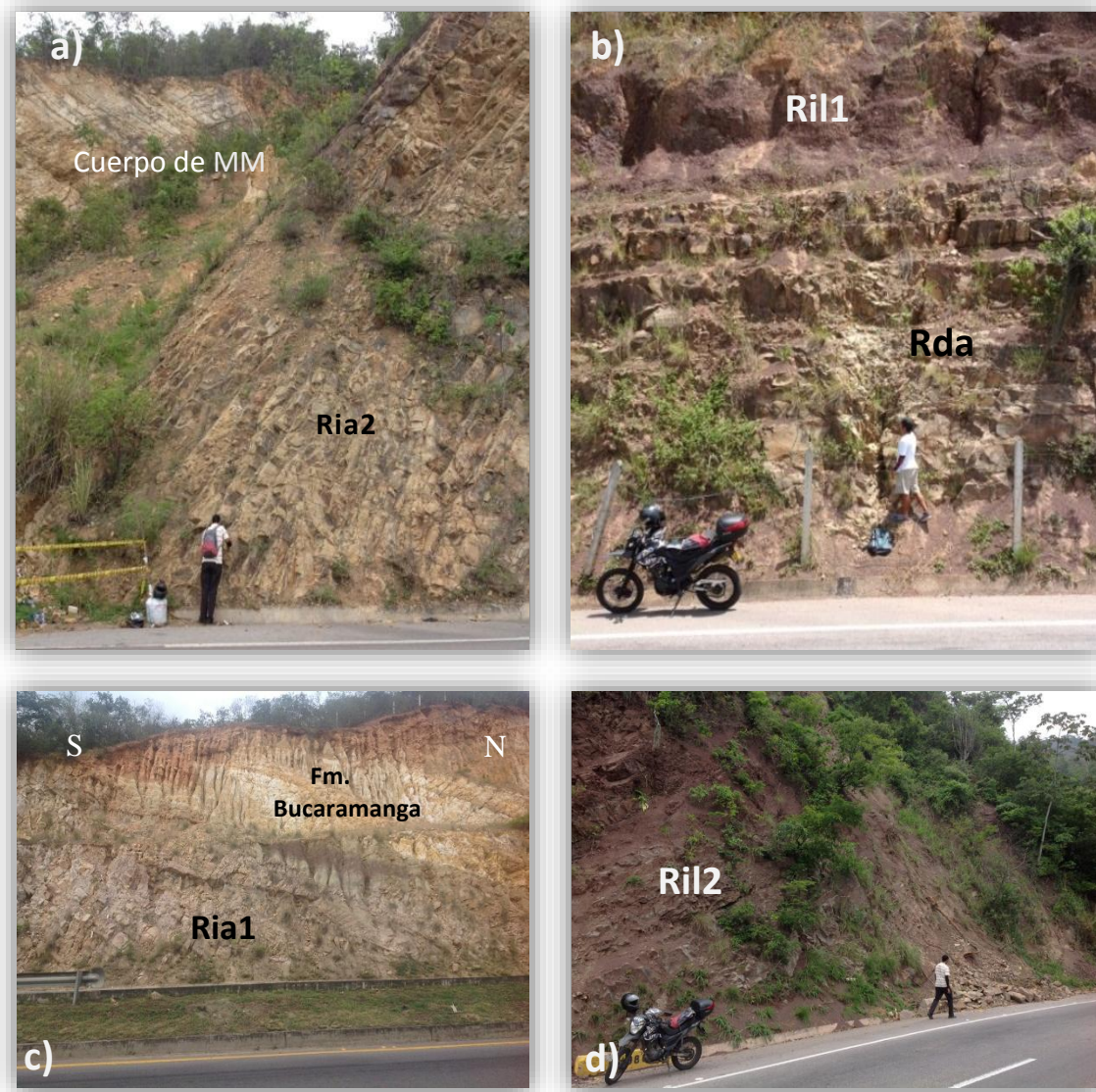


Figura 20. a) y b) Afloramientos donde se presentan las unidades Ria 1 y Ril 1 con distinto control estructural, Estaciones AFA-9 y AFA-2 respectivamente. Rda (Roca dura de arenisca) que infrayace las limolitas. c) macizo rocoso parcialmente estable de la unidad Ria1. d) Rocas intermedias de limolitas afectadas por rodamiento de rocas.

5.4.4 Unidades de Suelo Residual

- *Suelo Residual de la Fm. Girón*: Suelo arenoso y en algunos sectores areno limoso, de color pardo violáceo, amarillo con espesores menores a 1m, con contenido de cuarzo y feldespato, esta unidad de suelo no tiene el espesor suficiente y/o área para ser cartografiable. Se encuentra en el sector comprendido entre el Km 64+840 al Km 64+920 en la estación AFA-2, Los suelos residuales se originan in situ por efecto de la meteorización de las rocas, sin embargo por las características del área de estudio (inclinación de la pendiente) los materiales producto de la meteorización son transportados ladera abajo

5.4.5 Unidades de Suelo Transportado (St)

- *Suelos de Aluviones Recientes (Sta)*: Corresponde a los aluviones de lechos o cauces fluviales, que geológicamente se conocen como depósitos aluviales recientes; es decir, son los canales activos de las corrientes superficiales de la zona de estudio.

Están conformados por bloques, cantos, grava, arena y finos, compuestos por cuarzo y líticos de composición variada, con forma subredondeada a angular, clasto soportados, de tamaño y granulometría heterogénea, matriz generalmente areno-limosa. Su espesor varía entre 1 a 2m. Abarcan elementos geomorfológicos con dinámica fluvial activa, donde se presenta avenidas torrenciales y transporte activo de sedimentos en función directa con las épocas de precipitación.

Estos cuerpos se encuentran siguiendo la dirección de los cauces activos sobre el Km 64+720, Km 66+630, Km 66+890 y en el Km 67 +640 (quebrada Macanas). Su cartografía presenta una forma delgada y alargada perpendicularmente al eje de la vía y por lo tanto no presentarían un área cartografiable, sin embargo, se ha hecho una excepción con estas unidades por la amenaza que pueden producir, especialmente la asociada a la quebrada Macanas la cual ya ha registrado ladera

abajo flujo de detritos por avenidas torrenciales que se podría repetir afectando varias viviendas localizadas sobre su cauce.

- **Suelo gravoso del miembro órganos (Fm. Bucaramanga) (Stft):** Depósito fluvio-torrenciales matriz soportado compuesto en relación 60-40 %. Matriz limo arcillosa de colores grises, pardos y rojizos en algunos sectores, altamente erodable, bloques y cantos sub-redondeados a redondeados de arenisca cuarzosa con menor proporción de micas y feldespatos, con presencia de fragmentos de limolitas rojas alteradas, cantos de cuarzo y conglomerados, mala selección. Consistencia media a dura y de espesor variable de 2 a 15 metros.

Morfológicamente este miembro constituye valles en “V”, en la zona de estudio, escarpe de la mesa de Lebrija, esta unidad forma interfluvios de filos ondulados con crestas agudas ramificadas formando drenajes dendríticos. La unidad presenta consistencia firme en estado seco, pero al absorber agua pierde totalmente la consistencia y se desintegra la matriz (INGEOMINAS, 2007). Es fácilmente erodable lo que facilita el desprendimiento de bloques y cantos en las épocas de fuertes precipitaciones originando surcos, cárcavas y tierras malas (ver Figura 9.)

5.4.6 Unidades de Suelo Translocado (Str)

- **Suelos de Depósitos Coluviales:** Los coluviones son masas incoherentes de materiales sueltos y heterogéneos, de suelos y/o fragmentos de roca angulares a subangulares, depositados por la gravedad, lavado de la lluvia o movimientos en masa. Se caracterizan por ser materiales clasto-soportados o matriz-soportados según el origen de los sedimentos, su tamaño de grano varía desde grava hasta bloques de 1,5 m de diámetro y meteorización intermedia a alta (INGEOMINAS, 2007).

- ***Suelo coluvial estable asociado a la formación Girón (Strc1)***: Coluvión que se caracteriza por presentar buena compactación, los fragmentos se encuentran moderadamente alterados y no presenta movimientos en masa recientes. En la zona de estudio estos depósitos de suelo coluvial se encuentran entre el Km 65 +520 al Km 67+140, siendo la unidad de mayor extensión. Estos depósitos se asocian a la Formación Girón, tienen una consistencia media-alta y buena cobertura vegetal, lo cual les da una buena estabilidad.

- ***Suelo Coluvial asociado a Deslizamiento (Strc2)***: Coluvión asociado a movimiento en masa, tipo deslizamiento traslacional y en menor medida a un flujo causado por épocas de fuerte precipitaciones. Coluvión inconsolidado, sus fragmentos son moderadamente alterados, permeable y susceptible a erosión.

El material es matriz soportado una relación de 60-65% de matriz a 40-35% de clastos. Matriz areno-limosa, de color amarillo-pardo con guijos, gravas y bloques de rocas sedimentarias de la Fm. Girón, con tamaños de hasta 50 a 80 cm de diámetro, forma subredondeada a subangular. Con un espesor fluctuante entre los 2 a 7 m aproximadamente.

- ***Suelo Coluvial asociado a MM complejo (Strc3)***: Depósito cuaternario de tipo coluvial ubicado sobre el Km 65+ 140 (estación AFA-5), compuesto bloques de areniscas y limolitas embebidas en una matriz arcillo-arenosa que suprayacen rocas de la Fm. Girón altamente fracturadas compuestas por areniscas, areniscas conglomeráticas, limolitas intercaladas y arcillolitas.

Ingeoexploraciones realizo una tomografía eléctrica en este sector sobre el costado oriental de la vía, identificando un deposito coluvial con un espesor variable de 5 a 20 m. (ver anexo 2, tomografía 1). Por otra parte, las rocas que afloran hacia la parte sur del depósito (unidad Rba)

fueron clasificadas por Duarte y Roa (2016) como tipo III. Mala, con inestabilidades según el RMR de Bieniawski (1973).

Esta zona está asociada a un MM complejo y combinado de flujos, reptación y desprendimiento de rocas por gravedad. (Ver apéndice A, estación AFA-5). Se ha registrado MM de flujo de avalancha de detritos y rocas que generaron la obstrucción de un carril en 2011, posteriormente se instalaron gaviones como medida preventiva, sin embargo debido a las características ya descritas, la zona presenta una alta susceptibilidad a MM y se deben mejorar sus medidas de prevención y mitigación (ver cap 9. Recomendaciones). (Figura 11a)

- ***Deposito Coluvial Verticalizado (Strc4)***: Ubicado sobre Km 66+145 aprox. Es un coluvión que presenta una pendiente muy inclinada o sub-vertical con una altura máxima de 9 a 10 m en la parte central y está muy cerca de la calzada vial. Coluvión matriz-soportado con matriz granular (arenas y un bajo contenido de lodos y limos) y un armazón de gravas y bloques que pueden superar el metro de diámetro ver (figura 11b).

Las rocas de la Fm. Girón que subyacen este coluvión presentan criterios de deformación como fallas y planos de estrías, afloramiento afectado tectónicamente (ver apéndice A, E: AFA6). Según Duarte y Roa (2016) el afloramiento presenta un talud clase V. calidad mala, inestable, para el RMR propuesto por Bieniawski (1973), medido a partir de las rocas de limolitas que conforman la base del talud. Además los datos obtenidos por stereonet dan como resultado un posible fallamiento en cuña. Conviene subrayar que sobre este talud no se ha hecho ningún manejo preventivo. En el capítulo de recomendaciones se plantean algunas sugerencias para este talud.

- ***Depósitos Coluviales asociados a la falla Rio de Oro (Strc5)***: El primer deposito está Ubicado en el Km 67+725 es un deposito translocado que cubre depósitos del Abanico de Bucaramanga tapando el contacto fallado entre este y la formación Girón y siendo evidencia de

actividad tectónica reciente (ver figura 5). El coluvión se presenta a ambos lados de la doble calzada en un corte en cajón. Deposito clasto-soportado a intermedio, posee una matriz granular (areno-limosa) y un armazón de gravas y bloques con una redondez que varía de angular a sub-redondeados. Otros depósitos con las mismas características pero de menor área se encuentran al final de la zona de estudio, igualmente cubriendo depósitos del Abanico.

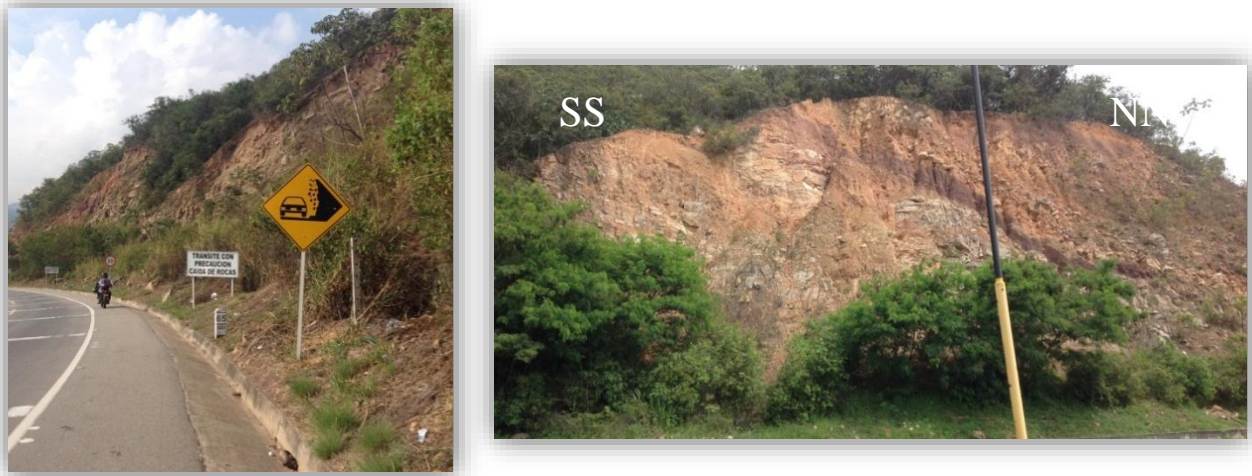


Figura 21. Suelo coluvial asociado a un deslizamiento translacional. Unidad Strc4, en la estación AFA-3.

- **Suelos de Derrubio de Pendiente (Strd):** Depósitos asociados a flujos torrenciales generados por una época de fuerte precipitación. Esta unidad tiene forma de cono o abanico, cuya parte más distal está conformada por materiales finos y mejor seleccionados que los ubicados hacia el ápice, donde son más gruesos y mal calibrados. Deposito matriz soportado a intermedio en algunos sectores se compone de gravas y bloques angulares y sub-angulares y una matriz areno-arcillosa. Esta unidad ha sido intervenida antrópicamente para terracear laderas.



Figura 22. Izquierda a) Depósito coluvial con obras ingenieriles de control insuficientes (gaviones) unidad (Strc3). Derecha b) Depósito coluvial Sub-vertical con evidencias de planos de falla y altamente erosionado, unidad (Strc4)

5.4.7 Unidades de Suelo Antrópico (Sa)

- **Suelos de Rellenos de escombrera o botaderos (Sar1 y Sar2):** Corresponde a materiales heterogéneos dispuestos por el hombre, caóticamente y sin ningún tratamiento o adecuación, con el objeto de cumplir los requerimientos de los diseños de obras de ingeniería. Compuestos por materiales de tamaño arena, arcilla o grava que son producto de residuos de construcción, (o materiales (terraplenes) producto de la adecuación de vías o para adecuación de terrenos. El código **Sar1** corresponde a un relleno de escombrera con fines urbanísticos y **Sar2** a un botadero de escombros explanado y utilizado como parqueadero actualmente.

6. Zonas Homogéneas de Estabilidad

El mapa de zonificación de estabilidad es el resultado del cruce cualitativo según un experto en el área de estudio, en este caso el codirector del proyecto, quien ha estudiado previamente esta zona. En el cual se ponderaron los siguientes parámetros: principalmente geomorfología (geoformas, pendientes (*morfometría*) y procesos morfodinámicos (*procesos erosivos e inventario de MM*)); geología (análisis de estructuras y unidades litoestratigráficas), y UGI (incluyendo todos los parámetros estudiados en este capítulo 5.) Lo cual dio como resultado la clasificación de 4 tipos de zonas homogéneas de estabilidad utilizando el método semáforo para su cartografía, para la clasificación de estas zonas se tomó como referentes los estudios de INGEOMINAS (2007) y Carvajal (2012). El mapa de zonas homogéneas se encuentra en el apéndice E, adjunto en el CD del libro.

6.1 Tipos de Zonas Homogéneas de Estabilidad:

- **Zonas Estables:** Se encuentran en pendientes planas a moderadas ($0 - 20^\circ$), sobre las unidades de rocas duras (Rda), Coluviales estables (Strc1) y el suelo gravoso del miembro Órganos (Sft). Por lo general en geoformas denudacionales de laderas moderadas y superficies subhorizontales y geoformas antropogénicas de laderas terrazadas y terrenos explanados. Por último, corresponden a zonas escasamente afectadas por procesos erosivos.

- **Zonas Moderadas:** zonas presentes sobre pendientes moderadas y en algunos casos inclinadas, sobre unidades de suelo coluvial estable (Strc1) y de derrubios de pendiente (Strd).

Asociadas a geoformas denudacionales de laderas moderadas e inclinadas. Zonas afectadas levemente por procesos erosivos. Su amenaza principal se debe a caída o rodamiento de detritos.

- **Zonas Inestables:** Áreas ubicadas sobre pendientes moderadas a inclinadas. Asociadas a rocas intermedias (Ril1 y Ril2) y a suelos coluviales relacionados con movimientos en masa (Strc3 y Strc4). Sobre geoformas denudacionales de laderas moderadas a inclinadas y geoformas antropogénicas de cortes verticales de ladera. Afectadas por procesos erosivos. Amenaza alta por caída o rodamiento de rocas y deslizamientos traslacionales.

- **Zonas Muy Inestables:** Estas zona se encuentran sobre pendientes inclinadas a muy inclinadas, generalmente mayor a 30°. Sobre suelos de derrubios de pendiente (Strd), coluviales inestables (Strc5) y coluviales asociados a movimientos en masa (Strc3 y Strc4). Se presentan sobre geoformas denudacionales de laderas erosivas, inclinadas a muy inclinadas y laderas con reptación, y a la geoforma antropogénica de corte vertical crítico. Afectadas por procesos erosivos concentrados en surcos y cárcavas, cabe subrayar las tierras malas que se presentan adyacentes a la zona de estudio; y también afectadas por procesos de movimientos en masa. Amenaza muy alta por caída o rodamiento de rocas, flujos de detritos o lodos, deslizamientos traslacionales y reptación, además de movimientos complejos.

7. Conclusiones

Como se planteó en la hipótesis inicial la Falla del Suarez juega un rol principal en la generación de inestabilidades debido a la fracturación que genera en las rocas y que permite su fácil desagregación. Además de crear planos de debilidad que facilitan la rotura por falla planar y/o en cuña o generar zonas de despegue. Así mismo esta falla es clasificada como falla activa, con potencial de romper en el futuro. Por lo tanto hay justificación para concluir que la probabilidad a movimientos en masa detonados o contribuidos por actividad neotectónica es alta.

El modelo geofísico 3D pone a la vista un levantamiento de 40m de la Formación Girón producido por la falla Rio de Oro sobre el Miembro Órganos del Abanico, lo cual es corroborado cualitativamente en campo.

El rasgo morfológico más notable de la Falla Suárez en la zona de estudio es un fuerte escarpe labrado sobre las rocas de la formación Girón (Escarpe de Palonegro). Los elementos geomorfológicos cartografiados son producto principalmente de un ambiente morfogenético denudacional debido a procesos erosivos hídricos y fenómenos de transporte de materiales.

El mapa de zonas homogéneas de estabilidad está compuesto en un 38% por zonas inestables y muy inestables, las cuales presentan procesos hídricos erosivos concentrados y en algunos casos registro de movimientos en masa. Por lo tanto es necesario ampliar el análisis sobre estos sectores y tomar medidas de control para prevenir daños de infraestructura, humanos y ambientales.

8. Recomendaciones

La estación AFA-5 (sobre el Km 65+150) presenta un coluvión asociado a un movimiento de reptación y flujos, el cual ya ha registrado rodamiento y flujos de detritos que han afectado la vía, las obras de contención (muro de gaviones) sobre la pata del talud son insuficientes debido a que la corona del movimiento esta activa. Se recomienda hacer obras de drenaje superficial como zanjas de coronación, cunetas con descoles y disipadores, vertederos. Además obras de contención y revestimiento tales como muros en concreto reforzado (para crear zonas de acumulación y evitar interrupción en la vía). Se remite a la tesis de grado de Estupiñan y Murcia (2013) donde se proponen medidas de control para esta zona, similares.

En cuanto a la estación AFA-6 (Km 66+145) la cual presenta una alta amenaza se propone un control hídrico a través de zanjas de infiltración para mitigar la erosión hídrica concentrada que tiene este talud. Además un perfilado, terraceo o descarga de taludes debido a que la morfometría que presenta el talud actualmente (vertical o subvertical) genera una desventaja para su estabilidad.

En general se recomienda realizar obras de perfilado, hidráulicas y biotecnológicas (trinchos, coberturas arbustivas, gramíneas, arvenses, etc.) para las zonas donde se identificaron **procesos de erosión hídrica** moderados a severos. Por otro lado para las zonas donde se han presentado **movimientos en masa**, registrados dentro del inventario o con amenaza alta se recomienda además, obras ingenieriles de control como pantallas dinámicas o ancladas, morteros con piedra pegada para manejar la erosión hídrica laminar y recubrir las unidades poco consolidadas.

Las características geológicas y geomorfológicas dictan que debido a las altas pendientes y potencial de inestabilidad geológico de la zona, deben restringirse cualquier tipo de usos urbano o suburbano sobre las laderas con pendientes iguales o mayores del 55%.

Se recomienda la realización de proyectos de restablecimiento de cobertura vegetal protectora, con el objeto de que no se generen movimientos de gran magnitud que puedan afectar áreas aledañas sobre las zonas de alta y muy alta inestabilidad identificadas.

Referencias Bibliográficas

- Bueno, E. y Solarte A. (1994). Geología, Geotecnia y Comportamiento Erosivo del Área de Reserva Forestal de Bucaramanga. Tesis para optar al título de Geólogo. Escuela de Geología, UIS, Bucaramanga.
- Carvajal P., J. H. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Servicio Geológico Colombiano. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá, 2012, 83p.
- Carvajal, H., Cortes. R., Romero.F., y Calderon. Y. (2004). Propuesta Metodológica Para El Desarrollo De La Cartografia Geomorfológica Para La Zonificación Geomecanica. INGEOMINAS. Bogota.
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental. Boletín Geológico, Servicio Geológico Nacional. vol. 16, no.1-3, p. 5-96.
- Cediel, F., Shaw, R.P. and Caceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 815-848.
- Cortes, M. Angelier, J. and Colleta, B. Paleostress. (2005). evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. Tectonics. vol. 24, 27 p.
- Cruden, D. M., (1991). A Simple definition of a landslide: Bulletin of the International Association of Engineering Geology, v. 43, p. 27-29.

- Cruden, D.M. and Varnes, D.J., (1996). Landslide types and processes, en Turner, K., y Schuster, R.L., ed., Landslides investigation and mitigation: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247, p. 36–75.
- Duarte Marín, J.I. y Roa Viola O.I. (2016). Análisis del comportamiento mecánico de los Taludes Rocosos del Costado Occidental de la Vía Bucaramanga-Barrancabermeja en el Sector del Peaje Aeropuerto Palonegro Municipio de San Juan de Girón en el Tramo Comprendido desde Km 64+350 hasta el Km 68+050, Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander,
- Estupiñan, E.A. y Murcia Paez, N.A, (2013). Estabilización Geotécnica Del Talud Rocoso De La Vía Barrancabermeja - Bucaramanga En El Sector Peaje Aeropuerto Palonegro - Municipio De Girón En El Tramo Comprendido Desde K 65+420 Hasta El K 65+490, Escuela Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander.
- Highland, L.M. y Bobrowsky, P. (2008). Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes. Servicio Geológico de los EE.UU., Reston, Virginia: 2008.
- Hoek, E., and Bray, J.W., (1981). Rock slopes engineering: Institution of Mining and Metallurgy, 358 p.
- Hoek, E. Marinos, P. and Benissi, M. (1998). Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bull Eng Geol Env. 57 : 151–160
- Hubach, E. (1951). Mina de Carbón de “Chía” en el Páramo del Almorzadero (Santander). Servicio Geológico Nacional. Informe 809. Bogotá. 3 p.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M., and Hutchinson, J.N., (2001). Review of the classification of landslides of the flow type: Environmental and Engineering Geoscience, v. 7, p. 22–238.

- Hutchinson, J.N., (1988). Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, in *Memorias, 5th International Conference on Landslides*, Lausanne, p. 3–35.
- INGEOMINAS. (2007). *Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta*. Subdirección De Amenazas Geológicas Y Entorno Ambiental. 2007. 631 págs.
- INGEOMINAS. (2008). Diederix, H. Moreno, C.H. Torres, E. Botero, P.A. *Modelo de evolución morfotectónica Cuaternaria basado en evidencias estructurales, tectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de fallas en la región de Bucaramanga*.
- INGEOMINAS-CDMB. (2002). *Microzonificación Sísmogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, Bucaramanga*. Julivert, M. 1963. *Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga*. UIS. *Bol. de Geología No. 15*. p.p: 41-56, Bucaramanga.
- Langenheim, R.L. (1959). *Preliminary report on the stratigraphy of the Girón Formation in Santander and Boyacá*. *Bol. Geol., Univ. Ind. Santander*. vol. 3, pp. 35-50.
- Osorio-Afanador, D.A. (2016). *Estratigrafía Y Deformación Del Grupo Girón En El Anticlinorio De Los Yariguíes (“Anticlinal De Los Cobardes”) Sectores Zapatoca Y Río Lebrija*. Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander.
- Paris, G., y Romero, J., (1994). *Fallas Activas en Colombia: INGEOMINAS, Boletín Geológico*, v. 34, no. 2-3, p. 3-26 (Santafé de Bogotá).
- Paris, G., y Sarria, A., (1986). *Proyecto Geofísico del Nordeste Colombiano—Neotectónica del Nororiente Colombiano: INGEOMINAS, Bogotá, Informe INGEOMINAS-ISA (Interconexión Eléctrica S.A.), 59 p.*

- Pierson, T.C., (2005). Hyperconcentrated flow – transitional process between water flow and debris flow, en Jakob, M., y Hungr, O., ed., Debris flow hazard and related phenomena: Chichester, Springer-Praxis, p. 159–202.
- PMA: GCA (2007) Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andina. Movimientos en Masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas. Publicación Geológica Multinacional No. 4.
- Reyes M., G. A., (2016). Geología y geotecnia de la vía Bucaramanga-Barrancabermeja (Colombia). Síntesis de eventos, estudios y obras en los últimos 60 años. En memorias XII Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica. Medellín, agosto 13 de 2016.
- Romana, M. (1991). "SMR classification". Proc. 7th Int. Cong. Rock MEch” Ed. Bakema Pp 955-960.
- Royero G, J.M. Y Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. Escala 1:400.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS. Sarmiento, L.F. Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models. Amsterdam: PhD Thesis Vrije Universiteit. 297 p.
- Suarez, J. (2009). Deslizamientos. Volumen 1: Analisis Geotecnico. Primera Edición. Division de Publicaciones UIS.
- Taboada, A. Rivera, L. Fuenzalida, A. Cisternas, A. Philip, H. Bijwaard, H. Olaya, J. Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tectonics. . vol. 19, no. 5, p. 787-813.
- Tesón, E., Mora, A., Silva, A., Namson, J., Teixell, A., Castellanos, J., Y Valencia, V. (2013). Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude, and structural

style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Geological Society, London, Special Publications, 377(1): 257-283.

Vanguardialiberal.com (2011). Así fue el derrumbe en la vía al aeropuerto Palonegro. Giron, Domingo 21 de Agosto de 2011 - 07:44 PM. Jazmin Rodriguez. Consultado el 1 de mayo. Disponible en: <http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/video-118263-asi-fue-el-derrumbe-en-la-via-al-aeropuerto-palonegro>.

Vargas Cuervo, G. (2000). Criterios Para La Clasificación Y Descripción De Movimientos En Masa. Boletín de Geología Vol. 22, No. 37.

Varnes D.J. (1958). "Landslides types and processes". Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-47.

Varnes, D. J., (1978). Slope movements types and processes, en Schuster R.L., y Krizek R.J., ed, Landslides analysis and control: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 176, p. 9-33.

Ward, D. Cruz, J.A. Goldsmith, R. Restrepo A. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. Boletín Geológico No. 21(1-3), INGEOMINAS, Bogotá. p.p: 1-32.

Apéndice A. Modelo Geofísico 3D de la Estratigrafía Típica del Subsuelo

Cabe subrayar en primer lugar que los insumos presentes en este capítulo son patrimonio de INGENIOEXPLORACIONES se reservan sus derechos de autor. Por su parte el modelado geológico implica el uso de datos reales del subsuelo para poder construir los diferentes componentes del modelo. El modelo se compone capas, horizontes, estructuras y puntos pertenecientes a los horizontes. Las capas representan rocas, depósitos o suelo. A la interfaz entre dos capas se le conoce como horizonte, el cual es un plano que representa el tope de la formación inferior y la base de la formación superior, las estructuras representan las fallas y los pliegues y, por último, se tienen los puntos que pertenecen a un horizonte y que son el insumo principal para construir el modelo geológico 3D.

Los insumos para construir el modelo geológico se componen de datos de geofísica, perforaciones, geología de superficie, fotogrametría, entre otros. La geofísica aporta datos geoelectricos y sísmicos que son usados para determinar la ubicación de horizontes y estructuras. Las perforaciones permiten ubicar los topes de los horizontes y hallar espesores aparentes de las capas. La geología de superficie presenta la estratigrafía, relaciones de campo y características estructurales de la zona y la fotogrametría permite obtener nubes de puntos y mallas 3D que son útiles para hacer un modelo más acorde a la realidad.

- **Modelo 3D Geológico Para la Zona de Estudio**

Para construir el modelo geológico de la zona de estudio se utilizan principalmente datos de geoelectrica y geología de superficie. Los datos de geoelectrica se componen de sondeos eléctricos

verticales (SEV) y Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) y la geología de superficie representa las unidades geológicas de la zona y las estructuras de la zona (solo fallas en este caso).

• **Datos de Geoeléctrica:** Para la construcción del modelo se usan cinco SEV y tres TRE tomados por la compañía IngeoExploraciones en el municipio de Girón, departamento de Santander (Se remite al Anexo 2. Para mayor información sobre las coordenadas de ubicación de estos estudios).

Profundidad (m) Desde - Hasta	Unidad Geoeléctrica	Resistividad (Ohm - m)	Correlación Hidrogeológica
0.00 - 0.60	I	119	Suelo areno-arcilloso
0.60 - 2.00	II	95	Depósito coluvial de bloques de areniscas y limolitas embebidos en matriz arcillo-arenosa ligeramente húmedo.
2.00 - 8.51	III	110	Basamento jurásico muy fracturado y meteorizado compuesto por arcillolitas, areniscas y limolitas. Formación Girón.
8.51 - 30.88	IV	90	Basamento jurásico muy fracturado y compuesto por areniscas, limolitas y arcillolitas. Ligeramente húmedas Formación Girón.
30.88 - 67.24	V	124	Basamento jurásico muy fracturado y compuesto por areniscas, limolitas y arcillolitas. Formación Girón.
67.24 - 180.00	VI	285	Basamento jurásico fracturado y compuesto por areniscas y arcillolitas. Formación Girón.

Figura A.1. SEV-1 del estudio geoeléctrico I. Fuente: IngeoExploraciones

Profundidad (m) Desde - Hasta	Unidad Geoeléctrica	Resistividad (Ohm - m)	Correlación Hidrogeológica
0.00 - 0.70	I	119	Suelo areno-arcilloso
0.70 - 2.50	II	40	Material de relleno
2.50 - 6.50	III	16	Basamento jurásico muy fracturado y meteorizado compuesto por arcillolitas y limolitas. Formación Girón.
6.50 - 25.18	IV	11	Basamento jurásico muy fracturado y meteorizado compuesto por arcillolitas. Formación Girón.
25.18 - 69.67	V	9	Basamento jurásico muy fracturado compuesto por arcillolitas. Formación Girón.
69.67 - 180.00	VI	61	Basamento jurásico muy fracturado y compuesto por limolitas y arcillolitas. Ligeramente húmedas. Formación Girón.

Figura A.2. SEV-2 del estudio geoelectrico I. Fuente: IngeoExploraciones

Profundidad (m) Desde - Hasta	Unidad Geoeléctrica	Resistividad (Ohm - m)	Correlación Hidrogeológica
0.00 - 1.00	I	542	Suelo areno-gravoso
1.00 - 2.75	II	230	Depósito coluvial de bloques de areniscas y limolitas embebidos en matriz arcillo-arenosa.
2.75 - 6.95	III	171	Basamento jurásico meteorizado muy fracturado y compuesto por limolitas. Formación Girón.
6.95 - 19.73	IV	87	Basamento jurásico meteorizado muy fracturado y compuesto por arcillolitas y limolitas. Húmedo a la base. Formación Girón.
19.73 - 48.61	V	94	Basamento jurásico muy fracturado y compuesto por areniscas, limolitas y arcillolitas. Húmedo. Formación Girón.
48.61 - 180.00	VI	197	Basamento jurásico muy fracturado y compuesto por areniscas, limolitas y arcillolitas. Húmedas. Fm Girón.

Figura A.3. SEV-1 del Estudio Geoelectrico II. Fuente: IngeoExploraciones

Profundidad (m) Desde - Hasta	Unidad Geoeléctrica	Resistividad (Ohm - m)	Correlación Hidrogeológica
0.00 - 1.00	I	122	Suelo areno-arcilloso
1.00 - 4.40	II	38	Depósito coluvial de bloques de areniscas y limolitas embebidos en matriz arcillo-limosa.
4.40 - 5.00	III	26	Basamento jurásico meteorizado muy fracturado y compuesto por arcillolitas y limolitas. Formación Girón.
5.00 - 22.60	IV	70	Basamento jurásico meteorizado muy fracturado y compuesto por arcillolitas y limolitas. Húmedo a la base. Formación Girón.
22.60 - 57.06	V	34	Basamento jurásico muy fracturado y compuesto por areniscas, limolitas y arcillolitas. Húmedo. Formación Girón.
57.06 - 180.00	VI	70	Basamento jurásico muy fracturado y compuesto por areniscas, limolitas y arcillolitas. Húmedas. Fm Girón.

Figura A.4. SEV-2 del Estudio Geoeléctrico II. Fuente: IngeoExploraciones

Profundidad (m) Desde - Hasta	Unidad Geoeléctrica	Resistividad (Ohm - m)	Correlación Hidrogeológica
0.00 - 1.75	I	16	Suelo arcillo-limoso
1.75 - 3.40	II	18	Depósito aluvial compuesto por gravas en matriz arcillo-arenosa. Miembro órganos de la Formación Bucaramanga.
3.40 - 4.50	III	10	Depósito aluvial compuesto por arenas finas en matriz arcillosa. Miembro órganos de la Formación Bucaramanga.
4.50 - 16.02	IV	8	Depósito aluvial compuesto por arenas finas en matriz arcillosa. Miembro órganos de la Formación Bucaramanga.
16.02 - 32.70	V	17	Depósito aluvial compuesto por arenas en matriz arcillosa y lentes gravosos. Miembro órganos de la Formación Bucaramanga.
32.70 - 133.33	VI	28	Basamento jurásico fracturado, compuesto por areniscas y limolitas. Nivel húmedo a la base. Fm. Girón

Figura A.5. SEV-1 para el Estudio Geoeléctrico III. Fuente: IngeoExploraciones.

A continuación, se adjuntan los resultados de las TRE realizadas por IngeoExploraciones, nuevamente se remite al lector al anexo 2. Para ampliar la información sobre los estudios geofísicos.

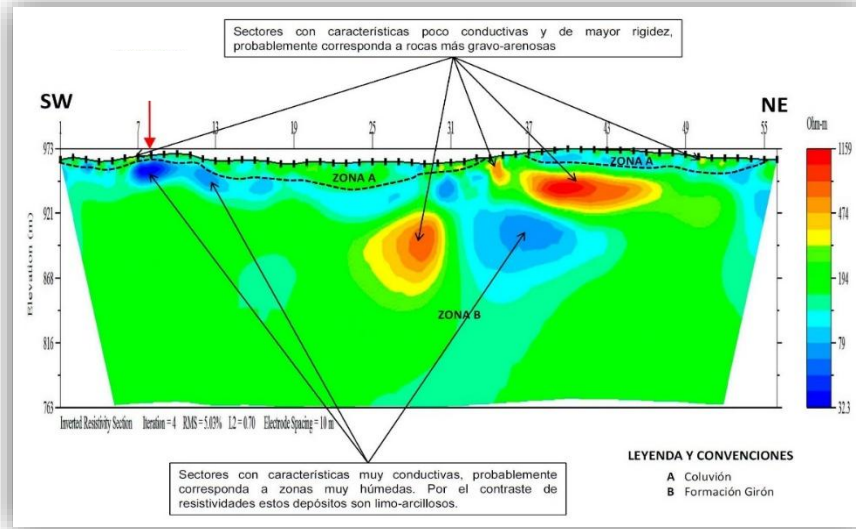


Figura A.6. Tomografía de Resistividad Eléctrica 1. Fuente: IngeoExploraciones.

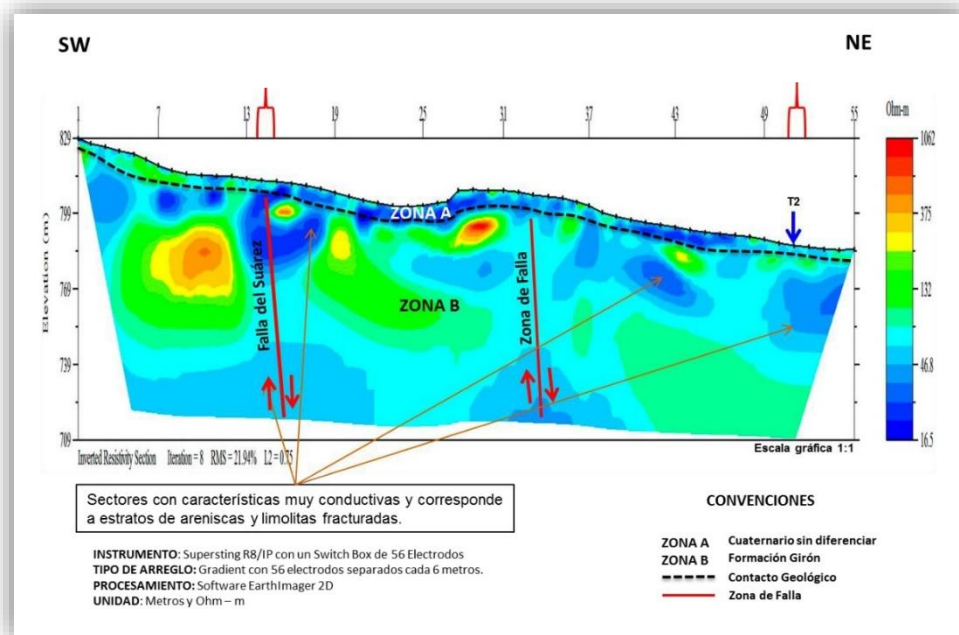


Figura A.7. TRE-1 para el predio del proyecto de Tomografía 2. Fuente: IngeoExploraciones

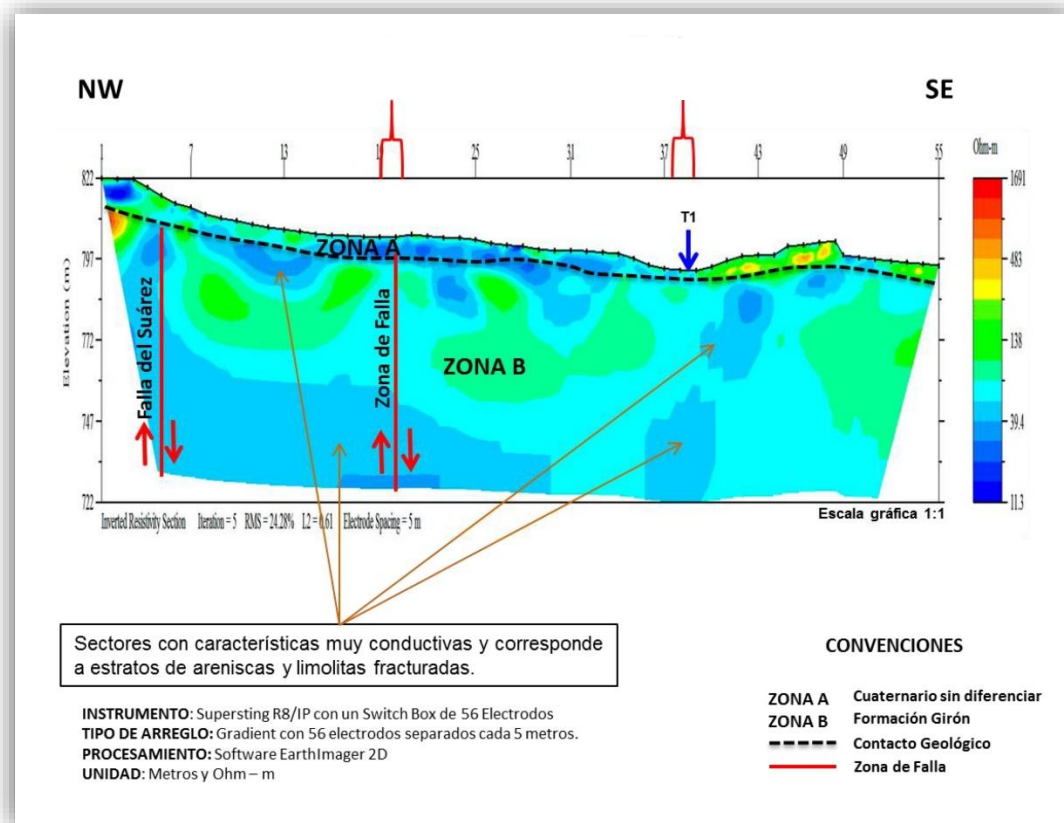


Figura A.8. TRE-2 para el predio del proyecto. Fuente: IngeoExploraciones

- **Construcción del Modelo a partir de Sistemas de Información de Geográfica**

- **Importación de datos geoelectricos y geológicos:** Inicialmente se importan los SEV y TRE.

Los SEV representan un estudio en 1D en donde se ubican los topes de las unidades geológicas.

Para poder importar los SEVs se hace una tabla llamada *BoreholeLog* según el modelo de las herramientas *Arc Hydro Groundwater Tools* para *ArcGIS*® (Tabla 6.1.)

Tabla A.1. *Tabla BoreLog para los cinco SEV.*

ID	WellID	RefElev	FromDepth	ToDepth	TopElev	BottomElev	ElevUnits	Material	HGUID	HGUCode	LogType	HorizonID
1,00	1,00	1099,00	0,000	0,600	1099,00	1098,40	meters		1			3
2,00	1,00	1099,00	0,600	2,000	1098,40	1097,00	meters		2			2
3,00	1,00	1099,00	2,000	180,000	1097,00	919,00	meters		3			1
4,00	2,00	996,00	0,000	2,500	996,00	993,50	meters		1,000			3
5,00	2,00	996,00	2,500	180,000	993,50	816,00	meters		3,000			1
6,00	3,00	949,00	0,000	1,000	949,00	948,00	meters		1			3
7,00	3,00	949,00	1,000	2,750	948,00	946,25	meters		2			2
8,00	3,00	949,00	2,750	180,000	946,25	769,00	meters		3			1
9,00	4,00	910,00	0,000	1,000	910,00	909,00	meters		1			3
10,00	4,00	910,00	1,000	4,400	909,00	905,60	meters		2			2
11,00	4,00	910,00	4,400	180,000	905,60	730,00	meters		3			1
12,00	5,00	769,00	0,000	1,750	769,00	767,25	meters		1			3
13,00	5,00	769,00	1,750	32,700	767,25	736,30	meters		2			2
14,00	5,00	769,00	32,700	133,330	736,30	635,67	meters		3			1

En la Tabla 6.1 el campo *ID* representa una unidad geológica, *WellID* representa la identificación del pozo, *FromDepth* representa la profundidad del tope de una geológica, *ToDepth* representa la profundidad de la base de una unidad geológica, *ToElev* representa la elevación del tope de una geológica, *BottomElev* representa la profundidad de la base de una unidad geológica, *ElevUnits* representa las unidades de medida usadas, *HGUID* representa la identificación de la unidad geológica y *HorizonID* representa la identificación de un horizonte.

Las unidades geológicas descritas en la Tabla 6.1 identificadas por el campo *HGUID* requieren de una tabla que describa las características de ellas. Esa tabla es llamada *Hydrogeology Unit*

Tabla A.2. *Hydrogeologic Unit.*

ID	HydroID	HGUCode	HGUName	AquíferID	AqCode	Description	HorizonID
1.00	1.00	1	S			Suelo	
2.00	2.00	2	Dep			Depositos	
3.00	3.00	3	Giron			Formacion Giron	

En la Tabla 6.2 el campo HydroID representa la identificación de la unidad geológica, el campo HGUName representa la abreviatura de la unidad y el campo Description representa el nombre completo de la unidad.

Para importar los puntos pertenecientes a la cabecera de los SEVs y los puntos representativos de las tomografías se usan los datos de la Tabla 6.3.

Tabla A.3. *Coordenas planas para la cabecera de los SEVs y los puntos representativos de las tomografías.*

ID	X	Y	Z	Lugar	Tipo
1	1098213	1276354	1099	Rec	SEV
2	1098390	1276121	966	Rec	SEV
3	1098216	1273960	949	Barc	SEV
4	1098429	1273872	910	Barc	SEV
5	1099249	1273812	769	Éxt	SEV
6	1098546	1276255		Rub	TRE-I
7	1098633	1276507		Rub	TRE-M
8	1098716	1276744		Rub	TRE-F
9	1098734	1275850	829	Carri_01	TRE-I
10	1099015	1275992	792	Carri_01	TRE-F
11	1098811	1276020	818	Carri_02	TRE-I
12	1099064	1275953	795	Carri_02	TRE-F

De esta manera se importan los SEVs y se ubican las líneas de las tomografías en el mapa (Figura 6.9). Luego se procede a digitalizar el mapa geológico de la zona, para ello se procede a hacer una georreferenciación a una imagen de un mapa y se digitalizan las unidades geológicas y estructuras.

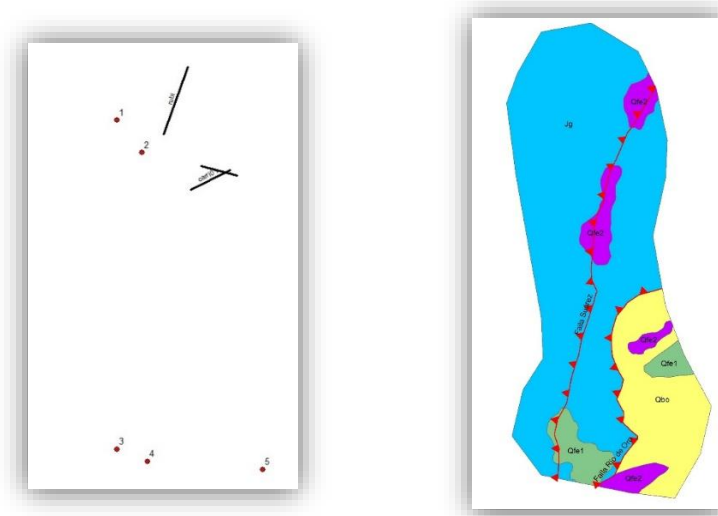


Figura A.9. (Izquierda). SEVs y líneas de tomografías ubicadas. **Figura 6.10** (derecha). Mapa Geológico de la zona.

- **Modelado 3D de SEV y TRE:** Para poder visualizar los SEV en 3D es necesario crear los *Borepoints*, los cuales son puntos que representan los topes de las unidades geológicas. Luego a partir de las TRE se generan más *Borepoints* perforando pozos virtuales con la ayuda de la herramienta *Geosection to Points*, los *Borepoints* usados para el modelo se visualizan en 3D en la figura 6.11.

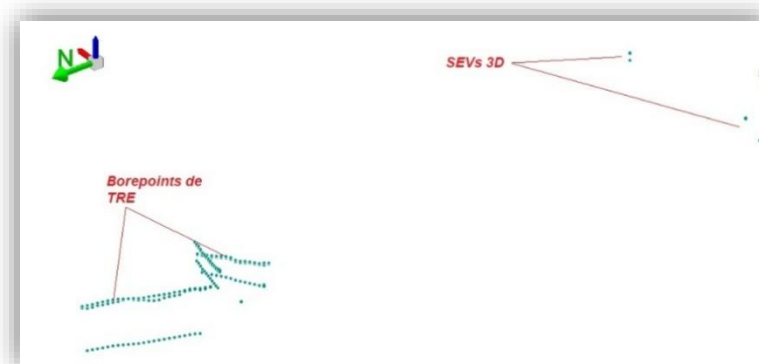


Figura A.10. Borepoints usados para construir el modelo.

Para modelar las TRE en 3D primero se digitalizan las unidades geológicas interpretadas de tal manera que se generen secciones 2D llamadas *XS2D* y luego éstas son transformadas en secciones 3D llamadas *Geosections*. En la figura 6.12 se visualizan las *Geosections* para este estudio.

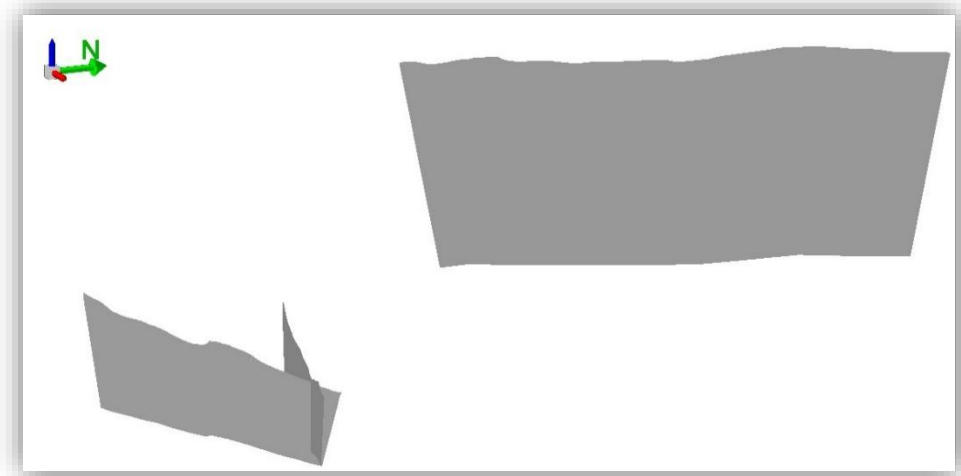


Figura A.11. Geosections usadas para construir el modelo.

- **Interpolación de horizontes:** Una vez creados los *Borepoints* se procede a hacer la interpolación de horizontes, para ello se hace uso también de *Modelo Digital de Elevación (DEM)*. El método de interpolación usado es *Inverse Distance Weighted (IDW)*. En las siguientes figuras se muestran los horizontes interpolados.

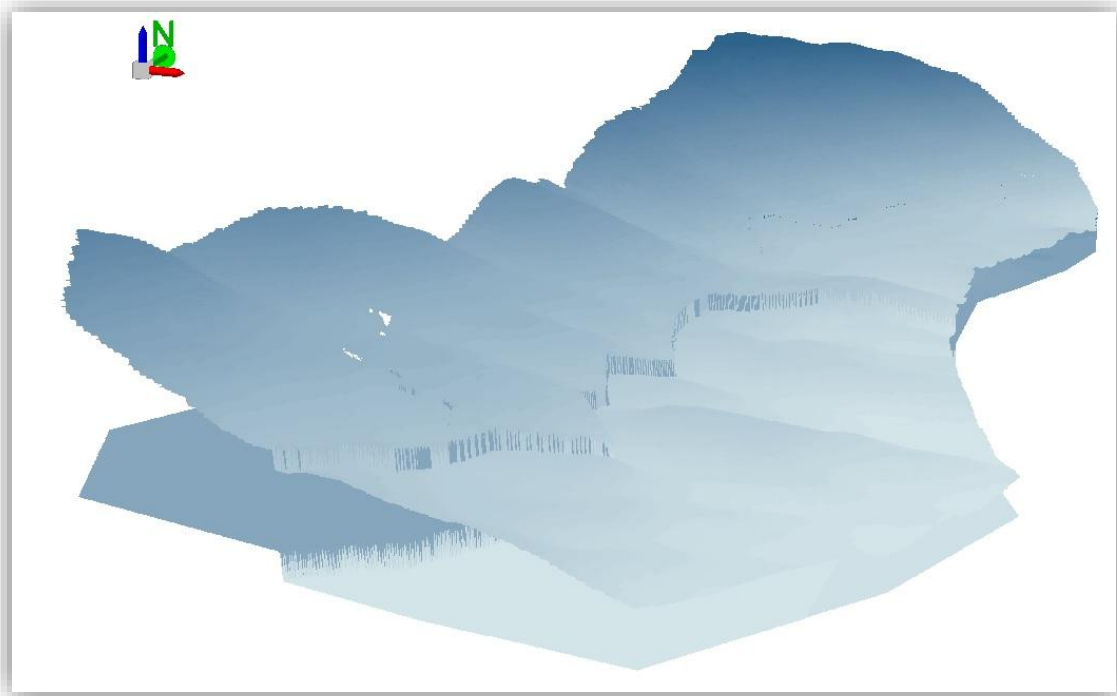


Figura A.12. Horizontes que representan el tope y la base de Girón (Jg).

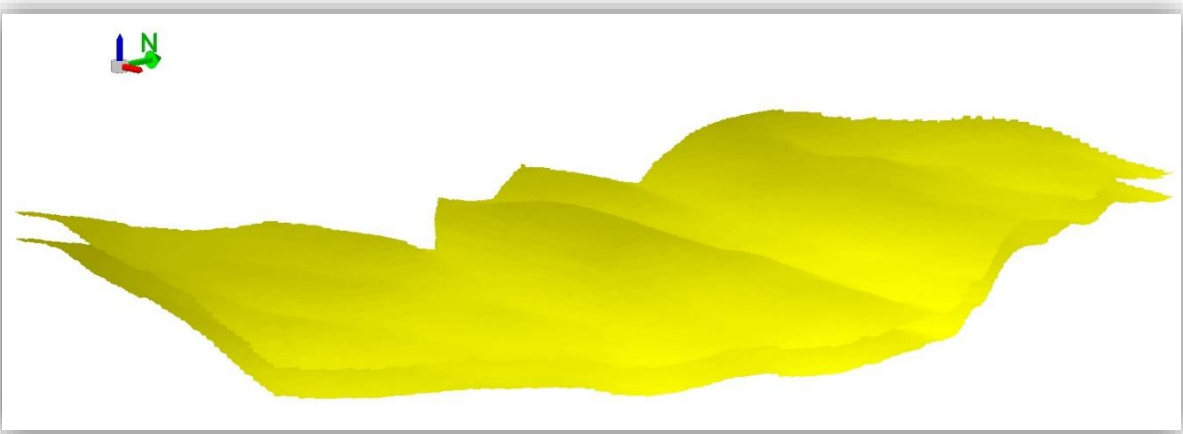


Figura A.13. Horizontes que representan el tope y la base de Órganos (Qbo).



Figura A.14. Horizontes que representan el tope y la base del Flujo de Escombros 1 (Qfe1).



Figura A.15. Horizontes que representan el tope y la base del Flujo de Escombros 2 (Qfe2).

• **Construcción del Modelo Geológico 3D:** A partir de los horizontes se procede a construir los volúmenes del Modelo Geológico 3D. En la figura 6.17 se observa la unidad Girón en 3D y esta vista permite observar la falla inversa de Río de Oro, el trazo de la vía Girón - Lebrija aparece en rojo. La figura 18 muestra la falla del Suárez

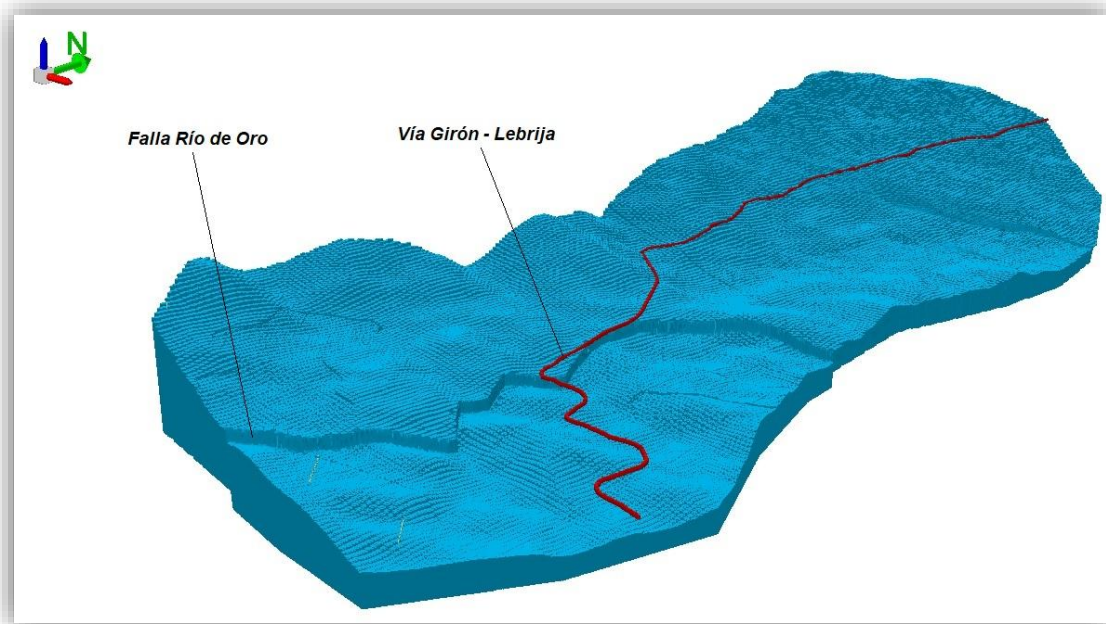


Figura A.16. Unidad Girón en 3D mostrando la falla Río de Oro.

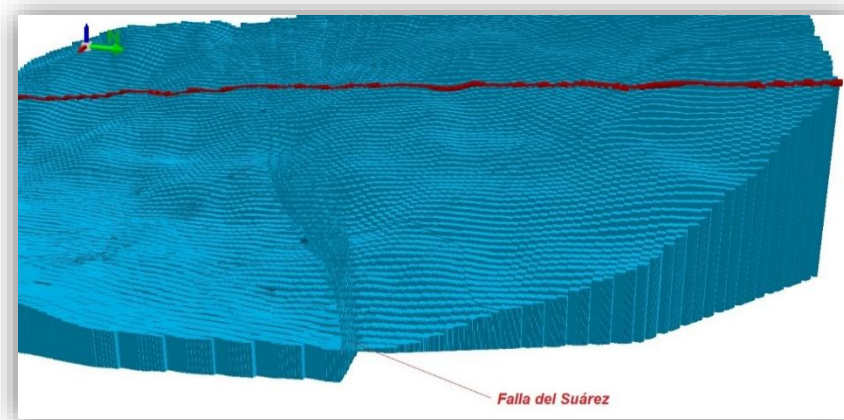


Figura A.17. Unidad Girón 3D mostrando la falla del Suárez.

El miembro Órganos de la formación Bucaramanga (Qbo) suprayace a la unidad Girón. En la figura 6.19 se muestra esta Qbo en 3D. También se observa que el bloque colgante de la falla de Río de Oro se ha salido una distancia de 40 m.

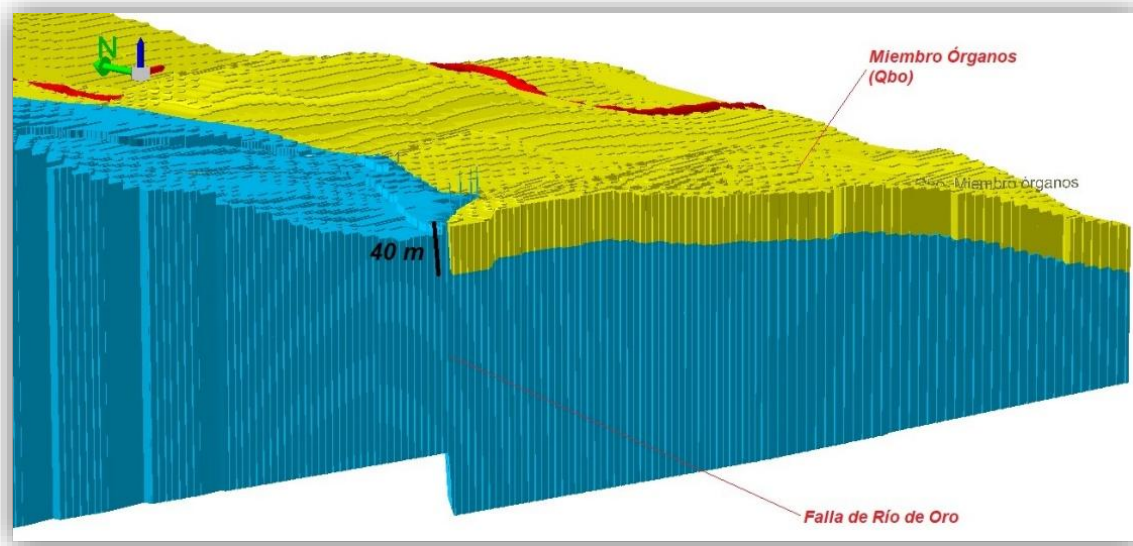


Figura A.18. Unidad Girón 3D mostrando la falla del Suárez.

Por último, se modelaron los flujos de escombros en superficie, de esta manera generando el modelo geológico final que se muestra en la figura A.19.

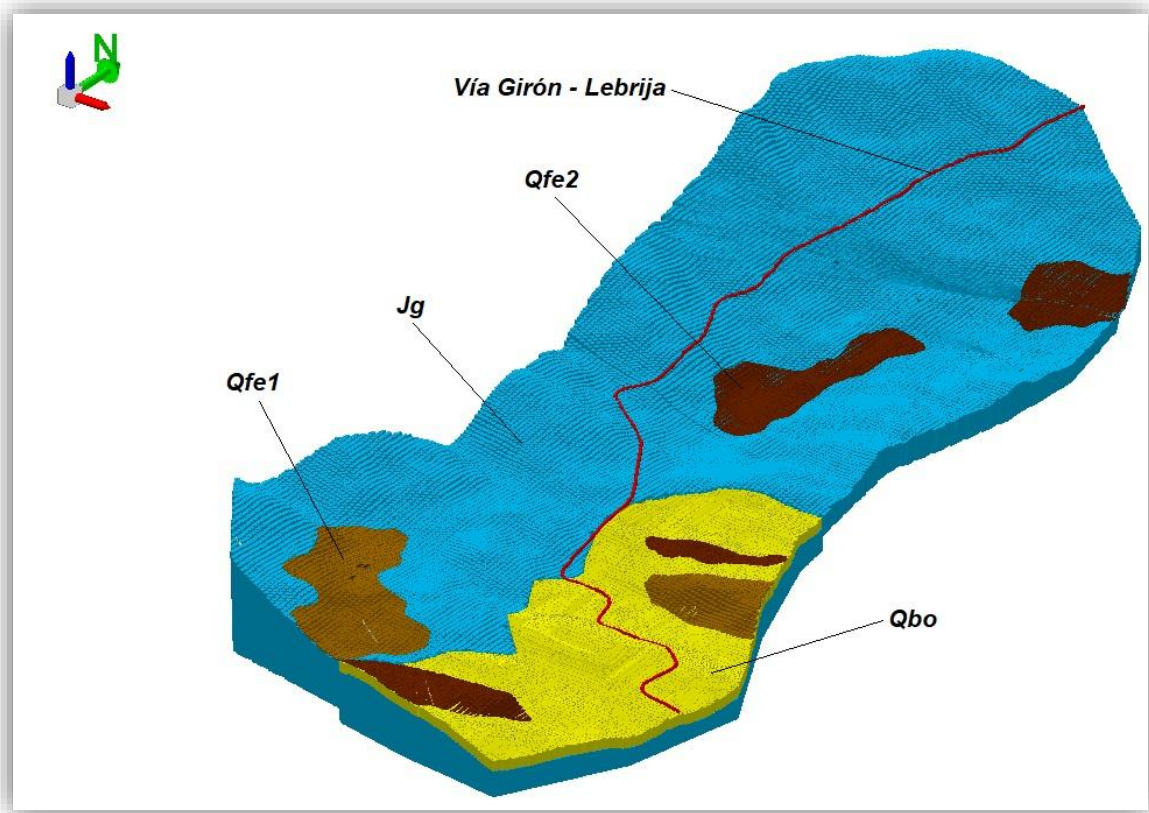


Figura A.19. Modelo geológico 3D final.

Apéndice B. Inventario de Movimientos en Masa

Movimiento en masa I

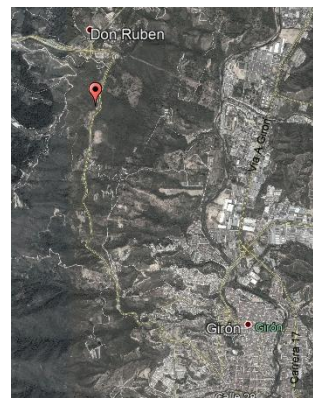
Datos del Registro:

Fecha del Evento:
Fecha de diligenciamiento: 06/06/2018
Institución: Escuela de Geología UIS

Importancia: MEDIA
Encuestador: David Afanador

Localización Geográfica:

Departamento: SANTANDER
Municipio: GIRÓN
Vereda: Carrizal
Altura: 1030m
Sitio: Pie del movimiento
Referentes Geográficos: Vereda Carrizal, vía aeropuerto
Abcisado: Km 65 + 050
Latitud: 7,098674°
Longitud: -73,185495



Tomado de: Google Earth, 2018

Planchas:

Plancha: 120 II A 2
Fuente: IGAC

Escala: 1:10000

Actividad del Movimiento:

Edad: 10 – 15 años
Distribución: Retrogresivo

Estilo: Multiple
Estado: Latente

Litología y Estructura:

Tipo de Plano	Dir. Buzamiento	Buzamiento	Espaciamiento
P. Estratificación	80	31	

Descripción: Areniscas y limolitas intercaladas de la Formación Girón.

Clasificación del Movimiento:

Primer Movimiento

Tipo Movimiento: Deslizamiento
Subtipo Movimiento: Deslizamiento traslacional planar
Plasticidad:

Tipo Material: Detritos
Humedad: Seco
Origen de Suelo: Sedimentario

Segundo Movimiento

Tipo Movimiento: Flujo

Subtipo Movimiento: flujo de detritos (debris-flow)

Plasticidad:

Tipo Depósito: Cono de deyección

Tipo Material: Detritos

Humedad: húmedo

Origen de Suelo: Sedimentario

Morfometría General y Dimensión del Terreno:

Morfometría General	valor	Dimensión del Terreno	valor
Diferencia de altura corona a punta(m)	45	Ancho de la masa desplazada Wd(m)	150
Longitud horizontal corona a punta (m)	30	Longitud total L (m)	25

Geoformas:

Ladera denudacional inclinada a abrupta, cuerpo de MM y corono principal de MM

Causas del Movimiento:

Tipo	Causa
Inherente	Material Meteorización-Física
Inherente	Material fisurado o agrietado
Inherente	Orientación desfavorable de discontinuidades
Contribuyente	Erosión Pluvial
Contribuyente	Cortes de ladera por ampliación de vía

Tipo de Erosión:

Superficial: Laminar

Fluvial:

Estado: Moderada a severa

Edad: Antigua

Subsuperficial:

Eólica:

Cobertura y Uso de Suelo:

Cobertura	%	Uso	%
Sin cobertura	70	Vías	10
Rastrojo Bajo	20	Sin uso	90
RastrojoAlto	10		

Referencias:

Autor	Título	Año	Editor

Daños:

Población Afectada:

Muertos: 0

Heridos: 0

Daños ambientales, a infraestructura y/o actividades económicas:

Clase de Daño	Clasificación	Tipo de Daño
Infraestructura	DL: Daño leve	Carretera

Anexo Fotografico:

Fecha:

22/09/2017

Autor:

David Afanador

Observaciones:

Fotografía



Movimiento en masa II

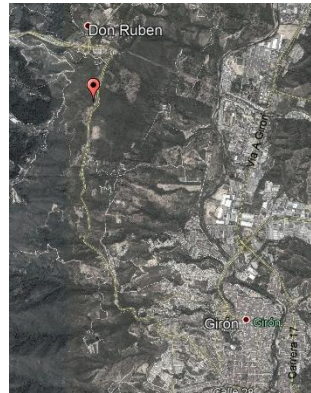
Datos del Registro:

Fecha del Evento:
Fecha de diligenciamiento: 06/06/2018
Institución: Escuela de Geología UIS

Importancia: ALTA
Encuestador: David Afanador

Localización Geográfica:

Departamento: SANTANDER
Municipio: GIRÓN
Vereda: Carrizal
Altura: 108 m
Sitio: Pie del movimiento
Referentes Geográficos: Vereda Carrizal, vía aeropuerto
Abcisado: Km 65 + 340 a Km 65+550
Latitud: 7,095733°
Longitud: -73,186280°



Tomado de: Google Earth, 2018

Planchas:

Plancha: 120 II A 2
Fuente: IGAC

Escala: 1:10000

Actividad del Movimiento:

Edad:
Distribución: RETROGRESIVO

Estilo: Múltiple
Estado: Activo

Litología y Estructura:

Tipo de Plano	Dir. Buzamiento	Buzamiento	Espaciamiento
P. Estratificación	52	5	
P. Diaclasamiento	102	88	Aprox. Casa 10 cm

Descripción: Deposito Coluvial proveniente de la Fm. Girón.

Clasificación del Movimiento:

Primer Movimiento

Tipo Movimiento: Reptación
Subtipo Movimiento: Reptación
Plasticidad:
Tipo Depósito: Coluvial

Tipo Material: Detritos y tierras
Humedad:
Origen de Suelo: Sedimentario

Segundo Movimiento**Tipo Movimiento:** Flujo**Subtipo Movimiento:** flujo de detritos (debris-flow)**Plasticidad:****Tipo Depósito:****Tipo Material:** Detritos**Humedad:** húmedo**Origen de Suelo:** Sedimentario**Morfometría General y Dimensión del Terreno:**

Morfometría General	valor	Dimensión del Terreno	valor
Diferencia de altura corona a punta(m)	30	Ancho de la masa desplazada Wd(m)	190
Longitud horizontal corona a punta (m)	28	Longitud total L (m)	25

Geoforma:

Ladera con reptación

Causas del Movimiento:

Tipo	Causa
Inherente	Material Meteorización-Física
Inherente	Material fisurado o agrietado
Inherente	Orientación desfavorable de discontinuidades
Contribuyente	Erosión Pluvial
Contribuyente	Cortes de Ladera por ampliación de la vía
Detonante	Lluvias

Tipo de Erosión:**Superficial:** Laminar**Fluvial:****Estado:** Moderada**Edad:** Antigua**Subsuperficial:****Eólica:****Cobertura y Uso de Suelo:**

Cobertura	%	Uso	%
Sin cobertura	40	Vías	15
Rastrojo Bajo	20	Sin uso	85
Matorrales	40		

Referencias:

Autor	Título	Año	Editor

Daños:

Población Afectada:

Muertos: 0

Heridos: 0

Daños ambientales, a infraestructura y/o actividades económicas:

Clase de Daño	Clasificación	Tipo de Daño
Infraestructura	DM: Daño moderado	Carretera

Anexo Fotografico:

Fecha: 15/09/2017

Autor: David Afanador

Observaciones:

Fotografía

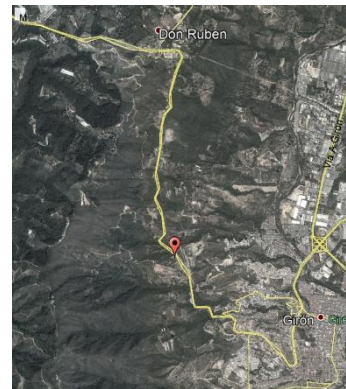
Movimiento en masa III

Datos del Registro:

Fecha del Evento:
Fecha de diligenciamiento: 06/06/2018
Institución: Escuela de Geología UIS
Importancia: BAJA
Encuestador: David Afanador
*Nota: * Fecha del segundo MM, reportado por Vanguardia Liberal*

Localización Geográfica:

Departamento: SANTANDER
Municipio: GIRÓN
Vereda: Carrizal
Altura: 902 m
Sitio: Pie del movimiento
Referentes Geográficos: Vereda Carrizal, vía Aeropuerto, 100 m después del segundo intercambiador
Abcisado: Km 66 + 920
Latitud: 7,082060°
Longitud: -73,186669°



Tomado de: Google Earth, 2018

Planchas:

Plancha: 120 II A 4
Fuente: IGAC
Escala: 1:10000

Actividad del Movimiento:

Edad:
Distribución: AVANZADO
Estilo: Unico
Estado: Activo

Litología y Estructura:

Tipo de Plano	Dir. Buzamiento	Buzamiento	Espaciamiento
P. Estratificación	230	56	

Descripción: Materiales competentes sobre materiales incompetentes que genere erosiones diferenciadas, exponiendo el material superior a caída o rodamientos

Clasificación del Movimiento:

Primer Movimiento

Tipo Movimiento: Caída
Subtipo Movimiento: Caída de rocas
Plasticidad:
Tipo Depósito:
Tipo Material: Rocas
Humedad: seco
Origen de Suelo: Sedimentario

Morfometría General y Dimensión del Terreno:

Morfometría General	valor	Dimensión del Terreno	valor
Diferencia de altura corona a punta(m)	20	Ancho de la masa desplazada Wd(m)	10
Longitud horizontal corona a punta (m)	5	Longitud total L (m)	8

Geoforma:

Ladera denudacional muy inclinada

Causas del Movimiento:

Tipo	Causa
Inherente	Material Meteorización-Física
Inherente	Material fisurado o agrietado
Contribuyente	Erosión de las capas incompetentes subyacentes

Tipo de Erosión:

Superficial: Laminar
 Fluvial:
 Estado: Moderada

Edad:
 Subsuperficial:
 Eólica:

Cobertura y Uso de Suelo:

Cobertura	%	Uso	%
Sin cobertura	20	Vías	15
Rastrojo Bajo	35	Sin uso	85
Matorrales	45		

Referencias:

Autor	Título	Año	Editor

Daños:

Población Afectada:

Muertos: 0

Heridos: 0

Daños ambientales, a infraestructura y/o actividades económicas:

Clase de Daño	Clasificación	Tipo de Daño
Infraestructura	DM: Daño muy leve	Carretera

Anexo Fotografico:

Fecha: 10/09/2017

Autor: David Afanador

Observaciones:

Fotografía

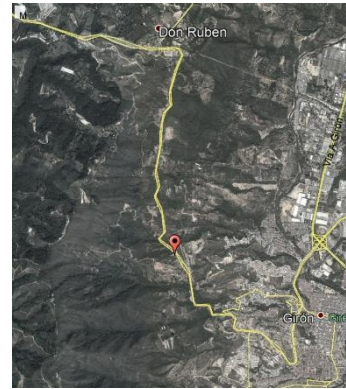
Movimiento en masa IV

Datos del Registro:

Fecha del Evento: 07/09/2008 *
Fecha de diligenciamiento: 06/06/2018
Institución: Escuela de Geología UIS
Importancia: MEDIA
Encuestador: David Afanador
*Nota: * reportado por SIMMA*

Localización Geográfica:

Departamento: SANTANDER
Municipio: GIRÓN
Vereda: Carrizal
Altura: 889 m
Sitio: Pie del movimiento
Referentes Geográficos: Vereda Carrizal, vía aeropuerto, después del segundo retorno, 50 metros adelante.
Abcisado: Km 67 + 150
Latitud: 7,080770°
Longitud: -73,185267°



Tomado de: Google Earth, 2018

Planchas:

Plancha: 120 II A 4
Fuente: IGAC
Escala: 1:10000

Actividad del Movimiento:

Edad: [6 - 10] Años
Distribución: Avanzado
Estilo: Único
Estado: Latente

Litología y Estructura:

Tipo de Plano	Dir. Buzamiento	Buzamiento	Espaciamiento
P. Estratificación	54	52	
P. Diaclasamiento	220	54	

Descripción: Areniscas y limolitas intercaladas de la Formación Girón.

Clasificación del Movimiento:

Primer Movimiento

Tipo Movimiento: Deslizamiento
Subtipo Movimiento: Deslizamiento traslacional en cuña
Plasticidad:
Tipo Depósito:
Tipo Material: Detritos
Humedad: Seco
Origen de Suelo: Sedimentario

Morfometría General y Dimensión del Terreno:

Morfometría General	valor	Dimensión del Terreno	valor
Diferencia de altura corona a punta(m)	15 – 16	Ancho de la masa desplazada Wd(m)	22
Longitud horizontal corona a punta (m)	8	Longitud total L (m)	20

Geoforma:

Ladera denudacional moderada a abrupta

Causas del Movimiento:

Tipo	Causa
Inherente	Material Meteorización-Física
Inherente	Material fisurado o agrietado
Inherente	Orientación desfavorable de discontinuidades
Contribuyente	Erosión Pluvial
Detonante	Lluvias (24h:N/D 48h: N/D 72h: N/D Mes: N/D)

Tipo de Erosión:

Superficial: Laminar
 Fluvial:
 Estado: Moderada

Edad: Antigua
 Subsuperficial:
 Eólica:

Cobertura y Uso de Suelo:

Cobertura	%	Uso	%
Sin cobertura	20	Vías	15
Rastrojo Bajo	30	Sin uso	85
Matorrales	50		

Referencias:

Autor	Título	Año	Editor
<u>SIMMA</u>	REPORTE DETALLADO DEL MOVIMIENTO EN MASA REGISTRO DE INVENTARIO	2008	

Daños:

Población Afectada:

Muertos: 0

Heridos: 0

Daños ambientales, a infraestructura y/o actividades económicas:

Clase de Daño	Clasificación	Tipo de Daño
Infraestructura	DL: Daño leve	Carretera

Anexo Fotografico:

Fecha: 18/09/2017

Autor: David Afanador

Observaciones:

Fotografía**Movimiento en masa V****Datos del Registro:**

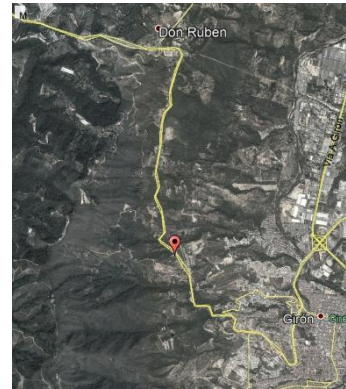
Fecha del Evento: 11/06/2017*
Fecha de diligenciamiento: 06/06/2018
Institución: Escuela de Geología UIS

Importancia: MEDIA
Encuestador: David Afanador

*Nota: * registrado por el autor*

Localización Geográfica:

Departamento: SANTANDER
Municipio: GIRÓN
Vereda: Carrizal
Altura: 889 m
Sitio: Pie del movimiento
Referentes Geográficos: Vereda Carrizal, vía aeropuerto, sobre el segundo retorno, en la ladera interna.
Abcisado: Km 67 + 210
Latitud: 7,079608
Longitud: -73,184874°



Tomado de: Google Earth, 2018

Planchas:

Plancha: 120 II A 4
Fuente: IGAC

Escala: 1:10000

Actividad del Movimiento:

Edad: <1 Año
Distribución: Avanzado

Estilo: Único
Estado: Latente

Litología y Estructura:

Descripción: Materiales inconsolidados de coluvión y productos de terracedo de laderas

Clasificación del Movimiento:

Primer Movimiento

Tipo Movimiento: Flujo
Subtipo Movimiento: Flujo de Detritos
Plasticidad:
Tipo Depósito: Cono de deyección de detritos

Tipo Material: Detritos
Humedad: Humedo
Origen de Suelo: Sedimentario

Morfometría General y Dimensión del Terreno:

Morfometría General	valor	Dimensión del Terreno	valor
Diferencia de altura corona a punta(m)	30	Ancho de la masa desplazada Wd(m)	5
Longitud horizontal corona a punta (m)	50	Longitud total L (m)	40

Geoforma:

Ladera denudacional moderada a abrupta y ladera terraceda en la parte superior

Causas del Movimiento:

Tipo	Causa
Inherente	Material Meteorización-Física
Inherente	Terreno inicialmente Humedo
Inherente	Ausencia de cobertura vegetal
Inherente	Materiales inconsolidados
Inherente	Pendiente de las laderas
Contribuyente	Erosión Pluvial
Detonante	Lluvias

Tipo de Erosión:

Superficial: Laminar
 Fluvial:
 Estado: Moderada

Edad: Antigua
 Subsuperficial:
 Eólica:

Cobertura y Uso de Suelo:

Cobertura	%	Uso	%
Sin cobertura	80	Vías	5
Rastrojo Bajo	10	Sin uso	95
Matorrales	10		

Referencias:

Autor	Título	Año	Editor

Daños:

Población Afectada: Muertos: 0
 Heridos: 0

Daños ambientales, a infraestructura y/o actividades económicas:

Clase de Daño	Clasificación	Tipo de Daño
Infraestructura	DL: Daño muy leve	Carretera

Anexo Fotografico:

Fecha: 11/06/2017
Autor: David Afanador
Observaciones:

Fotografía

