CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA (CDMB)

CARACTERIZACION GEOTECNICA ZONAS AFERENTES AL SALÓN COMUNAL DEL BARRIO BUENAVISTA MUNICIPIO DE BUCARAMANGA - SANTANDER



CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN ZONAS PRIORIZADAS DEL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA, DEFINIDAS POR LA CDMB, COMO APOYO AL CUMPLIMIENTO DE ÓRDENES, ACCIONES JUDICIALES Y ACTUACIONES PREVENTIVAS DE LOS ÓRGANOS DE CONTROL RELACIONADAS CON LA GESTIÓN DEL RIESGO.

CDMB
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA

TABLA DE CONTENIDO

1. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA 4

1.1. METODOLOGIA 4
1.2. EXPLORACION GEOTECNICA 5
2. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D # 1 7

2.1. INTRODUCCIÓN 7
2.2. OBJETIVOS 7
2.3. LOCALIZACIÓN GENERAL 8
EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO 9

2.4. LOCALIZACIÓN DE LA LÍNEA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 9
EXPLORACIÓN DE CAMPO 11

2.5. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 11
2.6. PROCEDIMIENTO EN CAMPO 11
2.7. TIPO DE ARREGLO 12
2.8. EQUIPO DE TRABAJO 13
2.9. ENSAYO TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA LÍNEA LGE1 14
INTERPRETACIÓN TOMOGRAFÍA GEOELÉCTRICA LGE1 14
CONCLUSIONES 16

3. REFRACCIÓN SÍSMICA 2D 17

3.1. INTRODUCCIÓN 17
3.2. OBJETIVOS 17
3.3. LOCALIZACIÓN GENERAL 18
EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO 18

3.4. LOCALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA 18
EXPLORACIÓN DE CAMPO 20

3.5. EXPLORACIÓN MEDIANTE LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA 20
PARÁMETROS DE REGISTRO Y MUESTREO DE LA REFRACCIÓN SÍSMICA 21
3.6. ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW) 22
PARÁMETROS DE REGISTRO Y MUESTREO 23
3.7. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 25
3.8. EQUIPO DE TRABAJO 26
RESULTADOS OBTENIDOS 26

3.9. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS 26
3.10. CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN NSR-10 27
3.11. ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA LÍNEA LRS1 28
CONCLUSIONES 29

4. ANALISIS GEOLÓGICO 30

4.1. METODOLOGÍA 31

4.2. GEOLOGÍA 32

4.2.1. GEOLOGÍA REGIONAL 33

4.2.2.UNIDADES GEOLÓGICAS DE INGENIERÍA (UGI) 43
4.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL 45
4.3.1. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DE COLOMBIA 45
4.3.2. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER 46
5. GEOMORFOLOGÍA 48
5.1. MORFOGÉNESIS 49
5.2. MORFOMETRÍA 49
5.2.1. PENDIENTES 49
5.2.2. CURVATURA 51
5.2.3. RUGOSIDAD 52
5.3. MORFODINÁMICA 53
5.4. ELEMENTOS GEOMORFOLOGICOS 54
5.4.1. GEOFORMAS DE ORIGEN DENUDACIONAL 54
5.4.2. GEOFORMAS DE ORIGEN ANTRÓPICO 55
6. REGISTRO FOTOGRAFICO 58
7. RESULTADOS 64
7.1. PERFILES ESTRATIGRÁFICOS 64
7.2. ENSAYOS DE LABORATORIO 70
RESULTADO DEL MODELO GEOLOGICO – GEOTECNICO 70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72

1. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

1.1. METODOLOGIA

La metodología adoptada corresponde a un enfoque semiempírico, en el cual la caracterización del medio se fundamenta en un componente empírico predominante, apoyado en el juicio experto del geotecnista para la selección y jerarquización de los parámetros representativos del comportamiento del subsuelo, la definición de sus dominios de variabilidad y la estructuración del modelo de integración, correlación y ponderación entre variables.

La cuantificación de dichos parámetros se establece en la interpretación y procesamiento de los resultados derivados de las campañas de exploración in situ, ensayos de laboratorio y prospección geofísica, ejecutados conforme a los protocolos técnicos aplicables durante el desarrollo del estudio.

El proceso metodológico general se presenta en la ilustración 1 y se estructura en una actividad integral de caracterización. Esta se derivará de la investigación del subsuelo mediante la aplicación combinada de métodos directos de exploración y técnicas indirectas de prospección geofísica, cuyos resultados serán integrados para la definición del modelo del medio estudiado.

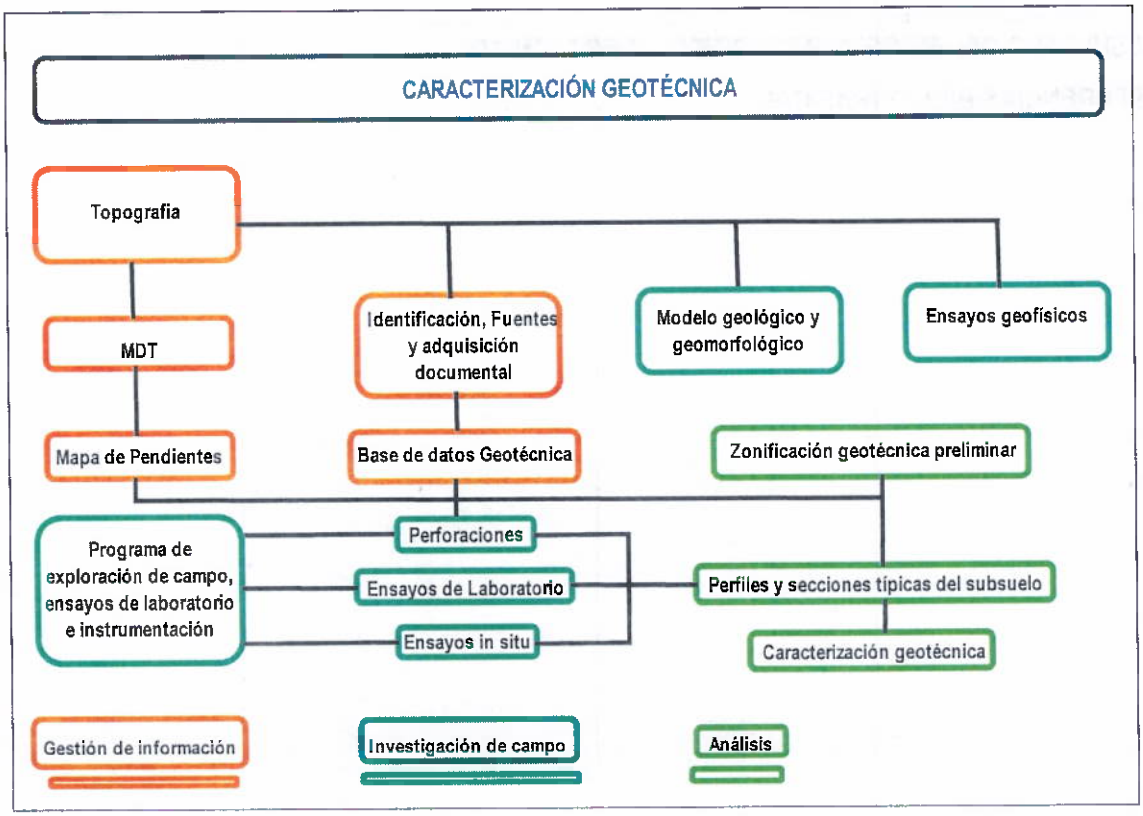


Ilustración 1 Metodología general para la caracterización geotécnica.

1.2. EXPLORACION GEOTECNICA

Las exploraciones realizadas en el lugar de estudio fueron ejecutadas, para ello se planteó una investigación compuesta por tres sondeos que se realizaron de la siguiente manera:



Ilustración 2 Localización de sondeos. Fuente: Autores

Tabla 1. Localización de sondeos y apiques.

Exploracion Geotecnica				
Exploracion	Norte	Este	Norte	Este
Apique 1	7.12882089	-73.0936395	1280188.27	1108687.89
Apique 2	7.128818	-73.093751	1280187.94	1108675.57
Apique 3	7.127843	-73.093899	1280080.06	1108659.45
Sondeo 1	7.12882288	-73.0938034	1280188.45	1108669.77
Sondeo 2	7.127847	-73.09387	1280080.51	1108662.65
Sondeo 3	7.128573	-73.093005	1280161.01	1108758.05

Fuente: Trabajos de campo.

Para la localización de los sondeos y apiques, se basó en métodos de observación, en los cuales se determinaron los lugares de exploración por factores como:

- Fácil acceso al lugar de exploración.
- Cercanía de servicio de agua para la refrigeración durante la perforación.
- Cercanía a bordes de lomos y escarpes
- Zonas cercanas a pie de taludes.
- Lugares de intercambio de unidades geológicas superficiales.
- Zonas donde se evidencie afectación por erosión superficial o posibles fenómenos de movimientos en masa

Como se mencionó anteriormente, las exploraciones de campo se realizaron a rotación y percusión, por lo cual la se usó el siguiente equipo:

- Equipo de perforación marca PETTY, motor diésel Ruggerini 24 HP.
- Motobomba para lodos.
- 30 metros de tubería BW-AW.
- Tubería de revestimiento NW.
- Torre de perforación (trípode).
- pesa de 140 libras, 1 contrapesa.
- Dos diferenciales para extraer los núcleos,
- 10 metros de tubería de perforación AW,
- 3 muestreadores cuchara partida estándar (split spoon) y lazo.
- Llaves de tubo de 24 y 36".
- Muestreador de pared delgada U-100.
- Barrena con broca en tricono diamantada.

Durante la exploración mecánica, efectuada, se recolecta una serie de muestras para aplicar ensayos de laboratorio, los cuales se muestran en el capítulo 6.2.

2. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D # 1

2.1. INTRODUCCIÓN

Las tomografías Geoeléctricas son un método geofísico económico que permite interpretar el subsuelo utilizando corriente eléctrica y midiendo de las variaciones de resistividad; para posteriormente interpretar los cambios como los diversos tipos de litologías.

Útil para detección de interfaces entre cuerpos de distinta resistividad, tales como depósitos aluviales y roca, depósitos saturados (prospección de agua), y depósitos de diversos tamaños de grano.

El resultado final de este tipo de estudio es una sección en profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos.

Para este estudio se realizó una tomografía eléctrica, con el objeto de determinar zonas con mayor conductividad favorables para la detección de niveles aguas superficiales y exploración geotécnica.

2.2. OBJETIVOS

GENERAL

Determinar mediante estudios geofísicos, el perfil estratigráfico del suelo en profundidad en el área de estudio obteniendo información básica de la resistividad y las velocidades de onda con el objeto de determinar zonas con mayor conductividad favorables para la detección de niveles aguas superficiales y exploración geotécnica.

ESPECÍFICOS

- Adquirir una tomografía eléctrica para la prospección del subsuelo.
- Realizar en los puntos adecuado la tomografía Geoeléctrica, con el objetivo de identificar los extractos del suelo y las velocidades de onda.

- Elaborar un modelo Geoeléctrico y de velocidades de las capas del subsuelo en los puntos seleccionados, con el fin de determinar los niveles freáticos, acuíferos presentes, espesores y sus profundidades estimadas.

2.3. LOCALIZACIÓN GENERAL

El proyecto se encuentra localizado en el sector Buenavista al frente de la escuela primaria Oriente Miraflores sede E en la zona rural del municipio de Bucaramanga en el departamento de Santander.

Ilustración 3 Localización geográfica de la tomografía eléctrica.



Fuente: Localización general del área de Estudio tomada de Google Earth 2025

EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

2.4. LOCALIZACIÓN DE LA LÍNEA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Las coordenadas de las líneas tomografía eléctrica se presentan en la tabla 1, en coordenadas geográficas.

Tabla 2. Coordenadas de inicio y fin de la línea de tomografía eléctrica.

LÍNEA	COORDENADAS			
	INICIO		FIN	
	latitud	longitud	latitud	longitud
TOMO 1	7° 7'39.75"N	73° 5'37.17"O	7° 7'42.62"N	73° 5'36.00"O

Ilustración 4 Localización de la unidad central de la tomografía eléctrica.







Fuente autores.

EXPLORACIÓN DE CAMPO

2.5. Tomografía eléctrica

El método de tomografía eléctrica (TE) en dos dimensiones es una técnica de investigación de resistividad (res) de áreas con anomalías complejas (resistivas o conductivas), donde los empleos de otras técnicas no permiten obtener información de detalle en 2D a profundidades someras y moderadamente profundas. La Tomografía eléctrica consiste en obtener una serie de medidas de resistividades aparente con un microdispositivo tetraelectródico determinado con una separación constante entre electrodos denominada "a", por lo que (aumentar) las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado "n", de tal forma que el resultado final será una sección de resistividades aparentes a varios niveles "n" en profundidad. Estos datos necesariamente deben ser tratados por algoritmos matemáticos para llegar a obtener una imagen de res-profundidad verdadera, proceso denominado inversión.

La Tomografía eléctrica tiene por objetivo específico determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo en el ámbito comprendido entre dos sondeos o bien hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua.

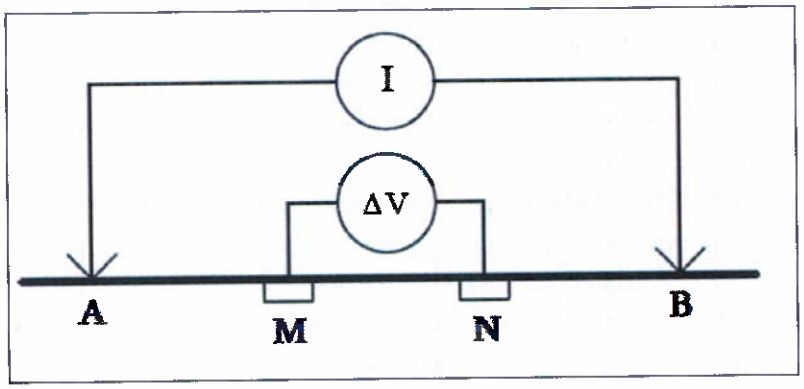
El resultado obtenido mediante la técnica de Tomografía es una imagen geo eléctrica o sección de alta resolución con una muy buena aproximación del modelo de resistividades y profundidades verdaderas del subsuelo, resultado que puede ser, en la mayoría de los casos, correlacionado y constatado con las observaciones de campo, información geológica, perforaciones, calicatas mecánicas, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc.

2.6. Procedimiento en campo

La toma de datos en campo se trabajó con el arreglo Wenner Y Schlumberger, el cual consiste en un espaciamiento entre los electrodos C1-C2 y electrodos potenciales P1-P2. (Ver Figura 5). La relación de la distancia entre los electrodos C1 y P1 para separaciones con este dispositivo se conoce como "a" este se mantiene a medida que aumenta las aperturas, al aumentar los espaciamientos entre electrodos van disminuyendo los datos en profundidad. Para el dispositivo Wenner el factor geométrico (k) es igual 2πa y para el arreglo schlumberger $k = \pi \frac{(AB/2)^2-(MN/2)^2}{MN}$ la constante geométrica de wenner tiene una fortaleza significativa en la señal en comparación a otros arreglos en entornos con ruido de fondo alto más sin embargo el schlumberger tiene una buena fortaleza en vertical.

Se procedió con el tendido del cable de adquisición y puesta de los electros en el sitio, luego de la instalación se adquirieron unas secuencias de medidas para obtener una matriz de resistividades aparentes.

Ilustración 5 Muestra esquemática de un arreglo tetra-electrónico.



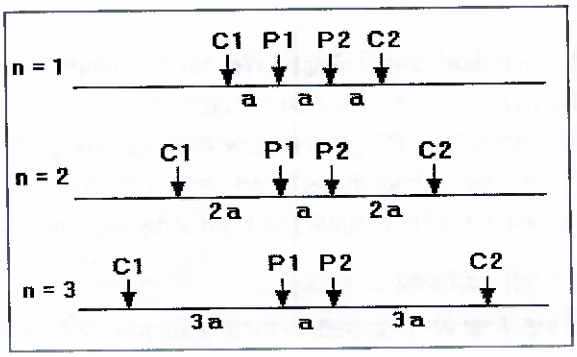
Fuente: Autores.

2.7. Tipo de arreglo

El arreglo Schlumberger es empleado tanto para el ensayo del sondeo eléctrico vertical y de tomografía. Este consiste en colocar los electrodos de medida de potencial separados una distancia a desde el centro del arreglo y en los extremos, cada electrodo de medida de corriente a una distancia na desde el electrodo de potencial más cercano.

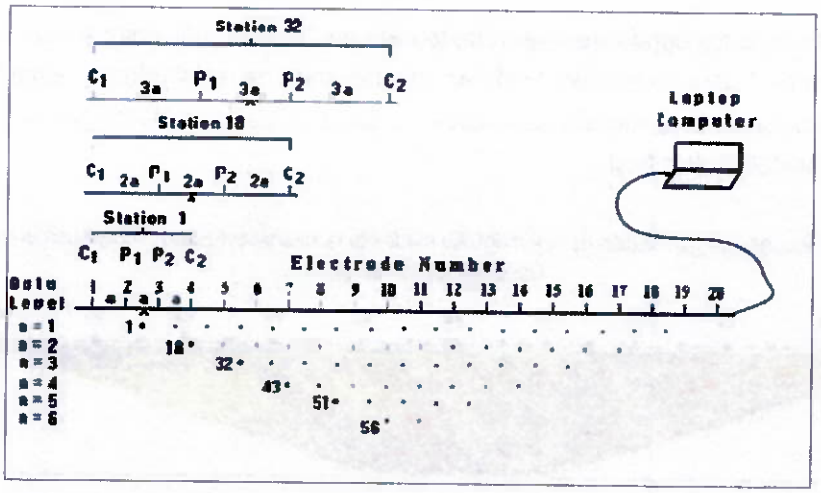
En el sondeo eléctrico vertical, la distancia P1P2 (electrodos de potencial eléctrico) mantiene su distancia a y la distancia C1P1 y P2C2 va aumentando en un múltiplo de a.

Ilustración 6 Esquema del arreglo Schlumberger para el sondeo eléctrico vertical (SEV) (Loke, 2020).



Fuente: Autores.

Ilustración 7 Dispositivo electródico para prospecciones y secuencia de medidas.



Fuente: Autores

2.8. Equipo de trabajo

El equipo que se utilizó en campo para la adquisición de los datos fue el GEOAMP 203 este cuenta con cuatro canales de salida para A, B, M Y N que se conectan unida de multiflexado y cables de cables de adquisición lo que permite la toma de las diferentes medidas del subsuelo.

Ilustración 8 Unidad sismógrafo digital y de tomografía electica.

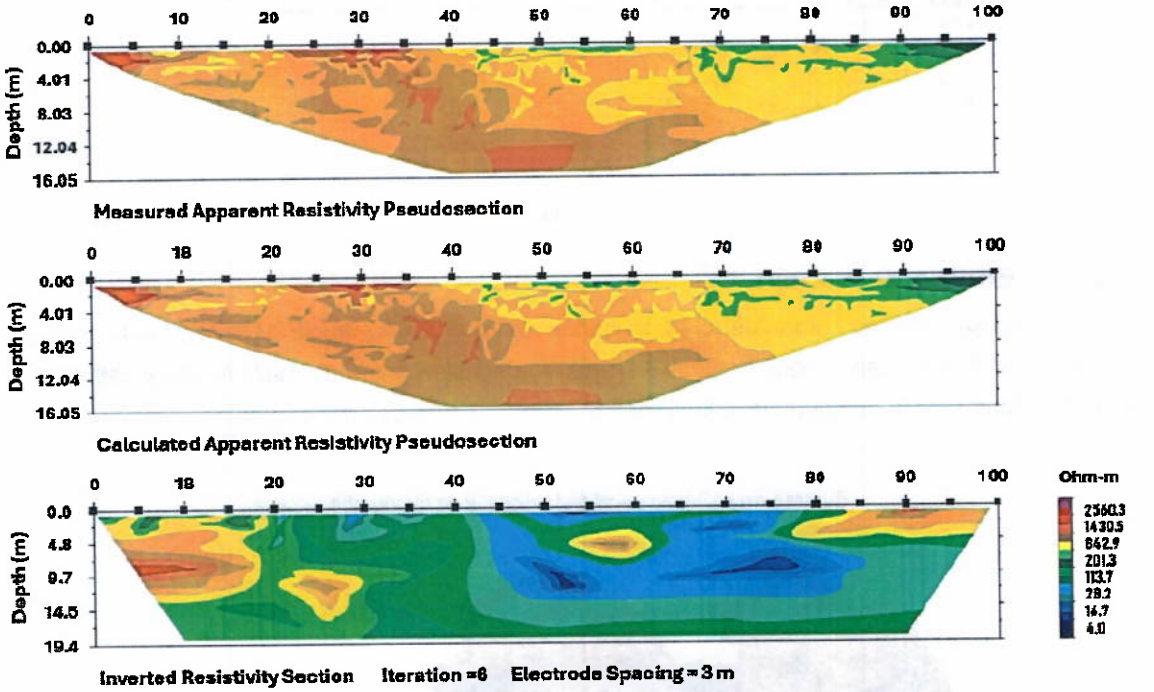


Equipo ABEM TERRAMETER LS 2 fabricado por la empresa Guideline Geo. Es un equipo multicanal portátil, medidor de resistividad del subsuelo e IP, con almacenamiento de lecturas en memoria con ciclos de medidas definidos por el usuario. El equipo cuenta con 2 canales de adquisición y 48 electrodos.

2.9. ENSAYO TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA LÍNEA LGE1

Para el desarrollo de la tomografía se realizó un tendido de 24 electrodos a separación de 3 m con una apertura total de 100 m de tendido donde se adquirió datos de resistividades aparentes para el proceso de generación de la tomografía se apilaron los datos de los dos métodos con el fin conseguir la mejor resolución del modelo final.

Ilustración 9 Proceso de generación de la tomografía mediante la inversión método schlumberger tomografía Geoeléctrica línea LGE1.



Interpretación tomografía Geoeléctrica LGE1

La tomografía fue adquirida en el sector Buenavista al frente de la escuela primaria Oriente Miraflores sede E en la zona rural del municipio de Bucaramanga en el departamento de Santander, su resistividad invertida y en la sección a analizar e interpretar fue posible apreciar registro de resistividad eléctrica desde de 4 Ω*m a 2560,3 Ω*m con una profundidad de investigación de 24 metros.

La región superficial corresponde a una capa de geometría irregular y distribución discontinua, de espesor variable, entre 3m a 9 m, con registro en el valor de resistividades entre 4Ω*m y 28.2Ω*m. Esta primera capa se localiza en el sector urbanizado del área de estudio, donde el suelo residual, ha sido modificado por cortes, nivelaciones y rellenos para la construcción de vías y viviendas. Luego, en contacto lateral e infrayacente, se identifica una capa de espesor variable entre 4m y 15m (el total es

desconocido) con un contraste en el valor de la resistividad, con registros mayores a 28.2 Ω*m, interpretado como material residual desarrollado por meteorización profunda del basamento metamórfico de la formación Bucaramanga, es un suelo arcillo-limoso a arcillo-arenoso.

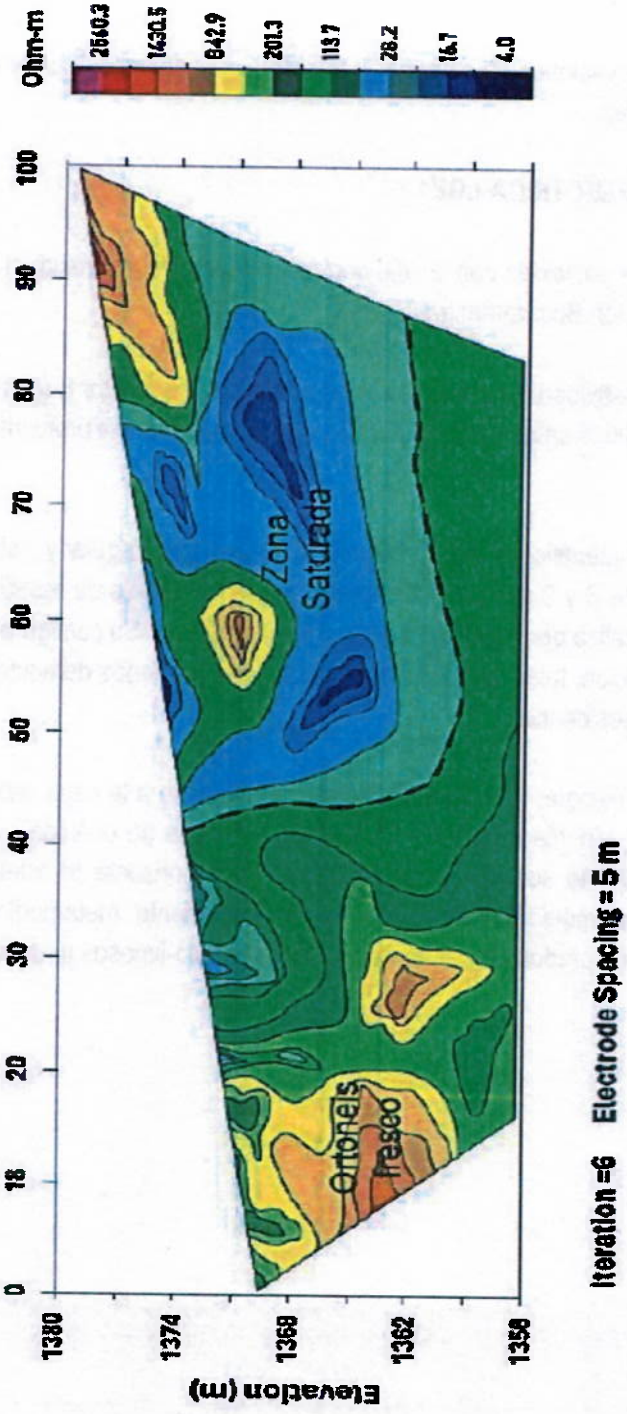


Ilustración 10 Perfil tomografía de resistividad eléctrica LGE1

CONCLUSIONES

De acuerdo con las observaciones de campo y la interpretación de la línea de tomografía 1 se tienen las siguientes conclusiones.

- **TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA LGE1**

Los resultados geofísicos coinciden con la UGI correspondiente a suelo residual sobre gneis cuarzo-feldespático de la formación Bucaramanga (Srgfb).

Alcance y Rango de Resistividad: La prospección geoeléctrica en el sector Buenavista registró valores de resistividad comprendidos entre 4 Ω·m y 2560,3 Ω·m, alcanzando una profundidad de investigación efectiva de 24 metros.

Horizonte Superficial: Se identificó una capa superior de geometría irregular y distribución discontinua, cuyo espesor oscila entre 3 y 9 metros. Esta unidad presenta valores de resistividad bajos (entre 4 Ω·m y 28,2 Ω·m) y se localiza principalmente en la zona urbanizada. Su configuración actual responde a procesos de antropización, tales como nivelaciones, cortes y rellenos derivados de la construcción de infraestructura vial y residencial.

Unidad Infrayacente y Litología: En contacto lateral y subyacente a la capa superficial, se reconoce una unidad de espesor variable (entre 4 y 15 metros, con base no definida), caracterizada por un incremento en la resistividad superior a los 28,2 Ω·m. Este horizonte se interpreta como material residual producto de la meteorización profunda del basamento metamórfico de la Formación Bucaramanga, compuesto predominantemente por suelos arcillo-limosos a arcillo-arenosos.

3. REFRACCIÓN SÍSMICA 2D

3.1. INTRODUCCIÓN

El presente informe contiene los resultados del análisis de la información geofísica, adquirida mediante ensayos de refracción sísmica, en el municipio de Bucaramanga, departamento de Santander.

Los métodos sísmica se basan en la medición de variaciones de velocidad de propagación de ondas de choque, producidas de forma natural o artificial, con los cuales se puede obtener una imagen aproximada de la estratigrafía del terreno. Los métodos sísmicos más utilizados son Up-Hole, Down-Hole y Cross-Hole; MASW, SASW, Método de reflexión y refracción sísmica. Así, en este estudio se utiliza el método de Refracción Símica y MASW; a continuación, se describen los conceptos básicos utilizados en la propagación de ondas.

3.2. OBJETIVOS

GENERAL

Realizar exploración geofísica, mediante ensayos de refracción sobre en el sector del barrio Buenavista del municipio de Bucaramanga.

ESPECÍFICOS

- Adquirir una línea de refracción sísmica para la prospección del subsuelo en el barrio Buenavista.

- Analizar la información geofísica, adquirida mediante ensayos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales – MASW2D, en el municipio de Bucaramanga, departamento de Santander,

3.3. LOCALIZACIÓN GENERAL

El proyecto se encuentra localizado en el sector Buenavista al frente de la escuela primaria Oriente Miraflores sede E en la zona rural del municipio de Bucaramanga en el departamento de Santander.

Ilustración 11 Localización geográfica de la refracción sísmica.



Fuente: Localización general del área de Estudio tomada de Google Earth 2025

EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

3.4. LOCALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA

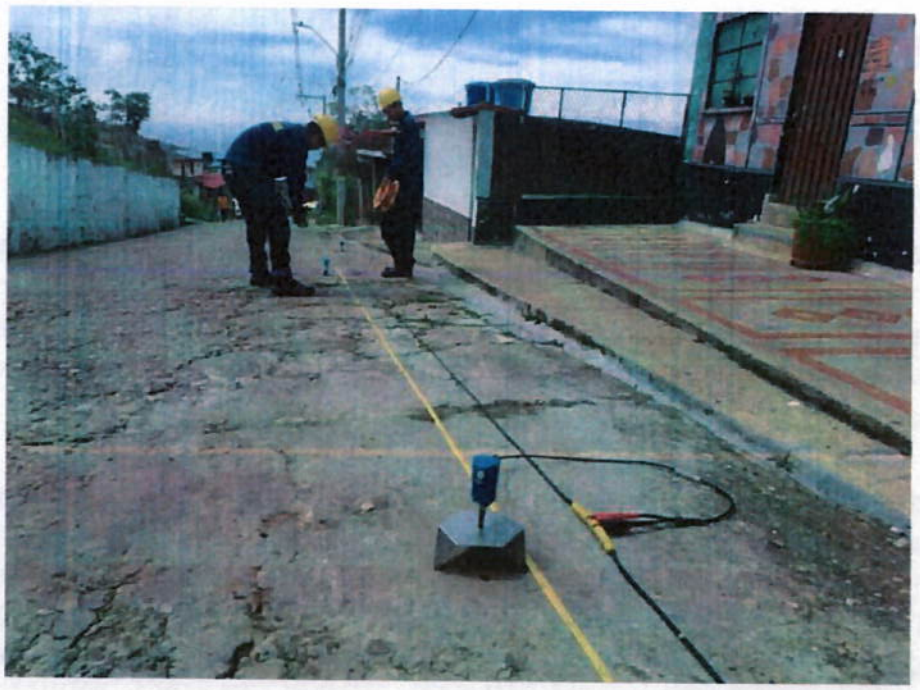
Las coordenadas de las líneas de refracción sísmica se presentan en la tabla 1, en coordenadas geográficas.

Tabla 3. Coordenadas de inicio y fin de la línea de refracción.

LINEA	COORDENADAS			
	INICIO		FIN	
	latitud	longitud	latitud	longitud
LRS	7° 7'40.04"N	73° 5'37.09"O	7° 7'42.42"N	73° 5'36.17"O

Ilustración 12 Localización de la unidad central en los diferentes puntos de las líneas de refracción sísmica.







Fuente imagen tomada de Google Earth 2025 y autores.

EXPLORACIÓN DE CAMPO

3.5. EXPLORACIÓN MEDIANTE LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA

El ensayo de refracción se basa en el registro de los frentes de onda, generados por una fuente artificial de energía, leyendo en los registros los tiempos de los primeros arribos. Estos pueden deberse a la onda directa o bien a aquellas ondas que se refractan en el subsuelo con ángulo crítico, viajan por la interfaz con la velocidad del medio infrayacente y retornan hacia la superficie como ondas frontales (head waves).

El instrumental necesario para emplear este método consiste básicamente en alguna fuente de energía (martillo, explosivo, vibrador, cañón de aire, etc.), receptores o sismómetros (geófonos en tierra) y un sismógrafo donde acondiciona, graba y gráfica la información. Los registros tienen información de los movimientos del terreno en función del tiempo y son conocidos como sismogramas. El objetivo es determinar espesores de las capas del subsuelo, sus buzamientos y las velocidades de propagación de las ondas sísmicas en cada una de ellas.

La sísmica se utiliza generalmente para encontrar la profundidad de la roca y para estimar el proceso de excavación de suelos y rocas.

Entre las limitaciones de este método se destaca el contraste entre la facilidad para determinar la velocidad de ondas primarias o de compresión (Vp) en relación con la dificultad para evaluar la velocidad de ondas secundarias o de corte (Vs), además, sólo es posible detectar con confiabilidad estratos con rigidez progresivamente mayores con la profundidad que tengan un contraste de velocidad bien definido.

Adicionalmente para el caso de investigaciones urbanas, el método está limitado por la disponibilidad de zonas descubiertas con suficiente extensión y las limitaciones que producen vibraciones ambientales (ruido) para la adecuada identificación del tiempo de arribo de las señales. La longitud del tendido en superficie está directamente relacionada con el alcance de la exploración en profundidad.

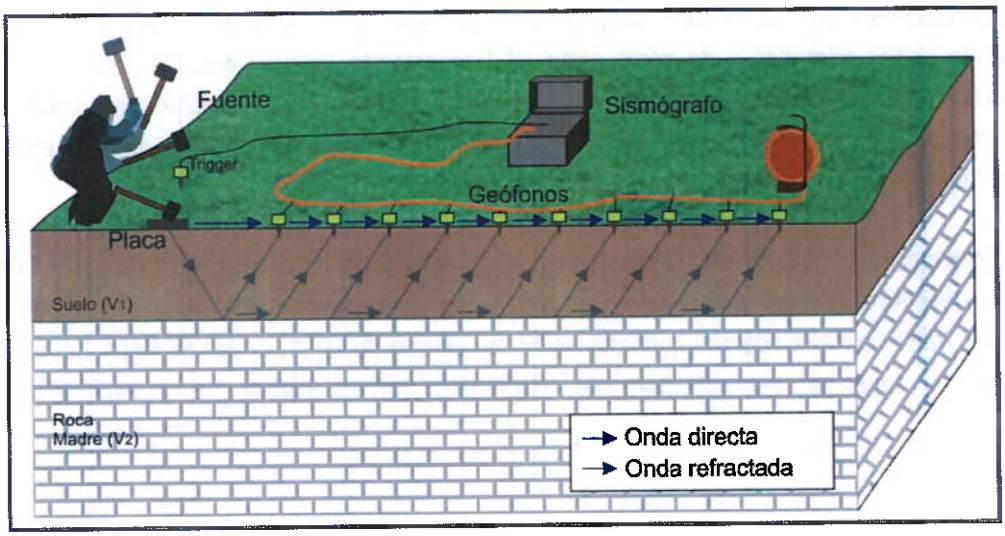
Parámetros de registro y muestreo de la refracción sísmica

El ensayo de refracción sísmica método de fuente activa, es un método de campo desarrollado para investigación del subsuelo somero lo cual para la fase de adquisición de campo se trabajó con los siguientes parámetros:

Tabla 4. Parámetros de adquisición para refracciones sísmicas.

Parámetros	Descripción
Mediciones	Vp
Tamaño de arreglo	69 metros
Arreglo geométrico	Lineal
Número total canales	24
Intervalo entre geófonos	3 m
Tipo de geófono	10 HZ
Ganancia de preamplificación	24 db
Filtros	No
tiempo de muestreo	0.125 ms
tiempo de registro	0.5 s
Fuente	Activa
fuente de energía	porra de 18 lb
Formato de grabación	Archivo .dat - SEG 2

Ilustración 13 Representación de una adquisición de sísmica de refracción. Se observan las ondas generadas a partir de la fuente de energía (golpe de un martillo).



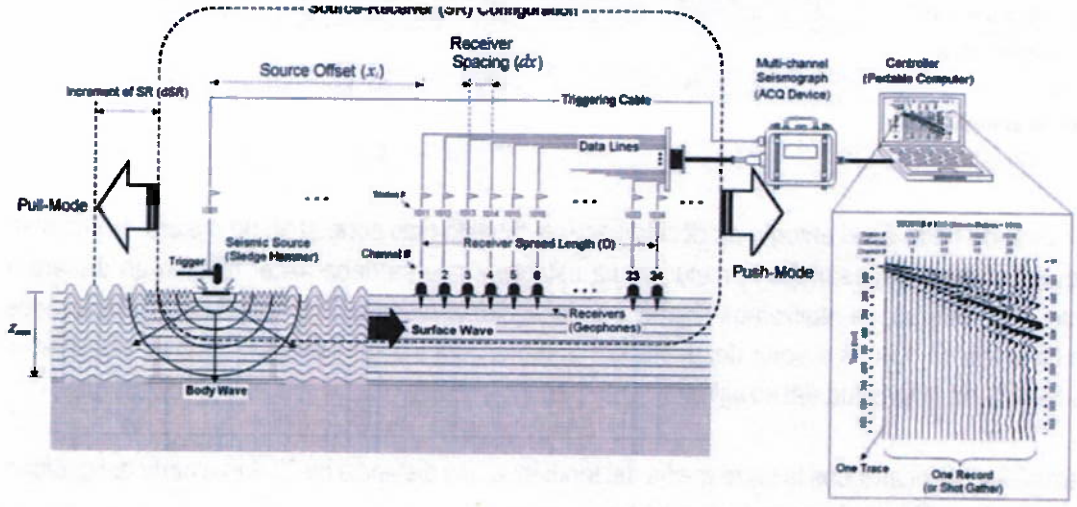
3.6. ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

La técnica multicanal de ondas superficiales MASW ha sido desarrollada para optimizar el concepto del método SASW, el cual ha sido aplicado desde los mediados de los años 1980, usando el análisis espectral del ground roll, generado por una fuente impulsiva y grabado por un par de receptores de baja frecuencia (1-4.5 Hz), ubicados a distancia variables entre sí. En cambio, el método MASW utiliza los registros simultáneos de 12 o más receptores en distancias cortas (1-5 m) o largas (50-100 m), energizados por una fuente impulsiva o vibratoria, que proporcionan una redundancia estadística para medir velocidades de fase.

Los datos multicanales muestran un formato de frecuencia variable con el tiempo, además permiten la identificación y rechazo de modos no fundamentales de ondas Rayleigh y otro ruido coherente, elementos que representan las limitaciones del SASW.

La configuración de campo básica y la rutina de adquisición para el MASW generalmente es la misma que se usa en los estudios convencionales refracción y de CMP (Punto Medio Común) con reflexiones de ondas corporales como se muestra en la siguiente figura x. Es un método sólido cuya única limitación, en su forma activa, es representada por la necesidad de una fuente apropiada que, como en el caso de la refracción, garantice la llegada de la señal a los últimos geófonos. Esto claramente limita el largo de los tendidos y por ende la profundidad de investigación. El desarrollo de configuraciones pasivas (especialmente la lineal), ofrece mayor flexibilidad y una parcial solución al problema (Park et al., 1999).

Ilustración 14 Método sísmico MASW.



Fuente: Linares, 2005.

Si los datos de ondas superficiales son adquiridos en forma de CMP, se puede generar una sección 2D de velocidades de onda S, mediante un mallado en el programa computacional, colocando cada perfil de onda S (Vs versus profundidad) en el medio del tendido del geófono con el cual fue calculado.

El método MASW no sólo provee velocidades precisas de onda S cercanas a la superficie, sino también es la única forma sísmica superficial para obtener información de velocidades de onda S en algunos escenarios geológicos (Xia et al., 2000).

Parámetros de registro y muestreo

El ensayo MASW 1D (Análisis multicanal de ondas superficiales), método de fuente activa, es un método de campo desarrollado para investigación del subsuelo somero lo cual para la fase de adquisición de campo se trabajó con los siguientes parámetros:

Tabla 5. Parámetros de adquisición de masw1D.

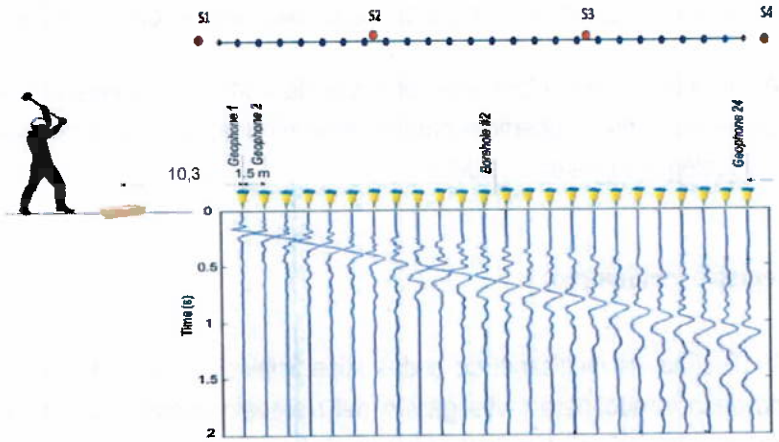
Parámetros	Descripción
Mediciones	Velocidad de fase de las ondas Rayleigh
Tamaño de arreglo	69 m
Arreglo geométrico	Lineal
Número total canales	24
Intervalo entre geófonos	3 m
Tipo de geófono	4,5 HZ
Ganancia de preamplificación	24 db

Filtros	No
tiempo de muestreo	0.5000 ms
tiempo de registro	2 s
Fuente	Activa
fuente de energía	porra de 18 lb
Formato de grabación	Archivo .dat - SEG 2

Por el tema de ruido en el entorno se decido hacer el tendido más corto el fin de mejorar la señal en la adquisición para el desarrollo la metodología establece que se debe hacer mínimo un disparo o impacto, sin embargo, se realizamos disparos de la siguiente manera; Disparos S1 y S4, localizados a una distancia de 13.8 m a partir del geófono 1 y geófono 24 hacia el exterior como se indica en la figura 8 (15% de la longitud del arreglo).

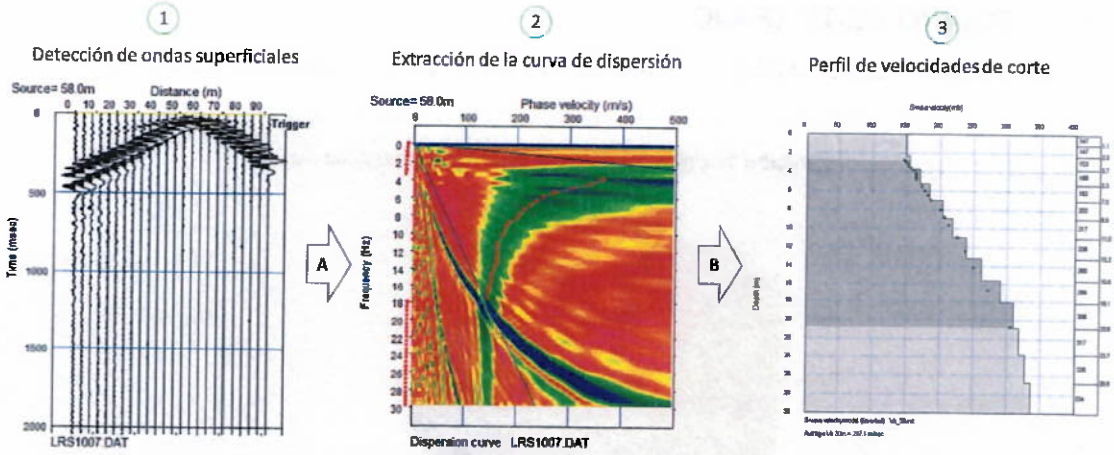
Disparos S2 y S3 localizados la parte media del tendido, a una distancia de 27.4 m a partir del geófono 1 y geófono 24 (30% de la longitud del arreglo).

Ilustración 15 Arreglo lineal ensayo Masw1D con cuatro Stacking en el tendido.



Se utiliza el software SeisImager/SW, el cual permite que se combinen curvas de dispersión activas y pasivas para una mejor resolución a lo largo de todas las profundidades de investigación. El software SeisImager/SW automáticamente calcula la curva de dispersión e invierte modelos de curva Vs con el mejor ajuste a los datos observados.

Ilustración 16 Flujo de procesamiento ensayos MASW 1D



A: Transformadas del dominio de tiempo al dominio de las frecuencias.
B: Modelado inverso

3.7. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

El método de tomografía eléctrica (TE) en dos dimensiones es una técnica de investigación de resistividad (res) de áreas con anomalías complejas (resistivas o conductivas), donde los empleos de otras técnicas no permiten obtener información de detalle en 2D a profundidades someras y moderadamente profundas. La Tomografía eléctrica consiste en obtener una serie de medidas de resistividades aparente con un microdispositivo tetraelectródico determinado con una separación constante entre electrodos denominada "a", por lo que (aumentar) las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado "n", de tal forma que el resultado final será una sección de resistividades aparentes a varios niveles "n" en profundidad. Estos datos necesariamente deben ser tratados por algoritmos matemáticos para llegar a obtener una imagen de res-profundidad verdadera, proceso denominado inversión.

La Tomografía eléctrica tiene por objetivo específico determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo en el ámbito comprendido entre dos sondeos o bien hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua.

El resultado obtenido mediante la técnica de Tomografía es una imagen geo eléctrica o sección de alta resolución con una muy buena aproximación del modelo de resistividades y profundidades verdaderas del subsuelo, resultado que puede ser, en la mayoría de los casos, correlacionado y

constatado con las observaciones de campo, información geológica, perforaciones, calicatas mecánicas, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc.

3.8. EQUIPO DE TRABAJO

Sismógrafo GeodeTM, de 12 canales, 12 geófonos o sensores con frecuencia pico de 4.5 Hz

Ilustración 17 Unidad sismógrafo digital y de tomografía electica.



Un Sismógrafo GeodeTM, de 12 canales, 12 geófonos o sensores con frecuencia pico de 4.5 Hz para MASW y 14 Hz para refracción sísmica, Trigger o sensor inercial de activación, cable multipolar, equipo de cómputo portátil, batería de 12 V, placa metálica y martillo de 20 lbs

RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se presentan los resultados de la línea de refracción sísmica y tablas de correlación para su clasificación e interpretación de resultados.

3.9. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

Conocidas las velocidades de corte (Vs), calculadas las compresionales (Vp) y las densidades (d) de los diferentes estratos que componen el subsuelo (los cuales se pueden obtener de ensayos de laboratorio o a partir de las velocidades compresionales) y dadas las relaciones matemáticas expresadas a continuación es posible calcular.

Ecuaciones para materiales homogéneos e isotrópicos

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \qquad V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \qquad K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \qquad \nu = \frac{0.5(V_P/V_S)^2 - 1}{(V_P/V_S)^2 - 1}$$

$$E = 3K(1-2\nu) \qquad E = 2G(1+\nu) \qquad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Donde:
E: Modulo de elasticidad
G: Modulo de rigidez o de corte
K: Modulo volumétrico
v: Coeficiente de Poisson

Nota: Los módulos estáticos se encuentren a razón del 10 -20% de los módulos dinámicos

Las anteriores expresiones, Vp es la velocidad compresional en m/seg (Kitsunezaki ,1990), Vs la velocidad de corte en m/seg y d es la densidad o peso un unitario en Ton/cm3 (Ludwig, 1970, Vp= Km/s; d=g/cm3). Según la teoría elástica, el módulo de elasticidad dinámico **E**, viene dado en función de la velocidad de propagación de ondas longitudinales (Ondas P) y ondas transversales (Ondas S), las ondas longitudinales son siempre más rápidas de las transversales, lo que hace que la detección de estas últimas sea más complicada en campo, y lo que suele hacerse para hallar el **E** es estimar la relación de Poisson como se enunció anteriormente. El módulo dinámico E tiene un valor mayor que el estático, ya que se obtiene para incrementos tensionales pequeños como son los producidos por ondas sísmicas. La relación entre el módulo dinámico y el estático se considera normalmente de 4 (v. Link, 1969; Mayer, 1963), pero el rango puede estar entre 1 y 19.6. (Jiménez Salas, De Justo Alpañes, 1981). El geotecnista encargado del proyecto, deberá escoger que velocidades Vs que considere más convenientes para el diseño, dependiendo de la cantidad de información adicional del suelo que se tenga en el proyecto

3.10. CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN NSR-10

De acuerdo con la clasificación de los perfiles de suelo según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, los suelos son clasificados de la siguiente forma:

Tabla 6. Clasificación de suelos de acuerdo con la NSR-10. Tabla A.2.4-1 Clasificación de los perfiles de suelo.

Tabla A.2.4-1
Clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s> $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈1 kgf/cm²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	50 > $\bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈1 kgf/cm²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈0.5 kgf/cm²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > $\bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 w ≥ 40% 50 kPa (≈0.50 kgf/cm²) > $\bar{s}_u$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F_1 — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F_2 — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F_3 — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F_4 — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

3.11. ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA LÍNEA LRS1

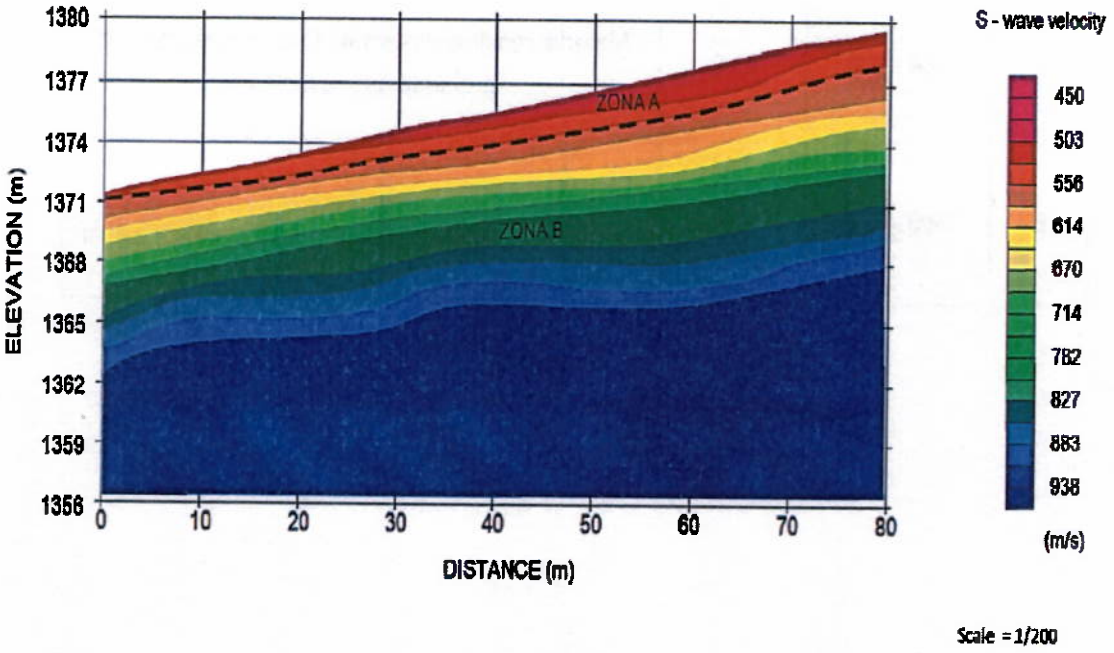
De acuerdo con los resultados de las ondas de corte Vp, en comparación con lo observado en el terreno se tiene:

La imagen de Tomografía Sísmica LRS1 presenta un modelo detallado calculado por elementos finitos, el cual permite observar capas que muestran la variación de la velocidad con la profundidad, muy útil para la identificación de anomalías geofísicas importantes y una buena interpretación.

De acuerdo a los resultados de la tomografía sísmica se identifica dos zonas, la ZONA A corresponde al material residual desarrollado por meteorización profunda del basamento metamórfico de la formación Bucaramanga; La ZONA B corresponde al suelo residual natural formado por la meteorización del gneis de la Formación Bucaramanga.

No se evidencia anomalías geofísicas significativas a lo largo del perfil sísmico.

Figura 1. Ensayo de sísmica de refracción No. LRS-1 (Perfil con variación de ondas Vp).



Fuente: Autores.

CONCLUSIONES

De acuerdo con las observaciones de campo y la interpretación de la línea de refracción sísmica se tienen las siguientes conclusiones.

- **LÍNEA SÍSMICA LRS1**

Se obtuvieron los valores de onda de corte Vp a través de la tomografía de refracción sísmica los cuales se correlacionan en la siguiente tabla:

CAPA	VELOCIDADES (m/s)	ESPESOR (metros)	POSIBLE CORRELACIÓN GEOLOGICA DEL SITIO DE ESTUDIO

A	450 - 556	1 - 3	Material residual desarrollado por meteorización profunda del basamento
B	556 - 827	Superior a 10	Suelo residual natural formado por la meteorización del gneis de la Formación Bucaramanga.

4. ANALISIS GEOLÓGICO

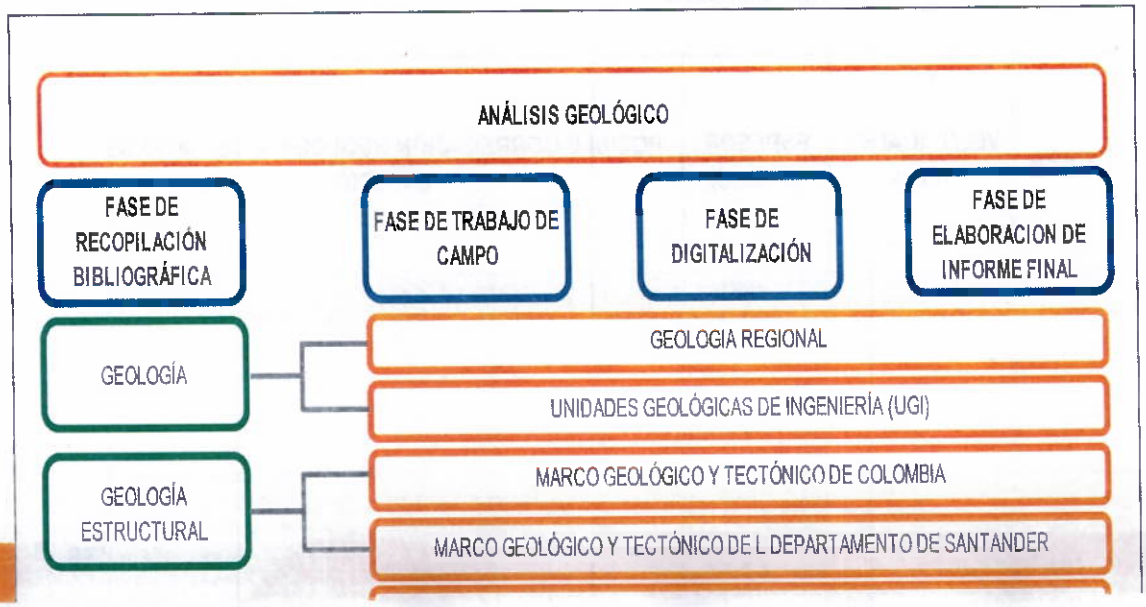


Tabla 7. Contendido Geología

4.1. METODOLOGÍA

La metodología usada para el desarrollo de la presente consultoría consta de las siguientes fases:

Fase de Recopilación Bibliográfica. Esta fase consiste en consultar y seleccionar material bibliográfico como informes técnicos, artículos científicos, mapas geológicos y memorias explicativas, con lo cual se permite definir las nomenclaturas a usar para cada uno de los respectivos mapas a visualizar y cartografiar en campo (geología, geomorfología, cobertura del suelo y deslizamientos), tomando como base los lineamientos usados por el Servicio Geológico Colombiano y entes a nivel

local (CDMB, Alcaldía del municipio con EOT y POT, entre otros). En esta etapa también se genera una base de datos bibliográfica y cartográfica inicial del área de estudio, en un sistema de información geográfica.

Fase de Trabajo de Campo. Consiste en realizar la visita técnica al área de estudio, cartografiando las unidades de geología para ingeniería (UGI), la geomorfología (Morfogenética), la cobertura del suelo actual y la especificación de procesos morfodinámicos (Procesos de movimientos en masa y erosión). Esta información se plasma en mapas realizados en campo de acuerdo con la distribución observada de cada uno de los diferentes entes y procesos.

Fase de Digitalización. Esta fase consiste en digitalizar la información colectada en la zona de estudio, en donde se complementan las bases de datos que se desarrollan en etapas previas.

Fase de Elaboración de Informe Final. Consiste en la redacción de un informe técnico detallado donde se explican los principales rasgos geológicos, así como los rasgos geomorfológicos, cobertura del suelo y procesos morfodinámicos.

4.2. GEOLOGÍA

Este capítulo describe las características geológicas regionales y las Unidades Geológicas de ingeniería (UGI) a nivel del área de estudio.

Para realizar el análisis geológico se tienen en cuenta primeramente estudios previos regionales y locales, de entidades oficiales y particulares, dentro de las que se encuentran el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la Universidad Industrial de Santander (UIS), la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), como también la Alcaldía de Bucaramanga

(Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) y Plan de Ordenamiento territorial (POT)), los cuales permiten conocer la información geológica desarrollada en el área a diferentes escalas, permitiendo la revisión preliminar de estudios generales, como también la estandarización y uso de nomenclaturas para el presente estudio.

Geológicamente la zona más importante del área metropolitana (Bucaramanga) se encuentra ubicada dentro de depósitos de terraza y de cono aluvial (Ward et al., 1973) en la denominada Terraza de Bucaramanga, de edad Pleistoceno-Holoceno. De acuerdo con De porta (1959) y Julivert (1963), la parte inferior de la Terraza de Bucaramanga está compuesta de grava, arena, limo y capas menores arcillosas fluviales; mientras la parte superior está compuesta de cantos no calibrados que se interpretan como depósitos coluviales, los cuales adelgazan lejos del frente montañoso.

4.2.1. GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de Buenavista, localizada al oeste de la ciudad de Bucaramanga, se encuentra dentro del dominio del Macizo de Santander, sobre la Formación Bucaramanga (pEbm), unidad metamórfica de edad Paleozoica inferior que constituye el basamento cristalino regional. Este sector forma parte del flanco occidental de la Cordillera Oriental, donde afloran extensamente rocas de alto grado metamórfico, modeladas por complejos procesos tectono-metamórficos y una prolongada historia de deformación (Ward et al., (1973); SGC, 2015).

El área de Buenavista corresponde a una zona estructuralmente elevada, con topografía abrupta y laderas disectadas, resultado de la erosión diferencial sobre rocas metamórficas muy competentes. La litología predominante está compuesta por gneises cuarzo-feldespáticos, esquistos micáceos y migmatitas, productos del metamorfismo regional bajo condiciones de facies anfibolita a granulita, lo que indica una evolución geológica de alto grado térmico y presión moderada. Estas características litológicas son herencia directa de la evolución paleozoica temprana del basamento andino, que en el caso de Bucaramanga y su entorno occidental representa uno de los núcleos metamórficos más antiguos de la Cordillera Oriental (Ward et al., (1973)).

La estructura interna del área refleja una intensa deformación dúctil, evidenciada en la foliación bien desarrollada, las lineaciones minerales orientadas y los pliegues apretados en los niveles de gneises y esquistos. Esta organización estructural se relaciona con los eventos de deformación vinculados a la orogenia Famatiniana y posteriores reactivaciones andinas, que afectaron significativamente el basamento paleozoico. Durante el Mesozoico y Cenozoico, el levantamiento de la Cordillera Oriental reactivó sistemas de fallas preexistentes, favoreciendo la exposición de estas rocas metamórficas y su control sobre la morfología actual del relieve (SGC, 2015).

En el contexto tectónico regional, el sector de Buenavista se encuentra próximo a la Falla de Bucaramanga–Santa Marta, una estructura mayor que define el límite entre bloques de diferente comportamiento mecánico. Esta falla ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo estructural del norte de Colombia, funcionando como zona de cizalla profunda y límite tectónico entre los dominios corticales occidental y oriental (Ward et al., (1973)). Su influencia se refleja en el patrón de drenaje, en la orientación de las fracturas secundarias y en la disposición de los afloramientos metamórficos.

La Formación Bucaramanga (pEbm) representa una unidad de rocas metamórficas de alto grado perteneciente al basamento paleozoico de la Cordillera Oriental. Está compuesta principalmente por gneises cuarzo-feldespáticos, esquistos micáceos, anfibolitas y migmatitas, todos ellos resultado de procesos metamórficos regionales profundos. Los gneises muestran una textura bandeada y una foliación bien desarrollada, producto de la recristalización de minerales durante la deformación dúctil. Las bandas claras, ricas en cuarzo y feldespato, alternan con bandas oscuras compuestas por biotita, hornblenda y, en menor proporción, granate.

Los esquistos asociados presentan un clivaje fino y una composición dominada por mica, cuarzo y feldespato, con presencia local de minerales índice como sillimanita o estaurolita, que indican condiciones de metamorfismo medio a alto. Las migmatitas son comunes en el sector y evidencian procesos de fusión parcial (anatexis) que afectaron al basamento durante los eventos térmicos paleozoicos, dando lugar a texturas irregulares y venas de material leucocrático (Ward et al., (1973)).

Estructuralmente, la unidad pEbm presenta una foliación dominante con rumbo NE–SW y buzamiento variable hacia el sureste, coincidente con el patrón regional del Macizo de Santander. Esta orientación, junto con la presencia de fracturas y pliegues menores, sugiere una evolución tectónica compleja con múltiples fases de deformación superpuestas. Los contactos entre la Formación Bucaramanga y las unidades más jóvenes del Cuaternario (Qtf y Qal) son principalmente erosivos o tectónicos, y marcan una clara discontinuidad litológica y temporal (SGC, 2015).

La unidad pEbm constituye el núcleo estructural más antiguo de la región, sirviendo como soporte geológico para las unidades sedimentarias y cuaternarias circundantes. Su estudio es esencial para comprender la evolución tectono-metamórfica del sector occidental de Bucaramanga y del Macizo de Santander en general. El reconocimiento de estas rocas en superficie, su foliación y su disposición espacial reflejan la influencia directa de los procesos orogénicos paleozoicos y andinos que modelaron la Cordillera Oriental (Ward et al., (1973); SGC, 2015).

Regionalmente la zona de estudio está relacionada a los bloques tectónicos delimitados por la Falla de Suárez al occidente y la Falla Bucaramanga al Oriente (INGEOMINAS, 2007). A continuación, se describen algunas unidades presentes en esta región, tomando como base el estudio de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga (2001):

- **Neis de Bucaramanga (p€b):** Definido por Goldsmith (1971), esta unidad está constituida por una secuencia de roca metasedimentaria de alto grado de metamorfismo conformado principalmente por paragneis pelítico, semipelítico y arenáceo, esquistos y neis calcáreo, mármol, neis horbléndico y anfibolita.

  El neis incluye dos tipos de zonas de migmatita, una donde el paragneis está mezclado con roca granítica gnéisica y otra donde ambos están cortados por masas pequeñas de granito no foliado (Ward et al., 1973). Aflora al oriente del área metropolitana de Bucaramanga y se localiza al este de la Falla Bucaramanga (Figura 3). Entre los municipios de Floridablanca y Piedecuesta esta unidad presenta variación en la orientación de la foliación, lo cual indica

perturbaciones tectónicas severas. Se encuentra en contacto con intrusivos jurásicos graníticos y se considera de edad precámbrica (Ward et al., 1973).

- **Formación Silgará (pDs):** Nombre propuesto por Ward et al., (1973) para referirse a una secuencia de rocas clásticas metamorfoseadas de estratificación delgada, compuestas por filitas, cuarcitas, esquistos, metareniscas y menores cantidades de pizarra y filita calcárea, cuya sección tipo se localiza en la Quebrada Silgará.

  Las relaciones estratigráficas sugieren que esta unidad suprayace al Neis de Bucaramanga e infrayace rocas del Devónico.



Ilustración 18 Unidad Neis de Bucaramanga ubicada al este del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 1999).

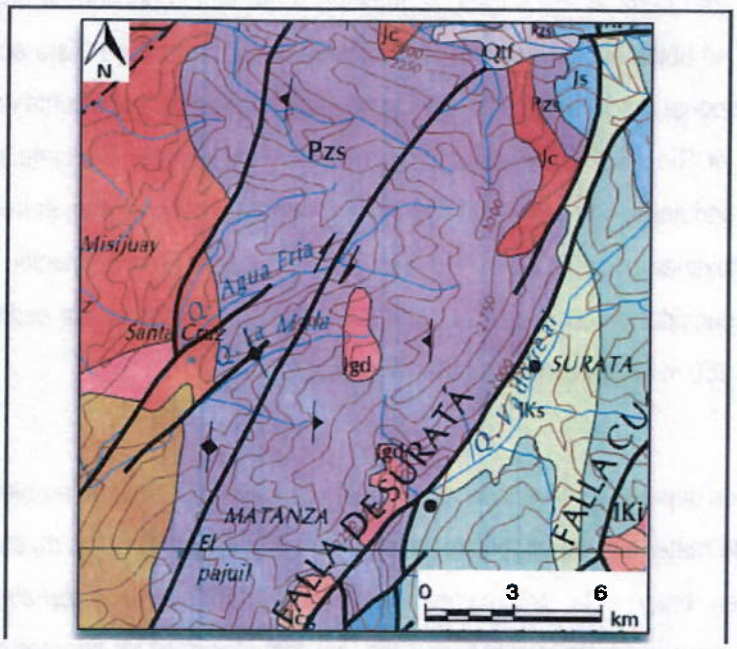


Ilustración 19 Formación Silgará en los alrededores de Matanza y Suratá. Ubicada al Noreste del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 1999).

- **Formación Bucaramanga:** La Formación Bucaramanga hace parte de los depósitos cuaternarios descritos por Ward et al., (1973). Esta unidad inicialmente fue propuesta por Hubach (1951), quien la subdivide en: Miembro Órganos (Qbo) y Miembro Finos (Qbf). Posteriormente De Porta (1959) divide la formación Bucaramanga en tres paquetes: uno inferior conformado por niveles discontinuos de gravas clasto soportados y con lentes arenosos intercalados con un espesor de 150m; un segundo paquete con un espesor de 18m ubicado en la parte superior, compuesto de sedimentos arcillosos y un tercer paquete de 8 a 15 metros de espesor, constituido por una mezcla de fragmentos angulares gruesos y finos

arenosos. Sin embargo, después de trabajos de campo detallados el INGEOMINAS subdivide esta unidad en cuatro miembros: Órganos (Qbo), Finos (Qbf), Gravoso (Qbg) y Limos Rojos (Qblr); de acuerdo con las dataciones publicadas en el proyecto hidroeléctrico Fonce-Suárez, la edad de la Formación Bucaramanga es menor que 730.000 años (Pleistoceno) (INGEOMINAS, 1997).

- Morfológicamente esta unidad corresponde a un abanico aluvial erosionado posiblemente asociado en gran parte al Río Suratá, acumulado sobre una depresión de origen tectónico, sobre la cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Este abanico limita al nororiente y oriente con el Macizo de Santander, al noroccidente y occidente con el Cerro de Palonegro y el Río de Oro, y al sur con la Mesa de Ruitoque. Presenta una superficie suavemente ondulada, con pendiente ligeramente inclinada al occidente, entre 2° y 7°, y una extensión aproximada de 60 a 80 km². El valor real del espesor de la Formación Bucaramanga es aún desconocido, sin embargo, a partir de cortes geológicos se ha estimado un valor promedio de 250 m en las zonas con mayor espesor.

- El ambiente de deposición de esta unidad ha sido considerado como un ambiente fluvial, con alternancia de materiales de origen aluvial tipo cono de deyección, flujos de escombro, canal y lagunar, en base a la granulometría que presentan dichos materiales, los rasgos geomorfológicos que presenta esta formación, así como los posibles agentes de transporte y la fuente de los materiales (Julivert, 1958).
- A continuación, se describen las características geológicas de cada uno de estos miembros, de acuerdo con la información geológica que se presenta en los estudios del INGEOMINAS (2001).

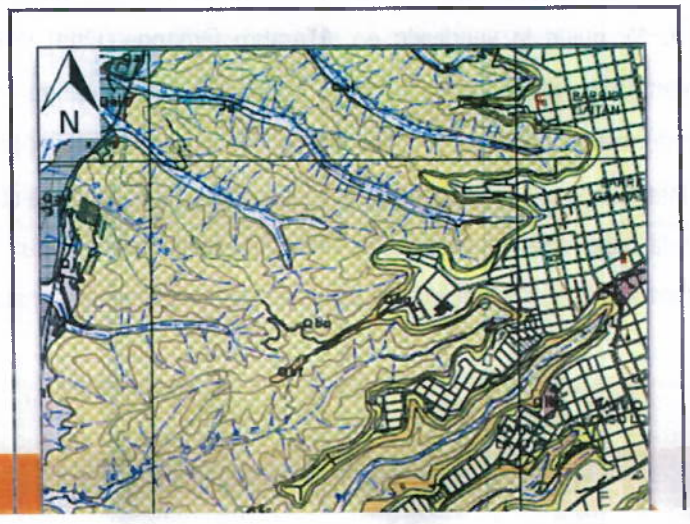


Ilustración 20 Formación Bucaramanga Miembro Órganos (Qbo), al oeste del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

- **Miembro Órganos (Qbo):** Esta unidad fue definida por Hubach (1951) y presenta un espesor mayor a 180m, siendo este el más potente de la Formación Bucaramanga. Presenta una serie 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, según Bueno y Solarte (1994). Los niveles lenticulares descritos por Hubach (1951), algunos son niveles limo-arenosos de hasta 5 m; otros son niveles de aspecto conglomerático que forman los depósitos de gravas y bloques poco consolidados 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 con una composición predominante de areniscas silíceas de grano medio, bien cementadas y en menor proporción fragmentos de rocas ígneas ácidas de textura fanerítica, neises micáceos de color amarillo hasta rosado, areniscas lodosas rojizas de grano fino y alto contenido de micas, cuarzo lechoso, liditas y cherts. Los niveles gravosos presentan matriz arcillosa pardo amarillenta y los niveles finos presentan material arcillo arenosos y areno arcilloso de consistencia compacta, con trazas de materia orgánica.

- **Miembro Finos (Qbf):** Este nivel fue reconocido y definido por Hubach (1951). Se ubica estratigráficamente entre el nivel inferior de la Formación Bucaramanga (Miembro Órganos) y el nivel superior (Miembro Gravoso) en contactos netos plano- paralelos. Es una capa lenticular horizontal con alternancia de niveles arcillosos, limo-arenosos y areno-limosos, de colores gris verdosos con un espesor promedio de 15m. Estos niveles presentan una

geometría tabular de estratificación paralela, cruzada y ondulosa, con espesores que oscilan entre 5 y 40 cm. Hacia la base el Miembro Finos presenta material arcillo-limoso, masivo, de colores grises a verdes, con estratificación plana paralela, con gran variación de espesor. Hacia el techo presenta alternancia entre niveles arenolimosos con niveles limo arenosos arcósicos de colores amarillento a pardo amarillento. Geomorfológicamente se caracteriza por presentar escarpes con un grado de alteración moderada de consistencia plástica para el material arcilloso. El ambiente de deposición para este miembro de la Formación Bucaramanga es un ambiente aluvial de intercanales, poco profundo, de baja energía y de escasas interdigitaciones de flujo de escombros de facies arenosas (INGEOMINAS, 2001).

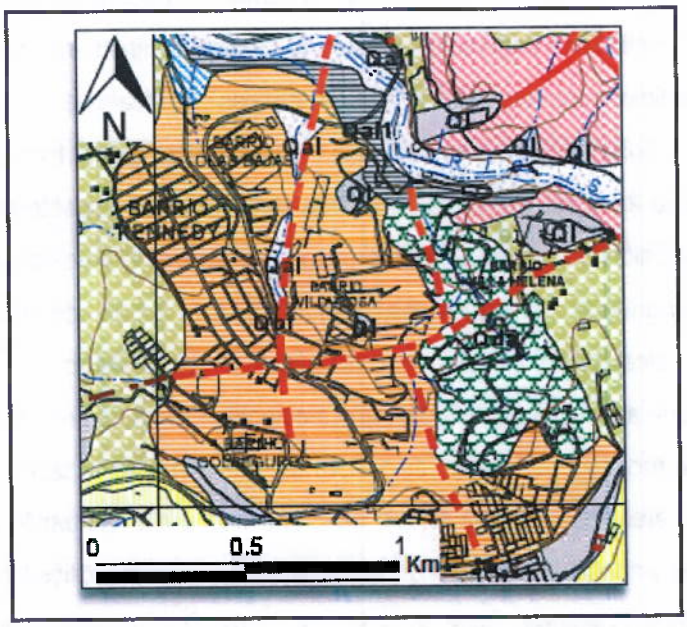


Ilustración 21 Formación Bucaramanga Miembro Finos, al norte del municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

- **Miembro Gravoso (Qbg):** Definido por Nino y Vargas (1992), se encuentra ubicado sobre la escarpa occidental y norte de Bucaramanga (Figura 6). Conforma los escarpes superiores de la parte alta del barrio La Gran Ladera y el nacimiento de la quebrada La Iglesia, en los alrededores de los barrios Lagos del Cacique, Diamante II y San Luis. Presenta un espesor que varía entre 8 y 30 m. presentando niveles gravosos, gravo arenosos y gravo lodosos. Los cantos están compuestos por rocas metamórficas e ígneas y sedimentarias tales como

areniscas cuarzosas, areniscas limosas y limolitas moradas. El tamaño grava presenta un diámetro promedio de 15 cm, y predomina sobre bloques de rocas de hasta 80 cm de diámetro. A modo general el Miembro Gravoso es matriz soportado, presentando en sitios puntuales, material clasto soportado. Se encuentra suprayaciendo el Miembro Finos presentando contacto neto, continuo y suavemente onduloso. Infrayace el Miembro Limos Rojos en contacto gradacional (Niño y Vargas, 1992).

Geomorfológicamente es similar al Miembro Órganos en los sectores de los valles de las quebradas. En la parte sur de la Quebrada la Iglesia, su morfología se caracteriza por presentar colinas suaves onduladas y laderas alargadas con un drenaje dendrítico. Estos depósitos presentan un grado de meteorización medio a alto, siendo la parte superficial de este miembro poco compacta y altamente permeable. Su ambiente de deposición es de flujo de escombros (INGEOMINAS, 2001).

- **Miembro Limos Rojos (Qblr):** Nivel definido por Julivert (1963). Se encuentra localizado de forma no uniforme en el sector urbano de Bucaramanga y continúa hacia el sur, hasta el sector norte del municipio de Floridablanca.

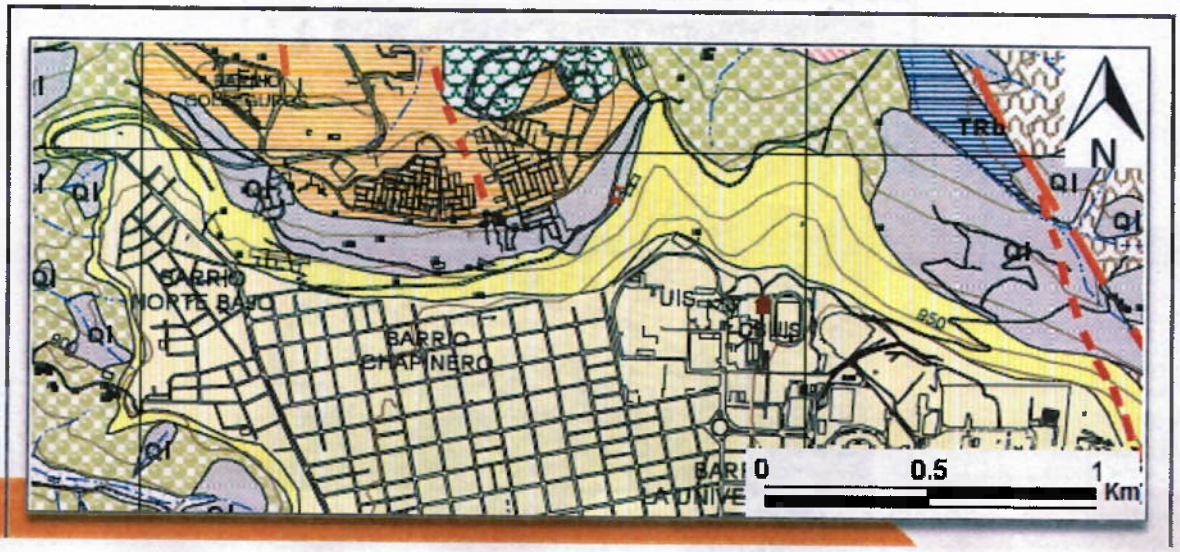


Ilustración 22 Formación Bucaramanga Miembro Gravoso, al norte del municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

Presenta arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. En algunos sectores se aprecian bloques angulares de arenisca meteorizados, embebidos dentro de limos rojos y se asocian superficialmente a este miembro. Este depósito se encuentra suprayaciendo el Miembro Gravoso en contacto gradacional.

La parte más superficial de este miembro presenta un alto grado de meteorización formando niveles de oxidación (INGEOMINAS, 2001). Geomorfológicamente se caracteriza por constituir la parte superficial de la llamada inicialmente "Meseta de Bucaramanga", presentando una topografía plana con pendientes menores al 7%, de drenaje escaso, paralelo y superficial (Niño y Vargas, 1992)

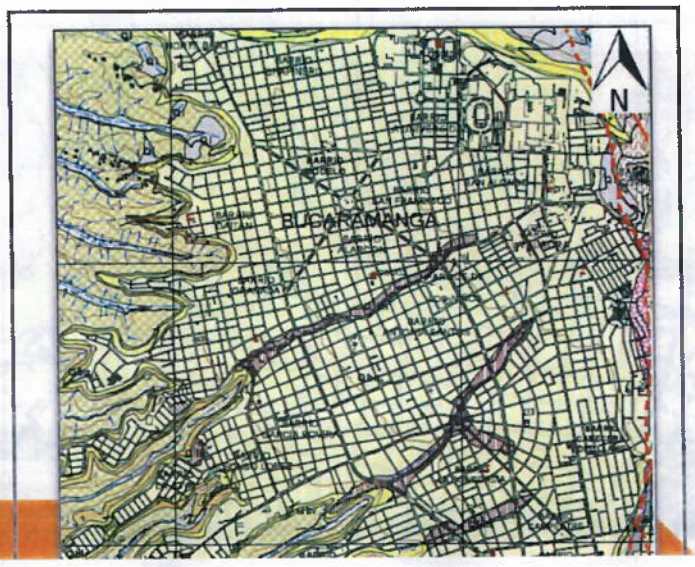


Ilustración 23 Formación Bucaramanga Miembro Limos Rojos (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

En la siguiente figura se muestra de manera esquemática el perfil del subsuelo correspondiente a la Formación Bucaramanga.

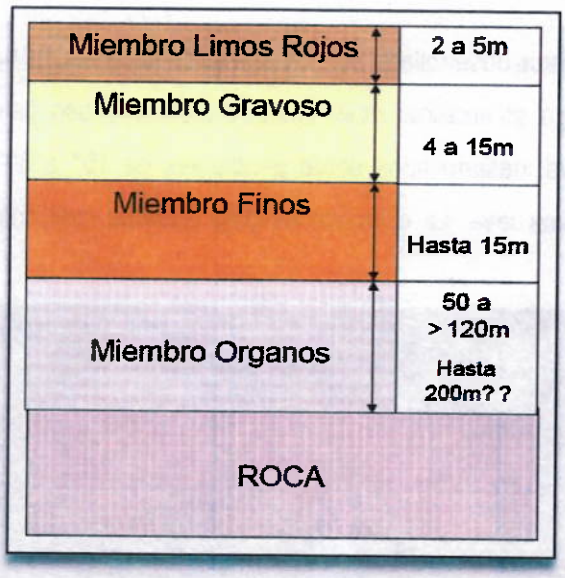


Ilustración 24 Perfil típico y espesores promedio de la Formación Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

4.2.2. UNIDADES GEOLÓGICAS DE INGENIERÍA (UGI)

La caracterización geológica a escala detallada se apoya en la delimitación de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI) (SGC - UNAL, 2016), las cuales permiten agrupar sectores con materiales que presentan comportamiento mecánico y origen geológico similares. Estas unidades constituyen el insumo principal para la evaluación del terreno, ya que facilitan distinguir entre suelos y rocas,

reconocer espesores significativos de suelo residual o transportado, y establecer las condiciones estructurales y de meteorización del macizo rocoso.

En el sector Buenavista se registran dos materiales, asociados a un suelo residual natural formado por la meteorización del gneis de la Formación Bucaramanga, con erosión superficial leve y un suelo residual antrópico con escombros presente en las zonas urbanizadas.

SUELO RESIDUAL SOBRE GNEIS CUARZO-FELDESPÁTICO DE LA FORMACIÓN BUCARAMANGA (Srgfb)

Corresponde al material residual desarrollado por meteorización profunda del basamento metamórfico de la formación Bucaramanga, es un suelo arcillo-limoso a arcillo-arenoso, de color pardo amarillento a rojizo y estructura masiva, desarrollados sobre pendientes de 15° a 30°, donde se observan evidencias de erosión laminar leve. La cohesión es baja a media, con comportamiento dúctil en condiciones húmedas.



SUELO **Ilustración 25** Suelo residual sobre gneis cuarzo-feldespático de la formación Bucaramanga, sector Buenavista

Esta unidad se localiza en el sector urbanizado del área de estudio, donde el suelo residual, ha sido modificado por cortes, nivelaciones y rellenos para la construcción de vías y viviendas, presentando materiales arcillosos residuales, gravas sueltas, fragmentos de concreto, ladrillo y tierra suelta.

CODIGO UGI	UNIDADES GEOLOGICAS PARA INGENIERIA	AREA HECTAREAS

Srale	Suelo residual antrópico lleno de escombros	0,62
Srgfb	Suelo residual sobre gneis cuarzo-feldespático de la formación Bucaramanga	0,36

Tabla 8. Clasificación de las unidades geológicas para ingeniería UGI, sector Buenavista



Ilustración 26 Mapa de unidades geológicas para ingeniería UGI, sector Buenavista

4.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

4.3.1. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DE COLOMBIA

Colombia se ubica en la convergencia activa de las placas de Nazca, Caribe y Sudamericana (con influencia del bloque Panamá–Chocó). La placa de Nazca avanza hacia el este (~54 mm/año) y subduce bajo Suramérica, provocando el levantamiento de los Andes y formando las Cordilleras Occidental y Central como arcos volcánicos activos. En cambio, la placa del Caribe se acerca de manera oblicua (≈15 mm/año) por el norte de Colombia, generando fallas de cizalla izquierda de larga extensión (por ejemplo, el sistema Santa Marta–Bucaramanga). Esta dinámica ha dado lugar al denominado Bloque Norte de los Andes, con una compleja red de fallas transversales e inversas que reparte la deformación continental.

El resultado son tres cadenas montañosas principales geológicamente distintas. La Cordillera Occidental y la Cordillera Central son arcos magmáticos meso-cenozoicos (parte del Cinturón de Fuego del Pacífico) asociados directamente a la subducción de Nazca. En cambio, la Cordillera Oriental es un relieve intracontinental plegado, elevado principalmente en el Terciario tardío. Esta cordillera descansa sobre el escudo precámbrico de Guayana (rocas cristalinas de más de 1.300 millones de años) que sirvió como plataforma estable para la sedimentación paleozoica. Sobre dicho basamento se depositaron sedimentos miogeosinclinales (formaciones fluviales y marinas del Paleozoico inferior) que luego fueron plegados y cabalgados durante la orogenia andina terciaria. Como señala Irving (1971), estas tres ramas cordilleranas del norte de Colombia "son geológicamente distintas y se originaron en diferentes épocas".

Además de las cordilleras, en el extremo norte se destaca la Sierra Nevada de Santa Marta, elevada por la colisión oblicua del Caribe, y hacia el este existen cuencas sedimentarias propias de la placa Suramericana (por ejemplo, los Llanos Orientales y la cuenca del Amazonas). En conjunto, el marco tectónico de Colombia es fruto de la continua colisión de placas oceánicas contra el continente, con subducción de Nazca (levantamiento andino) y empuje oblicuo del Caribe (fallas transversales). Este proceso ha formado las cordilleras andinas y otras estructuras mayores (fosas tectónicas, fallas principales) que siguen activas hoy en día.

4.3.2. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER

Santander se encuentra principalmente sobre la Cordillera Oriental, dominada por el Macizo de Santander, un bloque montañoso intraplaca de origen paleozoico. En el núcleo del macizo aflora un basamento ígneo-metamórfico muy antiguo: gneises, migmatitas y esquistos de alto grado (la llamada Formación Bucaramanga) de edad Precámbrico-Paleozoico. Estas rocas cristalinas constituyen la parte más rígida y elevada del departamento. Asociados a ellas hay plutones graníticos jurásicos (el Grupo Plutónico de Santander), prueba de un pulso magmático mesozoico durante la apertura de las cuencas.

Alrededor del núcleo metamórfico central afloran secuencias sedimentarias paleozoicas. La Formación Silgará (Ordovícico–Silúrico) consta de filitas, esquistos y mármoles de bajo a medio grado de metamorfismo; fue depósito de un mar antiguo en el borde de la plataforma cratónica. Por encima se ubica la Formación Floresta

(Devónico medio), compuesta de lutitas y calizas fosilíferas de bajo grado metamórfico. Estas rocas sugieren un ambiente marino profundo en el Paleozoico. Al final del Paleozoico, depósitos calizos carbonífero-permicos (Formación Diamante) completan la secuencia antes de un hiato de levantamiento.

En el Mesozoico inferior la región sufrió tectónica extensiva: se formaron grabens donde se depositaron los conglomerados y areniscas rojas triásicas de las Formaciones Jordán y Girón. Luego, en el Cretácico la mayor parte del macizo quedó emergido y erosionado, pero en las cuencas marginales colindantes entró un mar somero. En el valle del Magdalena se acumularon sedimentos cretácicos marinos: arenas cuarzosas (Formación Tambor), calizas fosilíferas (Formación Rosa Blanca) y espesos niveles de lutitas orgánicas (Formaciones Paja, Tablazo, Simití, La Luna, Umir). Estos depósitos marinos cretácicos afloran en los flancos del Macizo de Santander, indicando la amplia transgresión que cubrió la región. En resumen, el basamento antiguo del macizo fue recubierto lateralmente por arenas, calizas y lutitas del Cretácico.

Con la orogenia andina terciaria se invirtió esta geometría: el Macizo de Santander se alzó como un bloque rígido y sus flancos fueron plegados e invertidos. En particular, la Falla de Bucaramanga

(rumbo NNW) es la estructura más importante: marca el límite occidental del macizo y presenta un desplazamiento horizontal (sinestral) seguido de un fuerte levantamiento diferencial hacia el este. Al este del macizo, la falla regional de Servitá delimita cuencas sedimentarias internas (de edad Devónico a Cretácico) que también sufrieron cabalgamientos. Otras fallas menores (por ejemplo, la Falla de Salinas) cortan el triásico y cretácico del oeste, controlando la forma de mesetas y valles internos.

El resultado tectónico actual es un relieve de «horst y graben»: un bloque central alto (el Macizo) rodeado de depresiones y valles rellenos con sedimentos cenozoicos. La erosión en el Pleistoceno también es notoria: se han identificado vestigios de glaciaciones alpinas en las cumbres y amplias terrazas fluviales en los valles. En conjunto, la geología estructural de Santander refleja un viejo basamento metamórfico levantado por fallas andinas y esculpido por la erosión reciente, dando al departamento su relieve abrupto y montaña escarpada característica.

5. GEOMORFOLOGÍA

5.1. MORFOGÉNESIS

La morfogénesis del sector Buenavista, está controlada por la presencia del basamento metamórfico de la Formación Bucaramanga, compuesto por gneises cuarzo-feldespáticos y esquistos micáceos, que han favorecido un modelado erosivo, donde la meteorización generó un manto residual arcillo-arenoso expuesto en las laderas disectadas del sector. El relieve actual responde a la denudación y la disgregación del suelo residual sobre una ladera que mantiene pendientes entre moderadas y abruptas, facilitando el transporte de material fino y la formación de pequeños surcos, así mismo la presencia de superficies convexas y cóncavas, que orienta la escorrentía hacia el eje central del área de estudio. Por otra parte, la intervención antrópica representada en cortes del talud, terrazas, rellenos y viviendas, ha generado planos artificiales que modifican el relieve y producen puntos de concentración de escorrentía, alterando el patrón natural de drenaje.

5.2. MORFOMETRÍA

El análisis morfométrico en este estudio busca comprender cómo la forma del relieve condiciona la estabilidad local. Este enfoque se basa en el uso de tres parámetros ampliamente aceptados en geomorfometría: la pendiente la rugosidad y la curvatura del terreno, que según Wood (1996) y Pike et al. (2009), describen de manera efectiva cómo se organiza el terreno y cómo se distribuyen los procesos superficiales.

5.2.1. PENDIENTES

Las pendientes en el sector de Buenavista fluctúan entre 2° y 55°, evidenciando un relieve variado y condicionado por la erosión natural y por intervenciones urbanas en terrazas irregulares. La franja central del área de estudio concentra valores entre 8 y 16°, laderas clasificadas como moderadamente abruptas, donde el suelo residual arcillo-arenoso permite escorrentía moderada y presenta ligeros indicios de erosión laminar. En los límites oriental y occidental predominan pendientes entre 16° y 35°, propias de laderas abruptas, donde se intensifican los procesos denudacionales y la escorrentía tiende a concentrarse, especialmente en áreas con cobertura vegetal o presencia de suelo desnudo. Los

sectores con pendientes de 35° a 55° corresponden a superficies muy abruptas asociadas a los cortes del talud de corte.

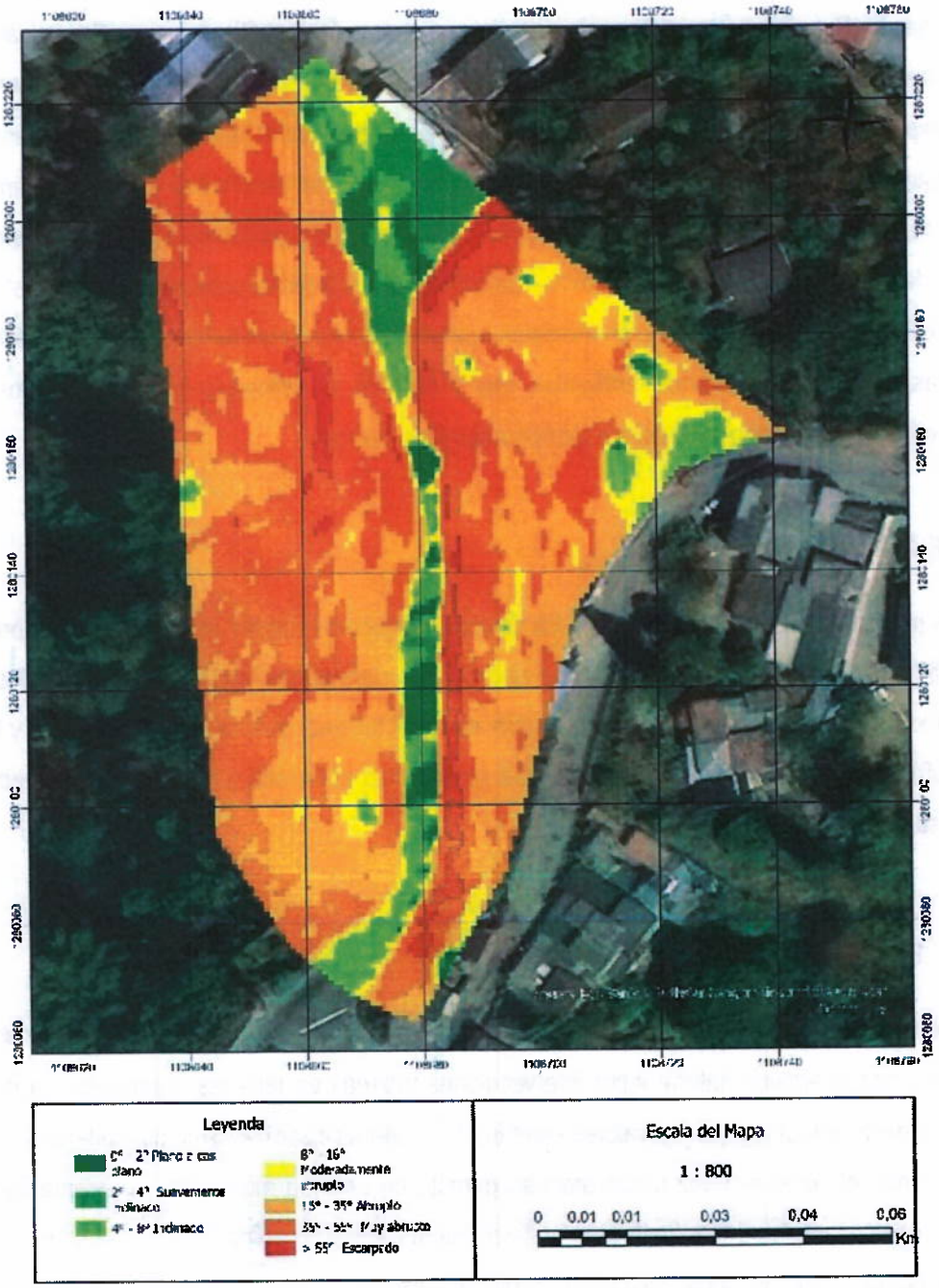


Ilustración 27. Mapa de pendiente del terreno, sector Buenavista

5.2.2. CURVATURA

En el sector de Buenavista la curvatura mayor parte del área, presenta valores cercanos a cero, indicando superficies suavemente onduladas asociadas a pequeñas terrazas y rellenos antrópicos alrededor de las viviendas. En la zona central aparecen franjas continuas de curvatura cóncava, vinculadas a ligeras depresiones y pequeños canales donde se concentra el flujo superficial, favoreciendo mayor humedad y susceptibilidad a erosión en surcos.

Hacia los bordes oriental y sur del área de estudio se observan zonas con curvatura convexa, propias de lomos y taludes ligeramente abombados que dispersan el flujo y aumentan la exposición del suelo a procesos de erosión.

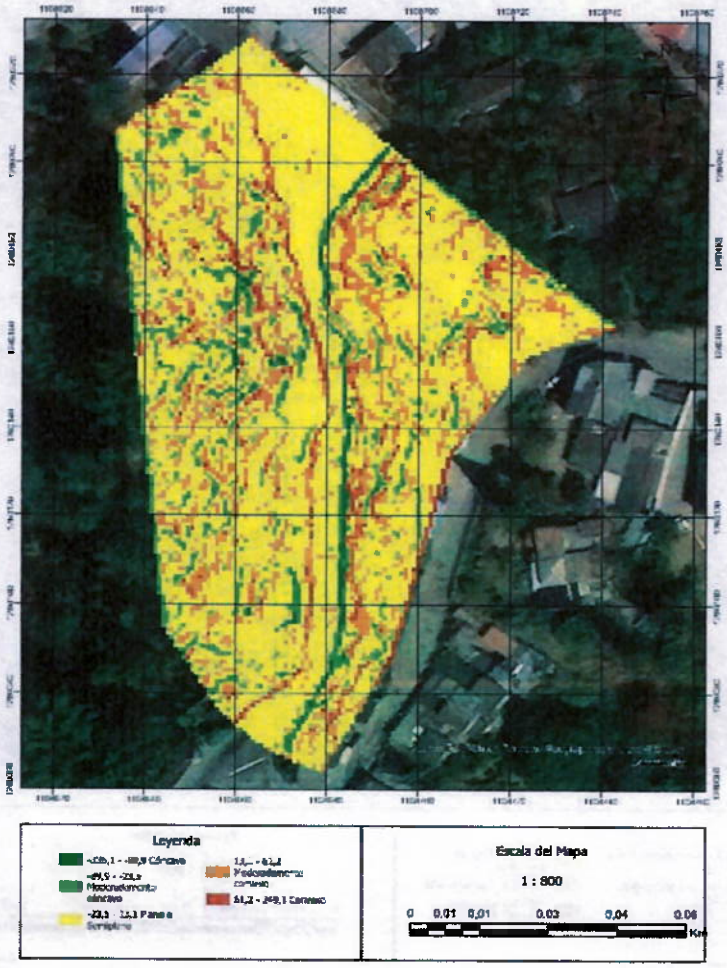


Ilustración 28. Mapa de curvatura del terreno, sector Buenavista

5.2.3. RUGOSIDAD

Para el sector de Buenavista las áreas con rugosidad baja se concentran en la franja oriental y en pequeños sectores cercanos a las viviendas, donde predominan rellenos antrópicos, terrazas niveladas y superficies relativamente uniformes. En contraste, la franja central del sector muestra valores medios a altos topografía más irregular donde se intercalan pequeños lomos, depresiones y variaciones locales del relieve. Esta rugosidad intermedia favorece la infiltración en áreas con vegetación, intensificando la acumulación de humedad en superficies cóncavas.

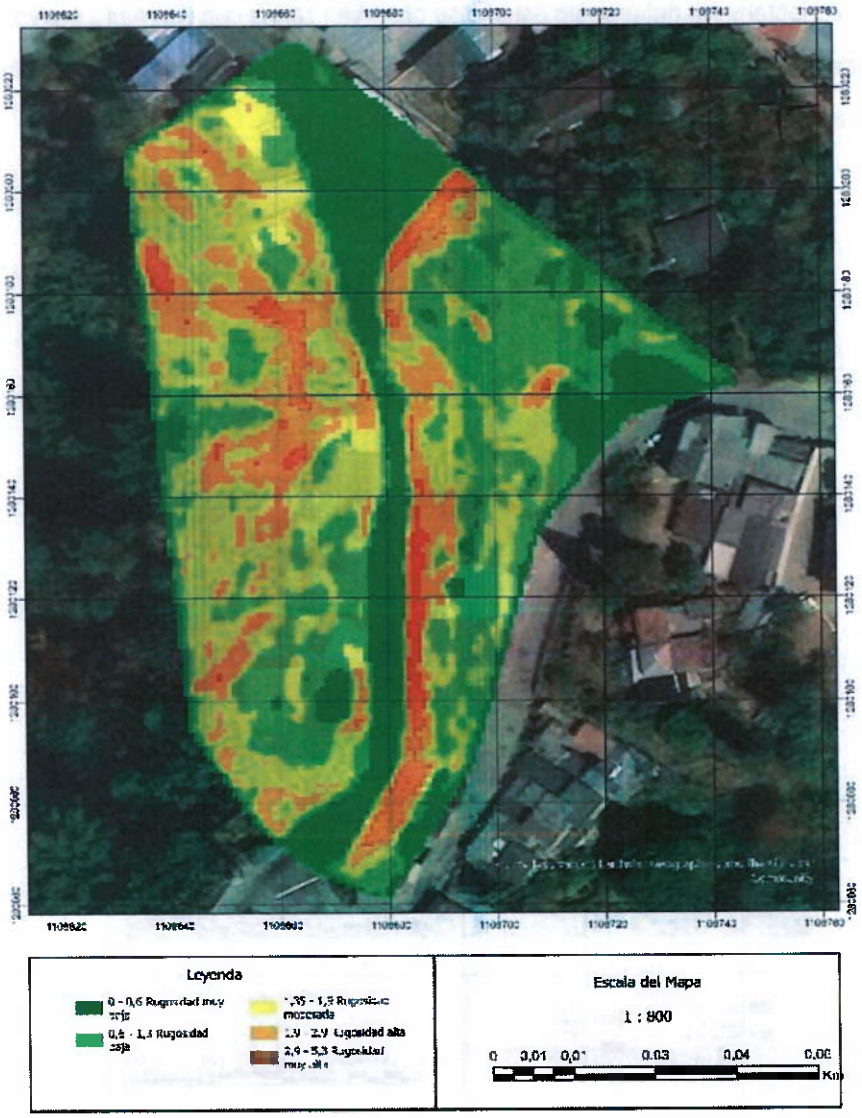


Ilustración 29. Mapa de rugosidad del terreno, sector de Buenavista

5.3. MORFODINÁMICA

La morfodinámica del sector está condicionada por una ladera de pendiente moderada a abrupta desarrollada sobre suelos residuales del basamento metamórfico. Predominan procesos de erosión superficial, evidenciados en pequeños surcos y zonas de acumulación de humedad que se organizan en las franjas cóncavas centrales, mientras los sectores convexos dispersan el flujo y dejan el material más expuesto generando un patrón de drenaje concentrado hacia el eje medio del área de estudio.

Una característica relevante del sector es el talud que bordea la vía principal, el talud corresponde a una superficie con inestabilidad superficial, que se puede estar presentando por pérdida de suelo, saturación o desprendimientos menores.

Las viviendas, rellenos y senderos modifican el relieve generando puntos de concentración de escorrentía. En contraste, las laderas con vegetación secundaria muestran un comportamiento más estable.



Ilustración 30. Ladera muy abrupta con inestablidad y desprendimientos leves de material, sector Buenavista

5.4. ELEMENTOS GEOMORFOLOGICOS

Para la escala detallada empleada en este estudio, los elementos geomorfológicos constituyen la unidad básica de análisis. La clasificación y descripción de estos elementos se realiza siguiendo los lineamientos de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia (Carvajal, 2011), con el fin de caracterizar cada geoforma según su origen, configuración, dimensiones y dinámica actual.

En el sector se identifican laderas con inclinación suave y una ladera muy abrupta marcada por pequeños surcos que concentran la escorrentía y favorecen la erosión, así mismo se encuentran elementos de origen antrópico asociados a cortes y rellenos utilizados para permitir la construcción y el uso urbano del terreno.

5.4.1. GEOFORMAS DE ORIGEN DENUDACIONAL

LADERA DENUDACIONAL INCLINADA (Dldi)

Corresponde a una ladera con pendientes moderadas, modelada principalmente por procesos de denudación sobre suelos residuales desarrollados a partir del basamento metamórfico. El relieve muestra una combinación de sectores convexos y cóncavos que dirigen la escorrentía hacia el eje central del sector. La cobertura vegetal secundaria aporta estabilidad, aunque se observan puntos localizados de erosión superficial.

LADERA DENUDACIONAL LIGERAMENTE INCLINADA (Dldli)

Superficie de baja a moderada pendiente, con un relieve más suave. La denudación actúa de forma difusa, favoreciendo la continuidad del manto de suelo y el desarrollo de vegetación arbustiva y herbácea. La escorrentía se dispersa y la infiltración aumenta, lo que reduce la erosión.

LADERA DENUDACIONAL DISECTADA MUY ABRUPTA (Dlddma)

Geoforma ubicada en el sector central, donde la pendiente es más elevada y el relieve se encuentra claramente diseccionado por pequeños surcos de erosión. Estas pequeñas depresiones canalizan la escorrentía y concentran el flujo, generando una morfología más irregular. El suelo residual es más susceptible a ligeros deslizamientos superficiales.



Ilustración 31. Ladera disectada muy abrupta en el sector de Buenavista al costado de la vía principal.

5.4.2. GEOFORMAS DE ORIGEN ANTRÓPICO

PLANOS Y CAMPOS DE RELLENOS ANTRÓPICOS (Apcra)

Corresponden a superficies artificiales asociadas a ocupación urbana y rellenos generados para soportar viviendas y adecuaciones del terreno en el sector Buenavista. Presentan, cortes verticales, taludes y zonas con material de relleno antrópico.



Ilustración 32. Laderas asociadas a construcciones conforma los elementos geomorfológicos de origen antrópico del sector Buenavista

CÓDIGO EGMF	ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS	ÁREA HECTÁREAS
Aplla	Planos y campos de llenos antrópicos	0,57
Dldi	Ladera denudacional inclinada	0,25
Dldli	Ladera denudacional ligeramente inclinada	0,085
Dlddma	Ladera denudacional disectada muy abrupta	0,076

Tabla 9. Clasificación de los elementos geomorfológicos del sector Buenavista

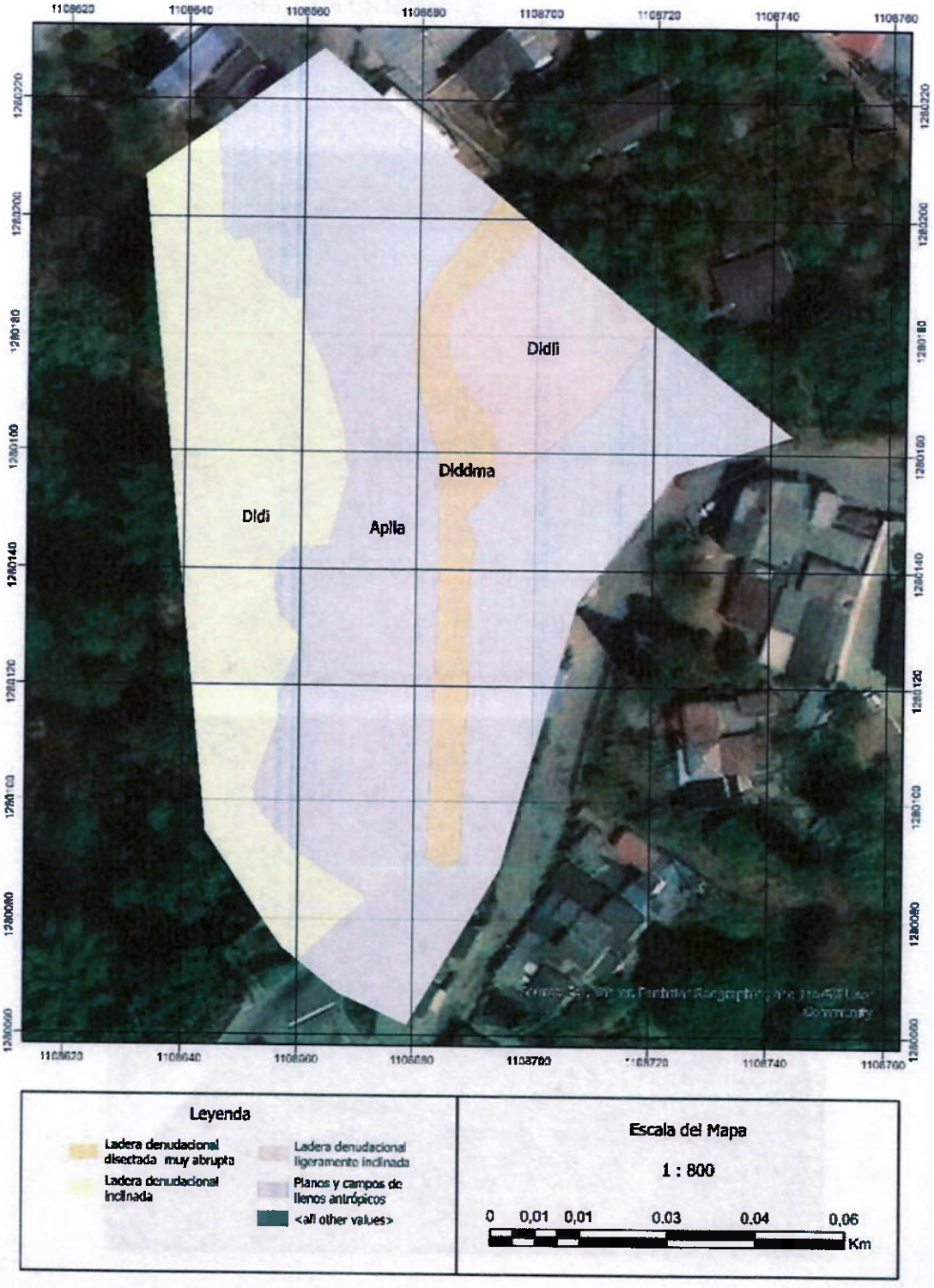


Ilustración 33 Mapa de elementos geomorfológicos, sector Buenavista

6. REGISTRO FOTOGRAFICO

- Apique 1:





- Apique 2:


Fecha 13/10/
Coord. 210.14218 9
Lugar Buenavista
Apique 2
Profundidad 0,00 - 1,45m



- Apique 3:

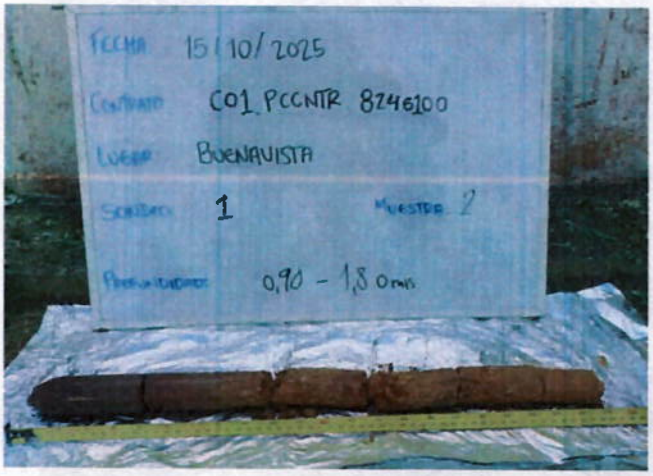

FECHA 13/10/2025
CONTIENE 210 16218 H
LUGAR BUENAVISTA
APIQUE 3
PROFUNDIDAD 0.00 - 1.50 mts



- Sondeo 1:


CONTRATISTA

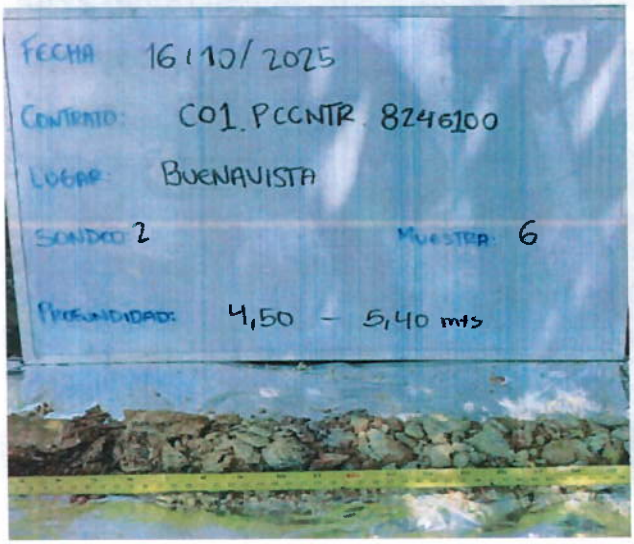



FECHA 15/10/2025
CONTRATO CO1 PCCNTR 8246100
LUGAR BUENAVISTA
SONDEO 1 MUESTRA 2
0,90 - 1,8 Oms

- Sondeo 2:


CONTRATISTA

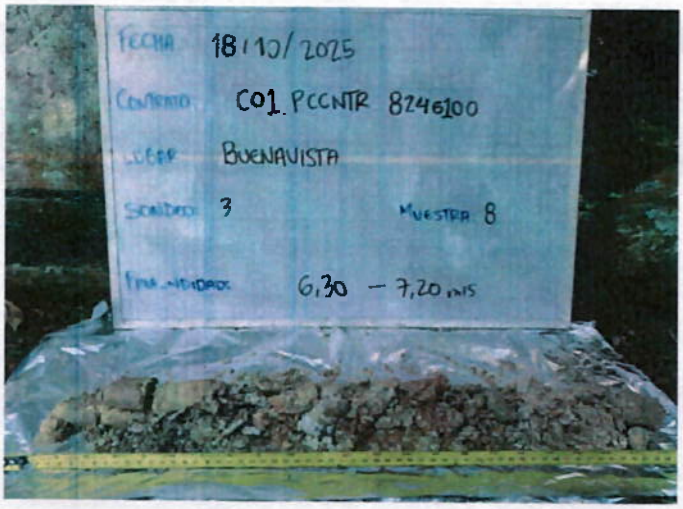



FECHA 16/10/2025
CONTRATO: CO1.PCCNTR.8246100
LUGAR: BUENAVISTA
SONDEO 2
MUESTRA 6
PROFUNDIDAD: 4,50 - 5,40 mts

- Sondeo 3:






FECHA 18/10/2025
CONTENIDO CO1 PCCNTR 8246100
SUBBASE BUENAVISTA
SONDEO 3 MUESTRA 8
PROFUNDIDADES 6,30 - 7,20 MTS

7. RESULTADOS

7.1. Perfiles estratigráficos

HSC	PERFIL ESTRATIGRÁFICO APIQUES	CODIGO	FT-EX-001
		FECHA	15/11/2023
		VERSIÓN	2
		Página 1 de 1	

N° DE APIQUE	1	N° DE ORDEN DE SERVICIO	152-25	N° DE ORDEN DE TRABAJO	152-25	FECHA	15/10/2025
PROYECTO	CONSORCIO CONSULTORIA GEOTECNIA						
SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA						
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO			LUGAR DE PERFORACIÓN	BUENAVISTA		
COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS	NORTE	1280186.274	GEOGRAFICAS	N	7.12882089	COTA 841.45
		ESTE	1109887.889		W	73,09363950	

PROFUNIFIDAD m		DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
0.00	0.20	
0.60	0.95	
0.80	1 75	SUELO ARENOSO DE GRANO GRUESO A MEDIO CON PRESENCIA DE GRANO SUC - ANGULARES CON CONSISTENCIA BLANDA COLOR 7,5 YR 6/3

OBSERVACIONES:

SUPERVISÓ		REVISÓ	
NOMBRE	WILLIAM EDUARDO CORTES	NOMBRE	MARTHA LILIANA BAYONA
CARGO	COORDINADOR DE LABORATORIO	CARGO	GERENTE

HSC	PERFIL ESTRATIGRÁFICO APIQUES	CODIGO	FT-EX-001
		FECHA	15/11/2023
		VERSIÓN	2
		Página 1 de 1	

Nº DE APIQUE	2	Nº DE ORDEN DE SERVICIO	162-25	Nº DE ORDEN DE TRABAJO	162-25	FECHA	15/10/2025
PROYECTO	CONSORCIO CONSULTORIA GEOTECNIA						
SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA						
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO			LUGAR DE PERFORACIÓN	BUENAVISTA		
COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS		GEOGRÁFICAS			COTA	1358
	NORTE	1280187.935	N	7.1288800			
	ESTE	1108675.57	W	-73.09375100			

PROFUNDIDAD (m)		DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
0.00	0.75	
0.75	1.40	
1.35	2.00	SUELO ARENOSO DE GRANO GRUESO A MEDIO CON PRESENCIA DE GRANO SUB - ANGULARES CON CONSISTENCIA BLANDA COLOR 7,5 YR 8/3

OBSERVACIONES:

SUPERVISÓ	REVISÓ
NOMBRE: WILLIAM EDUARDO CORTES	NOMBRE: MARTHA LILIANA BAYONA
CARGO: COORDINADOR DE LABORATORIO	CARGO: GERENTE

HSC HIDROSUELOS DE COLOMBIA	PERFIL ESTRATIGRÁFICO APIQUES	CODIGO	FT-EX-001
		FECHA	15/11/2023
		VERSIÓN	2
		Página 1 de 1	

Nº DE APIQUE	3	Nº DE ORDEN DE SERVICIO	162-25	Nº DE ORDEN DE TRABAJO	162-25	FECHA	15/10/2025
PROYECTO	CONSORCIO CONSULTORIA GEOTECNIA						
SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA						
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO			LUGAR DE PERFORACIÓN	BUENAVISTA		
COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS: NORTE 1280080.058; ESTE 1108858.449			GEOGRAFICAS: N 7.12784300; W -73.09389900		COTA	1365

PROFUNFIDAD m		DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
0.00	0.70	
0.70	1.40	
1.40	2.00	SUELO ARENOSO DE GRANO GRUESO A MEDIO CON PRESENCIA DE GRANO SUD - ANGULARES CON CONSISTENCIA BLANDA COLOR 7,5 YR 8/3

OBSERVACIONES:

SUPERVISÓ		REVISÓ	
NOMBRE	WILLIAM EDUARDO CORTES	NOMBRE	MARTHA LILIANA BAYONA
CARGO	COORDINADOR DE LABORATORIO	CARGO	GERENTE

HSC	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	CODIGO	FT-EX-003
		FECHA	15/11/2023
		VERSIÓN	2
		Página 1 de 1	

Nº DE PERFORACION	1	Nº DE ORDEN DE SERVICIO	362-25	Nº DE ORDEN DE TRABAJO	362-25	FECHA INICIO	15/10/2025

PROYECTO	CONSORCIO CONSULTORIA GEOTECNIA
SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA
EQUIPO DE PERFORACIÓN	SPT
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO
OPERADOR	ARTURO ALVAREZ
LUGAR DE PERFORACIÓN	BUENAVISTA
COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS: NORTE 1280188.446, ESTE 1109869.766 / GEOGRÁFICAS: N 7.12882288, W 73.0938034
COTA	1358
MÉTODO DE PERFORACIÓN	SPT

EXPLORACION DE CAMPO

Nº MUESTRA	PROFUNDIDAD m		TIPO DE EXTRACCIÓN		Nº de golpes			N	RF	¿RECUPERÓ MUESTRA?		LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)	DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
			SPT	ROTACIÓN	6"	12"	18"			SI	NO		
1	0.00	0.45	✓	-	4	5	8	14	-	✓	-	-	
	0.45	0.90	✓	-	9	7	8	15	-	✓	-	-	
2	0.90	1.35	✓	-	8	8	10	18	-	✓	-	-	Arena limosa SM
	1.35	1.80	✓	-	8	11	14	25	-	✓	-	-	
3	1.80	2.25	✓	-	7	10	8	18	-	✓	-	-	
	2.25	2.70	✓	-	7	12	11	23	-	✓	-	-	
4	2.70	3.15	✓	-	9	12	16	28	-	✓	-	-	Arena limosa SM
	3.15	3.60	✓	-	22	20	20	40	-	✓	-	-	
5	3.60	4.05	✓	-	15	18	18	36	-	✓	-	-	
	4.05	4.50	✓	-	5	10	15	25	-	✓	-	-	
6	4.50	4.95	✓	-	9	11	14	25	-	✓	-	-	Limo baja plasticidad arenoso ML
	4.95	5.40	✓	-	22	19	18	37	-	✓	-	-	
7	5.40	5.85	✓	-	16	18	20	38	-	✓	-	-	
	5.85	6.30	✓	-	19	20	21	41	-	✓	-	-	
8	6.30	6.75	✓	-	20	21	21	42	-	✓	-	-	Arena limosa SM
	6.75	7.20	✓	-	18	23	25	48	-	✓	-	-	
9	7.20	7.65	✓	-	30	28	26	54	-	✓	-	-	
10	7.65	7.95	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
11	7.95	9.45	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
12	9.45	10.95	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	Arena limosa SM
13	10.95	12.45	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
14	12.45	13.95	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
15	13.95	15.45	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	Arena limosa SM

OBSERVACIONES

SUPERVISO		REVISO	
NOMBRE	WILLIAM EDUARDO CORTES	NOMBRE	MARTHA LILIANA BAYONA
CARGO	COORDINADOR DE LABORATORIO	CARGO	GERENTE

CDMB
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA

HSC

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

CODIGO	FT-EX-003
FECHA	15/11/2023
VERSIÓN	2
Página 1 de 1	

Nº DE PERFORACION	3	Nº DE ORDEN DE SERVICIO	162-25	Nº DE ORDEN DE TRABAJO	162-25	FECHA INICIO	16/10/2025

PROYECTO	CONSORCIO CONSULTORIA GEOTECNIA
SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA
EQUIPO DE PERFORACIÓN	SPT
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO
OPERADOR	ARTURO ALVAREZ
LUGAR DE PERFORACIÓN	BUENAVISTA

COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS		GEOGRÁFICAS		COTA	1365
	NORTE	1280080.807	N	7.12784700		
	ESTE	1108662.662	W	-73.0938700		
MÉTODO DE PERFORACIÓN	SPT					

EXPLORACION DE CAMPO

Nº MUESTRA	PROFUNDIDAD m		TIPO DE EXTRACCIÓN		Nº de golpes			Y3E	NF	¿RECUPERÓ MUESTRA?		LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)	DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
			SPT	ROTACIÓN	6"	12"	18"			SI	NO		
1	0.00	0.45	✓	-	2	5	4	9	-	✓	-	-	
	0.45	0.90	✓	-	10	5	7	12	-	✓	-	-	
2	0.90	1.35	✓	-	11	8	3	10	-	✓	-	-	
	1.35	1.80	✓	-	12	7	7	14	-	✓	-	-	
3	1.80	2.25	✓	-	11	8	10	18	-	✓	-	-	Arena limosa SM
	2.25	2.70	✓	-	10	11	11	22	-	✓	-	-	
4	2.70	3.15	✓	-	15	12	13	25	-	✓	-	-	
	3.15	3.60	✓	-	17	14	18	32	-	✓	-	-	
5	3.60	4.05	✓	-	21	19	17	33	-	✓	-	-	Arena limosa SM
	4.05	4.50	✓	-	14	13	14	27	-	✓	-	-	
6	4.50	4.95	✓	-	11	13	17	30	-	✓	-	-	
	4.95	5.40	✓	-	12	15	21	36	-	✓	-	-	
7	5.40	5.85	✓	-	28	17	17	34	-	✓	-	-	
	5.85	6.30	✓	-	23	19	24	43	-	✓	-	-	
8	6.30	6.75	✓	-	17	18	21	39	-	✓	-	-	Arena limosa SM
	6.75	7.20	✓	-	20	21	24	45	-	✓	-	-	
9	7.20	8.70	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
10	8.70	10.20	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
11	10.20	11.70	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	Limo baja plasticidad arenoso ML
12	11.70	13.20	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
13	13.20	14.70	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	

OBSERVACIONES

SUPERVISO	REVISÓ
NOMBRE: WILLIAM EDUARDO CORTES	NOMBRE: MARTHA LILIANA BAYONA
CARGO: COORDINADOR DE LABORATORIO	CARGO: GERENTE

HSC	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	CODIGO	FT-EX-003
		FECHA	15/11/2023
		VERSIÓN	2
		Página 1 de 1	

Nº DE PERFORACION	3	Nº DE ORDEN DE SERVICIO	162-25	Nº DE ORDEN DE TRABAJO	162-25	FECHA INICIO	16/10/2025

PROYECTO	CONSORCIO CONSULTORIA GEOTECNIA		
SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA	OPERADOR	ARTURO ALVAREZ
EQUIPO DE PERFORACIÓN	SPT	LUGAR DE PERFORACIÓN	BUENAVISTA
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO		

COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS		GEOGRÁFICAS		COTA	1364
	NORTE	1280161.012	N	7.12987300		
	ESTE	1108758.046	W	-73.0930060		
MÉTODO DE PERFORACIÓN	SPT					

EXPLORACIÓN DE CAMPO

Nº MUESTRA	PROFUNDIDAD m		TIPO DE EXTRACCIÓN SPT	TIPO DE EXTRACCIÓN ROTACIÓN	Nº de golpes 6"	12"	18"	V R	RF	¿RECUPERÓ MUESTRA? SI	NO	LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)	DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
1	0.00	0.45	✓	-	4	4	3	7	-	✓	-	-	
	0.45	0.90	✓	-	4	6	7	13	-	✓	-	-	
2	0.90	1.35	✓	-	6	7	8	15	-	✓	-	-	Arena limosa SM
	1.35	1.80	✓	-	10	8	10	18	-	✓	-	-	
3	1.80	2.25	✓	-	7	10	11	21	-	✓	-	-	
	2.25	2.70	✓	-	10	12	13	25	-	✓	-	-	
4	2.70	3.15	✓	-	10	11	10	21	-	✓	-	-	
	3.15	3.60	✓	-	9	11	13	24	-	✓	-	-	
5	3.60	4.05	✓	-	15	12	16	28	-	✓	-	-	Arena limosa SM
	4.05	4.50	✓	-	10	16	16	32	-	✓	-	-	
6	4.50	4.95	✓	-	19	15	16	31	-	✓	-	-	
	4.95	5.40	✓	-	15	19	12	31	-	✓	-	-	
7	5.40	5.85	✓	-	21	19	26	45	-	✓	-	-	
	5.85	6.30	✓	-	20	21	24	45	-	✓	-	-	
8	6.30	6.80	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
9	6.80	8.00	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	Arena limosa SM
10	8.00	9.50	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
11	9.50	11.00	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	Arena limosa SM
12	11.00	12.50	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
13	12.00	14.00	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	
14	14.00	15.50	-	✓	R	-	-	-	-	✓	-	-	

OBSERVACIONES

SUPERVISO		REVISO	
NOMBRE	WILLIAM EDUARDO CORTES	NOMBRE	MARTHA LILIANA BAYONA
CARGO	COORDINADOR DE LABORATORIO	CARGO	GERENTE

7.2. Ensayos de Laboratorio

Las muestras obtenidas se seleccionaron las más representativas para enviar al laboratorio solicitando realizar ensayos de granulometría, límites de consistencia y humedad natural.

Tabla 10: Ensayos de Laboratorio Realizados a las Muestras Obtenidas en Campo

ENSAYO	NORMA	No DE ENSAYOS
Granulometría.	INV E – 123- 13	12
Contenido de Humedad.	INV E – 122- 13	12
Límite Plástico e Índice de Plasticidad.	INV E – 126- 13	12
Límite Líquido.	INV E – 125- 13	12
Gravedad especifica	INV E – 128- 13	12
Peso unitario	ASTM D7263-21	5
Corte Directo	INV E – 154- 13	3

El procedimiento y la descripción detallada de cada uno de los ensayos de laboratorio se muestran en los Anexos.

RESULTADO DEL MODELO GEOLOGICO – GEOTECNICO

La caracterización geológica a escala detallada se apoya en la delimitación de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI) (SGC - UNAL, 2016), las cuales permiten agrupar sectores con materiales que presentan comportamiento mecánico y origen geológico similares. Estas unidades constituyen el insumo principal para la evaluación del terreno, ya que facilitan distinguir entre suelos y rocas, reconocer espesores significativos de suelo residual o transportado, y establecer las condiciones estructurales y de meteorización del macizo rocoso.

En el sector Buenavista se registran dos materiales, asociados a un suelo residual natural formado por la meteorización del gneis de la Formación Bucaramanga, con erosión superficial leve y un suelo residual antrópico con escombros presente en las zonas urbanizadas.

SUELO RESIDUAL SOBRE GNEIS CUARZO-FELDESPÁTICO DE LA FORMACIÓN BUCARAMANGA (Srgfb)

Corresponde al material residual desarrollado por meteorización profunda del basamento metamórfico de la formación Bucaramanga, es un suelo arcillo-limoso a arcillo-arenoso, de color pardo amarillento a rojizo y estructura masiva, desarrollados sobre pendientes de 15° a 30°, donde se observan evidencias de erosión laminar leve. La cohesión es baja a media, con comportamiento dúctil en condiciones húmedas.

SUELO RESIDUAL ANTRÓPICO LLENO DE ESCOMBROS (Srale)

Esta unidad se localiza en el sector urbanizado del área de estudio, donde el suelo residual, ha sido modificado por cortes, nivelaciones y rellenos para la construcción de vías y viviendas, presentando materiales arcillosos residuales, gravas sueltas, fragmentos de concreto, ladrillo y tierra suelta.

CÓDIGO UGI	UNIDADES GEOLÓGICAS PARA INGENIERÍA	ÁREA HECTÁREAS
Srale	Suelo residual antrópico lleno de escombros	0,62
Srgfb	Suelo residual sobre gneis cuarzo-feldespático de la formación Bucaramanga	0,36

Tabla 11. Clasificación de las unidades geológicas para ingeniería UGI, sector Buenavista

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Barbat , Y. Vargas , L. Pujades y J. Hurtado , «Evaluación probabilista del riesgo sísmico de estructuras en base en la degradación de rigidez,» ELSEVIER, Barcelona, 2015.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIRÍA SÍSMICA. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR-10. Bogóta, AIS, 2010.

A. T. Council, «ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings,» California, 1996.

BLOOM, A. Geomorphology: A systematic analysis of Late Cenozoic landforms. Waveland Pr Inc, Third edition, 482 p. 2004.

BONACHEA, JAIME Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos, PhD, tesis. 2006.

BOWLES, Joseph E. Foundation Analysis and Design. Fourth Edition. McGraw-Hill Book Company. Singapore, 1988.

BUENO y SOLARTE, Geología, geotecnia y comportamiento erosivo de las áreas de reserva forestal de Bucaramanga. Proyecto de grado (inédito). UIS, Escuela de Geología. Bucaramanga, Santander. Vol. 1, 140 Págs. 1994.

CARREÑO, M.L., CARDONA, O.D., Y BARBAT, A.H. Metodología para evaluación del desempeño de la gestión del riesgo. Monografías de Ingeniería Sísmica. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Barcelona. 2004

CASTRO, E., VALENCIA, A., OJEDA, J., MUÑOZ, F. Y FONCESA, S. Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa, Guía metodológica, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia. 2001

CEDIEL, F. El Grupo Girón una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental: Servicio Geológico Nacional (Colombia), Bol, Geológico, v. XVI, p. 5-96. 1968.

CHOW, V., T., MAYS, L., W., MAIDMENT, D., R., "Hidrología Aplicada", McGraw-Hill, Santafé de Bogotá. 1994.

Decreto 1523 de 24 de abril 2012 por el cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.

DE PORTA, J., La terraza de Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander (Colombia), Bol de Geología, N°3, p. 3-13. 1959.

DELGADO VARGAS, Manuel. Ingeniería de Fundaciones. Primera Edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 1996.

Departamento Nacional de Estadística (DANE), Censo general 2018, disponible en: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018

DIEDERIX, H., TORRES, E., HERNÁNDEZ, C. Y BOTERO, P. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas, y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. INGEOMINAS, 84 p. 2008

ETAYO,. ET AL., Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Publicaciones geológicas especiales INGEOMINAS, (14-I): 235 p. 1983.

FELL, R. Landslide risk assessment and acceptable risk. Canadian Geotechnical Journal 31, 261–272. 1994

GLADE, T.,. Vulnerability assessment in landslide risk analysis. Die Erde 134, 121- 138. 2003

GOMEZ, I. MALDONADO, E. CHIO, G. "Simulación de funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño sísmico para edificaciones de hormigón armado en sistema pórtico". 2008.

GONZALEZ DE VALLEJO, Luis et al. Ingeniería Geológica. Madrid. PEARSON Prentice Hall, 744 p. 2002

Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. 2015.

HERMELÍN, M. Bases de Geología Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 1987.

INGEOMINAS, Microzonificación Sísmica del Área Metropolitana de Bucaramanga. Fase I. Bucaramanga. (Hoy Servicio Geológico Colombiano). 1997.

INGEOMINAS. Geología del departamento de Santander. (Hoy Servicio Geológico Colombiano) 1999.

INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. (Hoy Servicio Geológico Colombiano) 2001.

INGEOMINAS. Mapa geológico de Colombia. Escala 1:1'000.000. Bogotá. (Hoy Servicio Geológico Colombiano). 2007.

INGEOMINAS. Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. (Hoy Servicio Geológico Colombiano). 2009.

JIMÉNEZ, G., SPERANZA, F., FACCENA, C., BAYONA, G. Y MORA, A. Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial Fan: Evidence for a < 3mm/yr slip rate for the Bucaramanga-Santa Marta Fault, Colombia. Journal of South American Sciences, In Press. 2014.

JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Mecánica de suelos Tomo II. Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos. Editorial Limusa. México, 1991.

JULIVERT, M. Morfoestructura de la Zona de la Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S.A.). p. 9-41. 1958.

LANGENHEIM, R. L., JR. Preliminary report on the stratigraphy of Giron formation in Santander and Boyacá: Inst. Geol. Nal. (Colombia), Informe 1011, 20 p. 1954.

LEONE, F., ASTE, J.P., LEROI, E., Vulnerability assessment of elements exposed to mass-moving: working toward a better risk perception. In: Senneset, K. (Ed.), Landslides. Balkema, Rotterdam, pp. 263– 269. 1996

L. G. Pujades, Y. F. Vargas Alzate , A. H. Barbat y J. R. Gonzáles Drigo , «Parametric model for capacity curves,» Springer , 2014.

K. Poljanšek y P. Fajfar, «A NEW DAMAGE MODEL FOR THE SEISMIC DAMAGE ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES,» de The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.

MACCAFERRI, Página web principal. Canalización. http://www.maccaferri-arg.com.ar/soluciones/soluciones-hidraulicas/canalizacion-retangular-y-trapezodial/16198-2.html. 2014.

MESCHEDE, M. Y FRISCH, W. A plate-tectonic model for the Mesozoicand Early Cenozoic history of the Caribbean plate. Tectonophysic 296, p. 269-291. 1998.

Minero-Ambiental y Nuclear INGEOMINAS. Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia. p. 92.

Ministerio de Minas y Energía, Servicio Geológico Colombiano SGC, Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa,182 páginas. 2015

Monsalve, G.,"Hidrología en la Ingeniería", Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C. 1999.

Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente NSR-10. 2010.

NORMAS GEOTECNICA para el control y para la realización de estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos en el área de jurisdicción de la CDMB, Litografía Editar Impresores 2009.

NTC 3692 – MÉTODO DE ENSAYO PARA MEDIR EL NÚMERO DE REBOTE DEL CONCRETO ENDURECIDO

NTC 5551 – DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO.

NORMA ACI 228.2R - SCANNER PRUEBA DE DETECCIÓN DE REFUERZOS Y RECUBRIMIENTOS EN CONCRETO.

PECK, Ralph, HANSON, Walter E. THORNBURN, Thomas H. Ingeniería de cimentaciones. Talleres de imprenta técnica de Azafrán. México, Enero de 1982.

PMA: GCA. Formato para el inventario de Movimientos en Masa, Versión 1.1. Proyecto Multinacional Andino. 2005.

R. Aguilar, «Daño sísmico global en edificios con muros de cortante,» Monografías de ingeniería sísmica, 1997.

RISK-UE, «An advanced approach to earthquake risk scenarios, with applications to different European cities,» 2001-2004.

ROYERO J. & CLAVIJO J. Mapa geológico generalizado. Departamento de Santander. Escala 1:400.000 Memoria explicativa. Instituto de Investigación e información geo científica, 2001.

Servicio Geológico Colombiano (SGC), Documento Metodológico De la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000. Versión No 2. 2013.

Servicio Geológico Colombiano (SGC), Guía metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Bogóta, SGC, 2017

Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC), Coberturas de la tierra. Concepto. https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=471&conID=1447. 2014.

SUÁREZ, JAIME. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Publicaciones UIS. 1998.

SUAREZ, JAIME. Deslizamientos, Análisis geotécnico, Volumen 1. División de Publicaciones UIS, Bucaramanga, 588 pag. 2009.

SUAREZ, JAIME Deslizamientos, Técnicas de remediación, Volumen 2. División de Publicaciones UIS, Bucaramanga, 417 pag. 2009.

T. Yin, H.-f. Lam y H.-p. Zhu, «Statistical detection of structural damage based on model reduction,» Shanghai University and Springer-Verlag, 2009.

Verstappen, H. & Van Zuidan, R. 1975. ITC System of Geomorphological Survey. ITC, Amsterdan, 52 p.

TERZAGHI, Karl; PECK Ralph B. Mecánica de suelos en la Ingeniería práctica. Segunda edición. Cuarta reimpresión. Editorial El Ateneo S.A. España, 1980.

U. S. ARMY CORPS ENGINEERS. "Hydrologic Modeling System HEC-HMS" Technical Reference Manual, Hydrologic Engineering Center, Massachuusetts. 2000.

VARGAS, R., M. DÍAZ-GRANADOS. "Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia," XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Cali. 1998

Vulnerabilidad (2004), Oficina de las Naciones Unidas para la prevención y atención de desastres, Disponible en: http://www.unisdr.org/2004/campaign/booklet-spa/page8-spa.pdf.

WARD, D. Y GOLDSMITH, R. Geología de los cuadrangulos H-12: Bucaramanga y H-13: Pamplona, Departamento de Santander. Memoria explicativa. Boletín geológico, Vol. XXI, N°1-3, p. 1-131. 1973.

WARD, D.E. et al. Mapa Geológico de la Plancha 109 Rionegro. INGEOMINAS, 1977. Versión Digital 2010.

Y. F. Vargas Alzate, «Análisis estructural estático y dinámico probabilista de edificios de hormigón armado. Aspectos metodológicos y aplicaciones a la evaluación del daño.,» Barcelona, 2013.

Y. F. Vargas, L. G. Pujades, A. H. Barbat y J. E. Hurtado, «Evaluación probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico de edificios de hormigón armado,» Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería ELSEVIER, pp. 63-78, 2013.

Y. M. R. Ángeles, «Comparación entre el análisis determinista y probabilista del riesgo sísmico de estructuras,» Barcelona, 2013.

Y.-J. P. a. A. H.-S. Ang, «Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete,» ASCE, 1985.

ZAFIRI, Z., HAVSOK, J. Y HANYGA. An insight into the Bucaramanga nest. Tectonophysics 443, p. 93-105. 2007

BARRIO BUENAVISTA

ANEXO SUSCEPTIBILIDAD

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA (CDMB)

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA DE LAS ZONAS AFERENTES AL SALÓN COMUNAL DEL BARRIO BUENAVISTA MUNICIPIO DE BUCARAMANGA - SANTANDER

SECTOR BUENAVISTA



CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN ZONAS PRIORIZADAS DEL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA, DEFINIDAS POR LA CDMB, COMO APOYO AL CUMPLIMIENTO DE ÓRDENES, ACCIONES JUDICIALES Y ACTUACIONES PREVENTIVAS DE LOS ÓRGANOS DE CONTROL RELACIONADAS CON LA GESTIÓN DEL RIESGO.

CDMB
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA

TABLA DE CONTENIDO

PREÁMBULO 6

1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO 8

2. ANALISIS GEOLÓGICO 10

2.1. METODOLOGÍA 11

2.2. GEOLOGÍA 12

2.2.1. GEOLOGÍA REGIONAL 12
2.2.2. UNIDADES GEOLÓGICAS DE INGENIERÍA (UGI) 22

2.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL 24

2.3.1. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DE COLOMBIA 24
2.3.2. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER 25

3. GEOMORFOLOGÍA 27

3.1. MORFOGÉNESIS 27

3.2. MORFOMETRÍA 27

3.2.1. PENDIENTES 27
3.2.2. CURVATURA 29
3.2.3. RUGOSIDAD 30

3.3. MORFODINÁMICA 31

3.4. ELEMENTOS GEOMORFOLOGICOS 32

3.4.1. GEOFORMAS DE ORIGEN DENUDACIONAL 32
5.4.2. GEOFORMAS DE ORIGEN ANTRÓPICO 33

4. COBERTURA DEL SUELO 36

4.1. TEJIDO URBANO CONTINUO – VIVIENDAS (TUCV) 36

4.2. TEJIDO URBANO CONTINUO – CENTRO DEPORTIVO (TUCCD) 36

4.3. RED VIAL URBANA (RVU) 36

4.4. HERBAZAL DENSO DE TIERRA FIRME ARBOLADO (HDTFA) 37

5. ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA 39

5.1. MARCO METODOLÓGICO 39
5.2. VARIABLES CONSIDERADAS 39
5.3. METODOLOGÍA 40
5.4. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD 47
5.5. RECLASIFICACIÓN FINAL Y VECTORIZACIÓN 47
5.6. GRADOS DE SUSCEPTIBILIDAD 47
5.7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN 49

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Contendido Geología 10
Tabla 2. Clasificación de las unidades geológicas para ingeniería UGI, sector Buenavista 23
Tabla 3. Clasificación de los elementos geomorfológicos del sector Buenavista..... 34
Tabla 4. Clasificación de las coberturas del suelo, sector Buenavista..... 37
Tabla 5. Calificaciones de Susceptibilidad y sus descripciones, sector Buenavista 40
Tabla 6. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de Pendientes, sector Buenavista 40
Tabla 7. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de UGI, sector Buenavista..... 42
Tabla 8. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de EGMF, sector Buenavista. 43
Tabla 9. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de Cobertura y Uso del Suelo, sector Buenavista..... 44
Tabla 10. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de Curvatura, sector Buenavista 45
Tabla 11. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de Rugosidad, sector Buenavista 46

ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación detallada del área de estudio – Sector Buenavista 8
Ilustración 2. Ubicación detallada del área de estudio – Sector Buenavista 9
Ilustración 3 Unidad Neis de Bucaramanga ubicada al este del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 1999). 15
Ilustración 4 Formación Silgará en los alrededores de Matanza y Suratá. Ubicada al Noreste del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 1999) 16
Ilustración 5 Formación Bucaramanga Miembro Órganos (Qbo), al oeste del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001) 17
Ilustración 6 Formación Bucaramanga Miembro Finos, al norte del municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001). 19
Ilustración 7 Formación Bucaramanga Miembro Gravoso, al norte del municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001). 20
Ilustración 8 Formación Bucaramanga Miembro Limos Rojos (Tomado de INGEOMINAS, 2001). 21
Ilustración 9 Perfil típico y espesores promedio de la Formación Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001). 21
Ilustración 10 Suelo residual sobre gneis cuarzo-feldespático de la formación Bucaramanga, sector Buenavista 22
Ilustración 11 Mapa de unidades geológicas para ingeniería UGI, sector Buenavista 23
Ilustración 12. Mapa de pendiente del terreno, sector Buenavista 28
Ilustración 13. Mapa de curvatura del terreno, sector Buenavista 29
Ilustración 14. Mapa de rugosidad del terreno, sector de Buenavista 30
Ilustración 15. Ladera muy abrupta con inestablidad y desprendimientos leves de material, sector Buenavista 31
Ilustración 16. Ladera disectada muy abrupta en el sector de Buenavista al costado de la vía principal. 33
Ilustración 17. Laderas asociadas a construcciones conforma los elementos geomorfológicos de origen antrópico del sector Buenavista 34
Ilustración 18 Mapa de elementos geomorfológicos, sector Buenavista 35
Ilustración 19. Red vial urbana del sector Buenavista 37
Ilustración 20. Mapa de la cobertura del suelo sector Buenavista 38
Ilustración 22. Mapa de Susceptibilidad por la variable de Pendientes, sector Buenavista 41
Ilustración 23. Mapa de Susceptibilidad por la variable de UGI, sector Buenavista 42
Ilustración 24. Mapa de Susceptibilidad por la variable de EGMF, sector Buenavista 43
Ilustración 25. Mapa de Susceptibilidad por la variable de Cobertura, sector Buenavista 44
Ilustración 26. Mapa de Susceptibilidad por la variable de Curvatura, sector Buenavista 45
Ilustración 27. Mapa de Susceptibilidad por la variable de Rugosidad, sector Buenavista 46
Ilustración 28. Mapa de Susceptibilidad por movimientos en Masa, sector Buenavista 49

PREÁMBULO

Teniendo en cuenta que el municipio de Bucaramanga y su área metropolitana se encuentran emplazados sobre un relieve montañoso altamente disectado, caracterizado por laderas de pendientes medias a muy abruptas, materiales geológicos con distintos grados de meteorización y una creciente intervención antrópica asociada al desarrollo urbano, se reconoce la existencia de condiciones naturales y antrópicas que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa.

La dinámica geomorfológica del territorio, sumada a factores condicionantes tales como la pendiente del terreno, la naturaleza y comportamiento geomecánico de los materiales (Unidades Geológicas para Ingeniería – UGI), la cobertura y uso del suelo, así como variables morfométricas como la curvatura y la rugosidad del terreno, configuran escenarios diferenciales de susceptibilidad frente a procesos como deslizamientos, caídas de roca, reptación y movimientos complejos. Estas condiciones pueden intensificarse por la acción de agentes detonantes como la precipitación, la sismicidad regional y las modificaciones antrópicas del terreno (cortes, rellenos, explanaciones y sobrecargas).

En este contexto, la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga – CDMB, en cumplimiento de sus funciones relacionadas con la gestión del riesgo y la planificación territorial, ha considerado prioritario adelantar estudios orientados a la identificación y zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en sectores específicos de su jurisdicción, con el propósito de aportar insumos técnicos para la toma de decisiones, la formulación de medidas de prevención y mitigación, y el fortalecimiento de la gestión integral del riesgo.

El análisis de susceptibilidad constituye una herramienta técnica fundamental para estimar la propensión relativa del terreno a experimentar movimientos en masa, a partir de la evaluación integrada de variables geológicas, geomorfológicas y de cobertura superficial, bajo un enfoque multicriterio y espacial. Es importante precisar que la susceptibilidad no implica la ocurrencia inminente del fenómeno, sino que establece una categorización del territorio en función de su mayor o menor predisposición a presentar este tipo de procesos, independientemente del momento en que puedan activarse.

En consecuencia, el presente estudio desarrolla la caracterización física del medio, la sistematización y análisis espacial de los factores condicionantes, y la modelación de la susceptibilidad por movimientos en masa mediante técnicas de análisis geoespacial, generando cartografía temática que clasifica el territorio en diferentes niveles de susceptibilidad (muy baja, baja, media, alta y muy alta). Los resultados obtenidos constituyen un insumo técnico para la gestión del riesgo, la planificación urbana y la definición de acciones preventivas en los sectores evaluados.

1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO



Ilustración 1. Ubicación detallada del área de estudio – Sector Buenavista

El sector Buenavista se localiza en el costado nororiental de la ciudad de Bucaramanga, sobre la ladera oriental que asciende desde el barrio Morrorico hacia la vereda Bocabuenavista, en inmediaciones de la vía secundaria que comunica la zona urbana con los sectores rurales de la parte alta. El área de estudio se sitúa alrededor de los 1.360 m s. n. m., en un entorno de ocupación residencial dispersa desarrollado sobre laderas boscosas del Macizo de Santander. Su localización marca una transición clara entre el borde urbano consolidado y las laderas naturales del oriente de la ciudad, con presencia de viviendas, taludes intervenidos y coberturas vegetales densas.

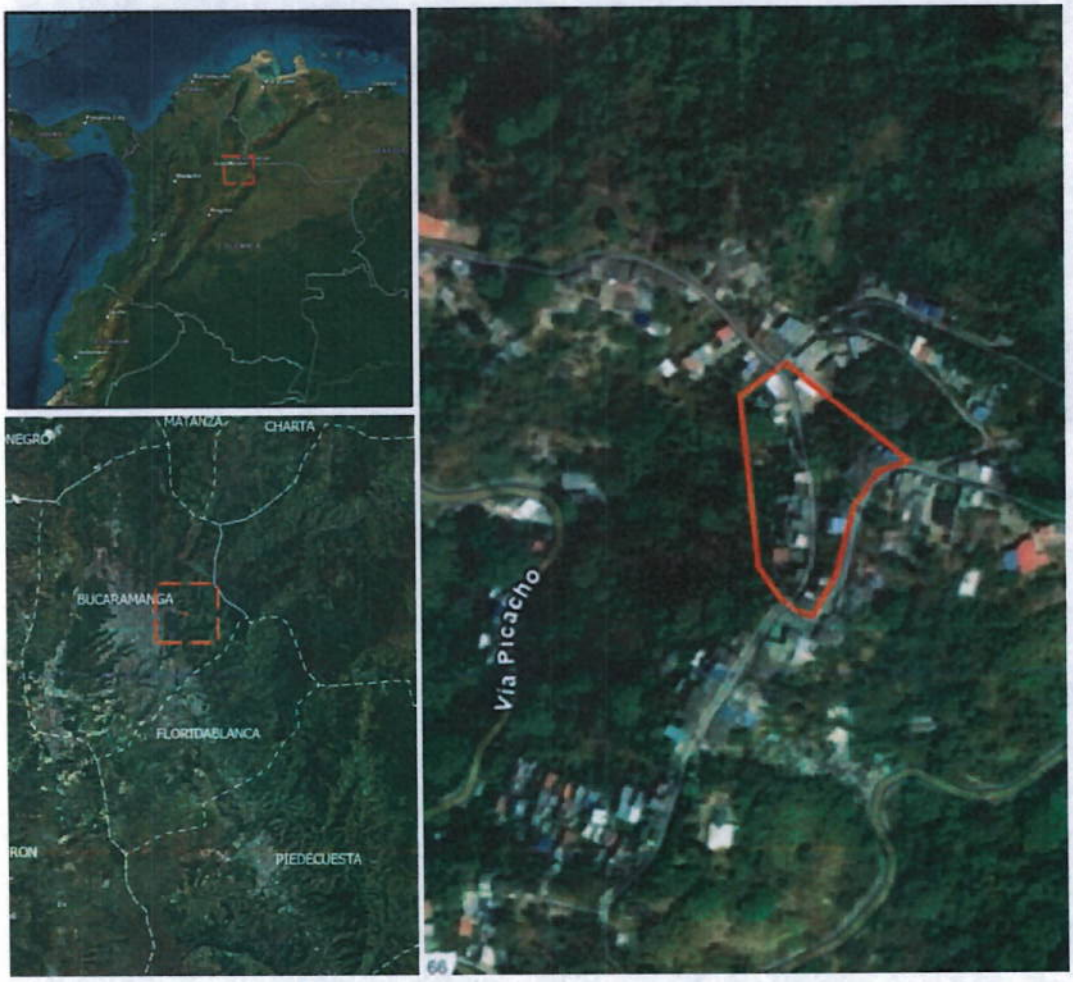


Ilustración 2. Ubicación detallada del área de estudio – Sector Buenavista

2. ANALISIS GEOLÓGICO

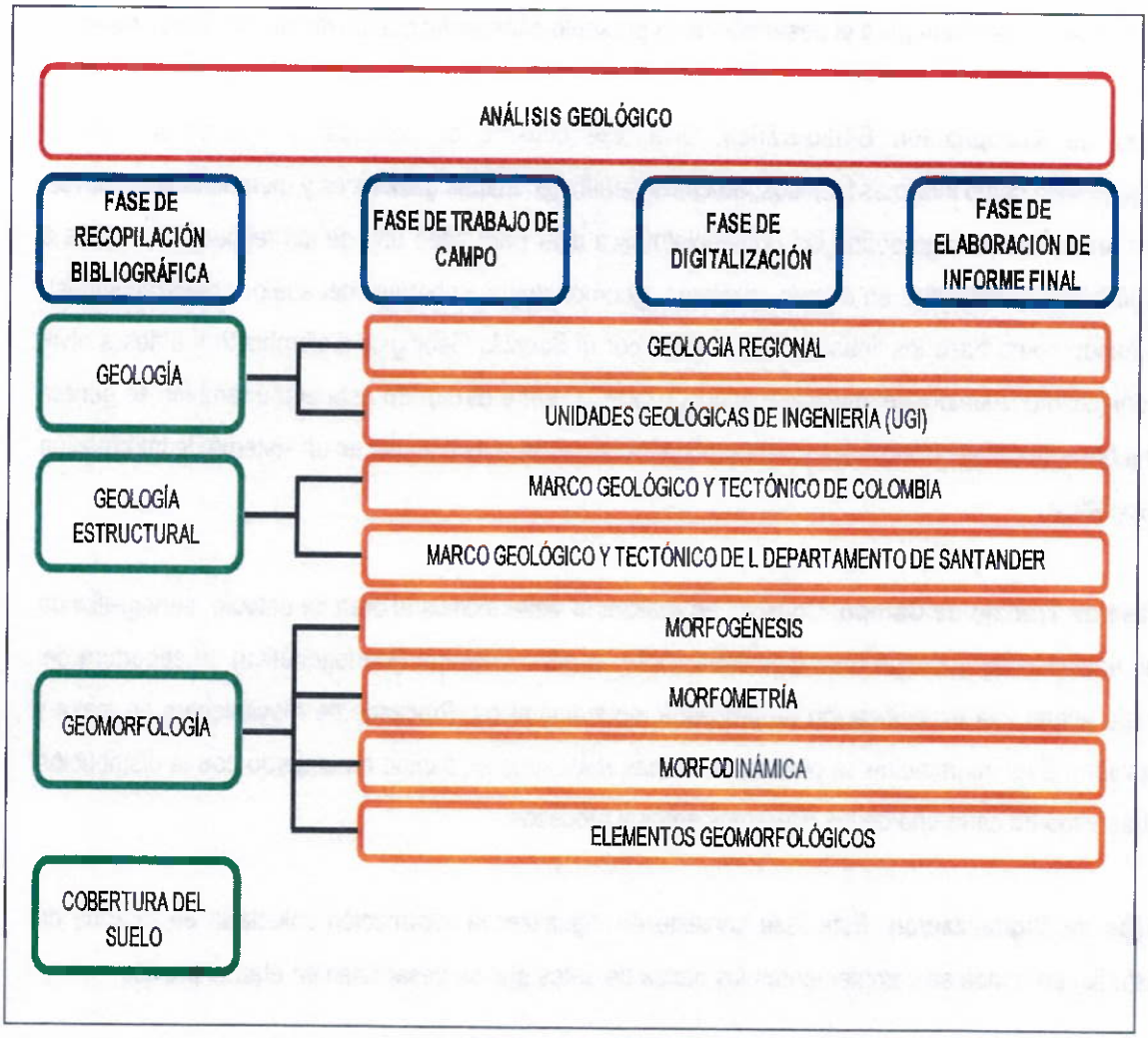


Tabla 1. Contendido Geología

2.1. METODOLOGÍA

La metodología usada para el desarrollo de la presente consultoría consta de las siguientes fases:

Fase de Recopilación Bibliográfica. Esta fase consiste en consultar y seleccionar material bibliográfico como informes técnicos, artículos científicos, mapas geológicos y memorias explicativas, con lo cual se permite definir las nomenclaturas a usar para cada uno de los respectivos mapas a visualizar y cartografiar en campo (geología, geomorfología, cobertura del suelo y deslizamientos), tomando como base los lineamientos usados por el Servicio Geológico Colombiano y entes a nivel local (CDMB, Alcaldía del municipio con EOT y POT, entre otros). En esta etapa también se genera una base de datos bibliográfica y cartográfica inicial del área de estudio, en un sistema de información geográfica.

Fase de Trabajo de Campo. Consiste en realizar la visita técnica al área de estudio, cartografiando las unidades de geología para ingeniería (UGI), la geomorfología (Morfogenética), la cobertura del suelo actual y la especificación de procesos morfodinámicos (Procesos de movimientos en masa y erosión). Esta información se plasma en mapas realizados en campo de acuerdo con la distribución observada de cada uno de los diferentes entes y procesos.

Fase de Digitalización. Esta fase consiste en digitalizar la información colectada en la zona de estudio, en donde se complementan las bases de datos que se desarrollan en etapas previas.

Fase de Elaboración de Informe Final. Consiste en la redacción de un informe técnico detallado donde se explican los principales rasgos geológicos, así como los rasgos geomorfológicos, cobertura del suelo y procesos morfodinámicos.

2.2. GEOLOGÍA

Este capítulo describe las características geológicas regionales y las Unidades Geológicas de ingeniería (UGI) a nivel del área de estudio.

Para realizar el análisis geológico se tienen en cuenta primeramente estudios previos regionales y locales, de entidades oficiales y particulares, dentro de las que se encuentran el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la Universidad Industrial de Santander (UIS), la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), como también la Alcaldía de Bucaramanga (Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) y Plan de Ordenamiento territorial (POT)), los cuales permiten conocer la información geológica desarrollada en el área a diferentes escalas, permitiendo la revisión preliminar de estudios generales, como también la estandarización y uso de nomenclaturas para el presente estudio.

Geológicamente la zona más importante del área metropolitana (Bucaramanga) se encuentra ubicada dentro de depósitos de terraza y de cono aluvial (Ward et al., 1973) en la denominada Terraza de Bucaramanga, de edad Pleistoceno-Holoceno. De acuerdo con De porta (1959) y Julivert (1963), la parte inferior de la Terraza de Bucaramanga está compuesta de grava, arena, limo y capas menores arcillosas fluviales; mientras la parte superior está compuesta de cantos no calibrados que se interpretan como depósitos coluviales, los cuales adelgazan lejos del frente montañoso.

2.2.1. GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de Buenavista, localizada al oeste de la ciudad de Bucaramanga, se encuentra dentro del dominio del Macizo de Santander, sobre la Formación Bucaramanga (pEbm), unidad metamórfica de edad Paleozoica inferior que constituye el basamento cristalino regional. Este sector forma parte del flanco occidental de la Cordillera Oriental, donde afloran extensamente rocas de alto grado metamórfico, modeladas por complejos procesos tectono-metamórficos y una prolongada historia de deformación (Ward et al., (1973); SGC, 2015).

El área de Buenavista corresponde a una zona estructuralmente elevada, con topografía abrupta y laderas disectadas, resultado de la erosión diferencial sobre rocas metamórficas muy competentes. La litología predominante está compuesta por gneises cuarzo-feldespáticos, esquistos micáceos y migmatitas, productos del metamorfismo regional bajo condiciones de facies anfibolita a granulita, lo que indica una evolución geológica de alto grado térmico y presión moderada. Estas características litológicas son herencia directa de la evolución paleozoica temprana del basamento andino, que en el caso de Bucaramanga y su entorno occidental representa uno de los núcleos metamórficos más antiguos de la Cordillera Oriental (Ward et al., (1973)).

La estructura interna del área refleja una intensa deformación dúctil, evidenciada en la foliación bien desarrollada, las lineaciones minerales orientadas y los pliegues apretados en los niveles de gneises y esquistos. Esta organización estructural se relaciona con los eventos de deformación vinculados a la orogenia Famatiniana y posteriores reactivaciones andinas, que afectaron significativamente el basamento paleozoico. Durante el Mesozoico y Cenozoico, el levantamiento de la Cordillera Oriental reactivó sistemas de fallas preexistentes, favoreciendo la exposición de estas rocas metamórficas y su control sobre la morfología actual del relieve (SGC, 2015).

En el contexto tectónico regional, el sector de Buenavista se encuentra próximo a la Falla de Bucaramanga–Santa Marta, una estructura mayor que define el límite entre bloques de diferente comportamiento mecánico. Esta falla ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo estructural del norte de Colombia, funcionando como zona de cizalla profunda y límite tectónico entre los dominios corticales occidental y oriental (Ward et al., (1973)). Su influencia se refleja en el patrón de drenaje, en la orientación de las fracturas secundarias y en la disposición de los afloramientos metamórficos.

La Formación Bucaramanga (pEbm) representa una unidad de rocas metamórficas de alto grado perteneciente al basamento paleozoico de la Cordillera Oriental. Está compuesta principalmente por gneises cuarzo-feldespáticos, esquistos micáceos, anfibolitas y migmatitas, todos ellos resultado de procesos metamórficos regionales profundos. Los gneises muestran una textura bandeada y una foliación bien desarrollada, producto de la recristalización de minerales durante la deformación dúctil.

Las bandas claras, ricas en cuarzo y feldespato, alternan con bandas oscuras compuestas por biotita, hornblenda y, en menor proporción, granate.

Los esquistos asociados presentan un clivaje fino y una composición dominada por mica, cuarzo y feldespato, con presencia local de minerales índice como sillimanita o estaurolita, que indican condiciones de metamorfismo medio a alto. Las migmatitas son comunes en el sector y evidencian procesos de fusión parcial (anatexis) que afectaron al basamento durante los eventos térmicos paleozoicos, dando lugar a texturas irregulares y venas de material leucocrático (Ward et al., (1973)).

Estructuralmente, la unidad pEbm presenta una foliación dominante con rumbo NE–SW y buzamiento variable hacia el sureste, coincidente con el patrón regional del Macizo de Santander. Esta orientación, junto con la presencia de fracturas y pliegues menores, sugiere una evolución tectónica compleja con múltiples fases de deformación superpuestas. Los contactos entre la Formación Bucaramanga y las unidades más jóvenes del Cuaternario (Qtf y Qal) son principalmente erosivos o tectónicos, y marcan una clara discontinuidad litológica y temporal (SGC, 2015).

La unidad pEbm constituye el núcleo estructural más antiguo de la región, sirviendo como soporte geológico para las unidades sedimentarias y cuaternarias circundantes. Su estudio es esencial para comprender la evolución tectono-metamórfica del sector occidental de Bucaramanga y del Macizo de Santander en general. El reconocimiento de estas rocas en superficie, su foliación y su disposición espacial reflejan la influencia directa de los procesos orogénicos paleozoicos y andinos que modelaron la Cordillera Oriental (Ward et al., (1973); SGC, 2015).

Regionalmente la zona de estudio está relacionada a los bloques tectónicos delimitados por la Falla de Suárez al occidente y la Falla Bucaramanga al Oriente (INGEOMINAS, 2007). A continuación, se describen algunas unidades presentes en esta región, tomando como base el estudio de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga (2001):

- **Neis de Bucaramanga (p€b):** Definido por Goldsmith (1971), esta unidad está constituida por una secuencia de roca metasedimentaria de alto grado de metamorfismo conformado principalmente por paragneis pelítico, semipelítico y arenáceo, esquistos y neis calcáreo, mármol, neis horbléndico y anfibolita. El neis incluye dos tipos de zonas de migmatita, una donde el paragneis está mezclado con roca granítica gnéisica y otra donde ambos están cortados por masas pequeñas de granito no foliado (Ward *et al.*, 1973). Aflora al oriente del área metropolitana de Bucaramanga y se localiza al este de la Falla Bucaramanga (Figura 3). Entre los municipios de Floridablanca y Piedecuesta esta unidad presenta variación en la orientación de la foliación, lo cual indica perturbaciones tectónicas severas. Se encuentra en contacto con intrusivos jurásicos graníticos y se considera de edad precámbrica (Ward *et al.*, 1973).
- **Formación Silgará (pDs):** Nombre propuesto por Ward *et al.*, (1973) para referirse a una secuencia de rocas clásticas metamorfoseadas de estratificación delgada, compuestas por filitas, cuarcitas, esquistos, metareniscas y menores cantidades de pizarra y filita calcárea, cuya sección tipo se localiza en la Quebrada Silgará. Las relaciones estratigráficas sugieren que esta unidad suprayace al Neis de Bucaramanga e infrayace rocas del Devónico.

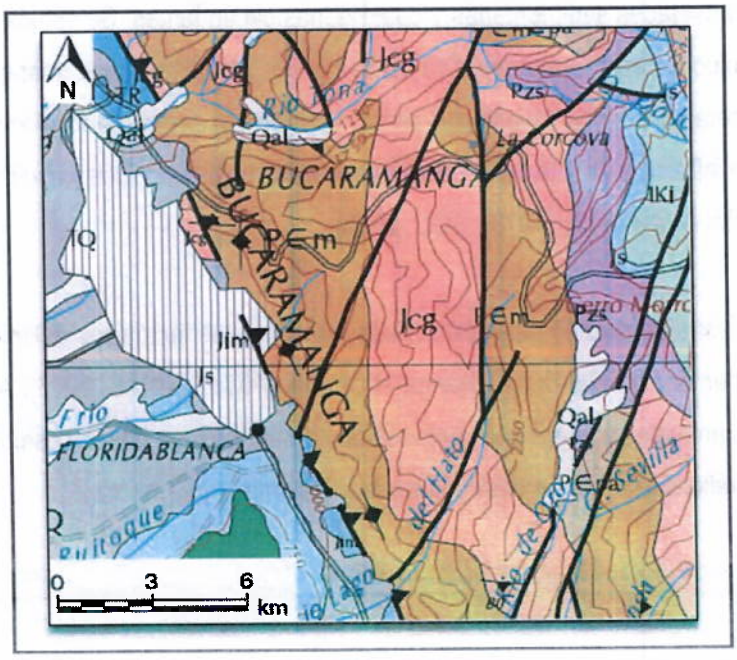


Ilustración 3 Unidad Neis de Bucaramanga ubicada al este del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 1999).

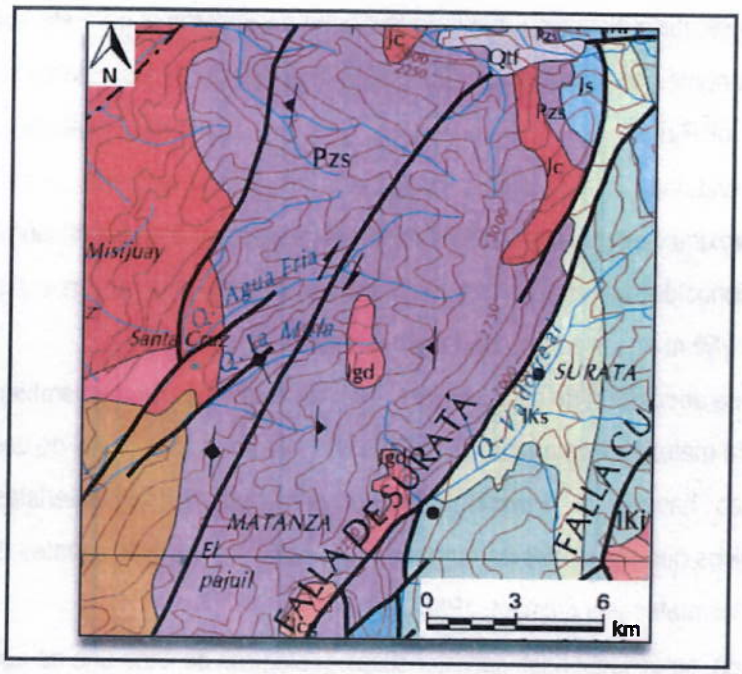


Ilustración 4 Formación Silgará en los alrededores de Matanza y Suratá. Ubicada al Noreste del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 1999).

- **Formación Bucaramanga:** La Formación Bucaramanga hace parte de los depósitos cuaternarios descritos por Ward *et al.*, (1973). Esta unidad inicialmente fue propuesta por Hubach (1951), quien la subdivide en: Miembro Órganos (Qbo) y Miembro Finos (Qbf). Posteriormente De Porta (1959) divide la formación Bucaramanga en tres paquetes: uno inferior conformado por niveles discontinuos de gravas clasto soportados y con lentes arenosos intercalados con un espesor de 150m; un segundo paquete con un espesor de 18m ubicado en la parte superior, compuesto de sedimentos arcillosos y un tercer paquete de 8 a 15 metros de espesor, constituido por una mezcla de fragmentos angulares gruesos y finos arenosos. Sin embargo, después de trabajos de campo detallados el INGEOMINAS subdivide esta unidad en cuatro miembros: Órganos (Qbo), Finos (Qbf), Gravoso (Qbg) y Limos Rojos (Qblr); de acuerdo con las dataciones publicadas en el proyecto hidroeléctrico Fonce-Suárez, la edad de la Formación Bucaramanga es menor que 730.000 años (Pleistoceno) (INGEOMINAS, 1997).
- Morfológicamente esta unidad corresponde a un abanico aluvial erosionado posiblemente asociado en gran parte al Río Suratá, acumulado sobre una depresión de origen tectónico,

sobre la cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Este abanico limita al nororiente y oriente con el Macizo de Santander, al noroccidente y occidente con el Cerro de Palonegro y el Río de Oro, y al sur con la Mesa de Ruitoque. Presenta una superficie suavemente ondulada, con pendiente ligeramente inclinada al occidente, entre 2° y 7°, y una extensión aproximada de 60 a 80 km². El valor real del espesor de la Formación Bucaramanga es aún desconocido, sin embargo, a partir de cortes geológicos se ha estimado un valor promedio de 250 m en las zonas con mayor espesor.

- El ambiente de deposición de esta unidad ha sido considerado como un ambiente fluvial, con alternancia de materiales de origen aluvial tipo cono de deyección, flujos de escombro, canal y lagunar, en base a la granulometría que presentan dichos materiales, los rasgos geomorfológicos que presenta esta formación, así como los posibles agentes de transporte y la fuente de los materiales (Julivert, 1958).
- A continuación, se describen las características geológicas de cada uno de estos miembros, de acuerdo con la información geológica que se presenta en los estudios del INGEOMINAS (2001).

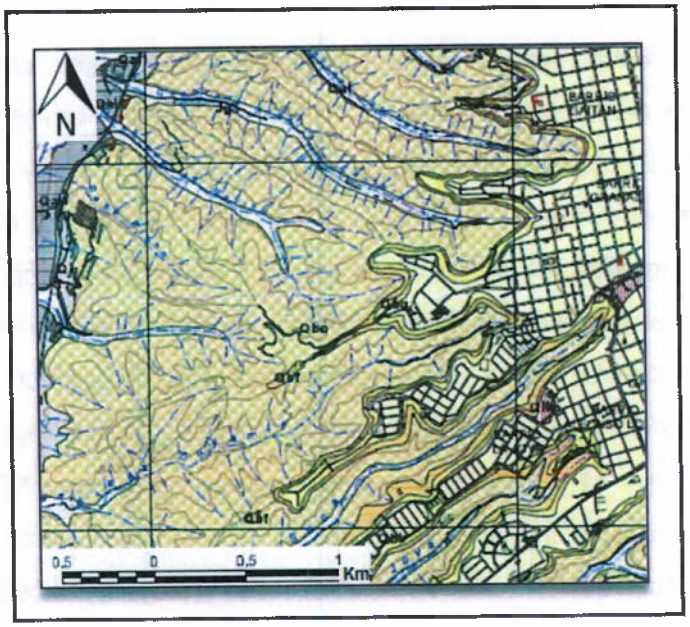


Ilustración 5 Formación Bucaramanga Miembro Órganos (Qbo), al oeste del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

- Miembro Órganos (Qbo): Esta unidad fue definida por Hubach (1951) y presenta un espesor mayor a 180m, siendo este el más potente de la Formación Bucaramanga. Presenta una serie 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, según Bueno y Solarte (1994). Los niveles lenticulares descritos por Hubach (1951), algunos son niveles limo-arenosos de hasta 5 m; otros son niveles de aspecto conglomerático que forman los depósitos de gravas y bloques poco consolidados 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 con una composición predominante de areniscas silíceas de grano medio, bien cementadas y en menor proporción fragmentos de rocas ígneas ácidas de textura fanerítica, neises micáceos de color amarillo hasta rosado, areniscas lodosas rojizas de grano fino y alto contenido de micas, cuarzo lechoso, liditas y cherts. Los niveles gravosos presentan matriz arcillosa pardo amarillenta y los niveles finos presentan material arcillo arenosos y areno arcilloso de consistencia compacta, con trazas de materia orgánica.

- **Miembro Finos (Qbf):** Este nivel fue reconocido y definido por Hubach (1951). Se ubica estratigráficamente entre el nivel inferior de la Formación Bucaramanga (Miembro Órganos) y el nivel superior (Miembro Gravoso) en contactos netos plano- paralelos. Es una capa lenticular horizontal con alternancia de niveles arcillosos, limo-arenosos y areno-limosos, de colores gris verdosos con un espesor promedio de 15m. Estos niveles presentan una geometría tabular de estratificación paralela, cruzada y ondulosa, con espesores que oscilan entre 5 y 40 cm. Hacia la base el Miembro Finos presenta material arcillo-limoso, masivo, de colores grises a verdes, con estratificación plana paralela, con gran variación de espesor. Hacia el techo presenta alternancia entre niveles arenolimosos con niveles limo arenosos arcósicos de colores amarillento a pardo amarillento.

Geomorfológicamente se caracteriza por presentar escarpes con un grado de alteración moderada de consistencia plástica para el material arcilloso. El ambiente de deposición para este miembro de la Formación Bucaramanga es un ambiente aluvial de intercanales, poco

profundo, de baja energía y de escasas interdigitaciones de flujo de escombros de facies arenosas (INGEOMINAS, 2001).

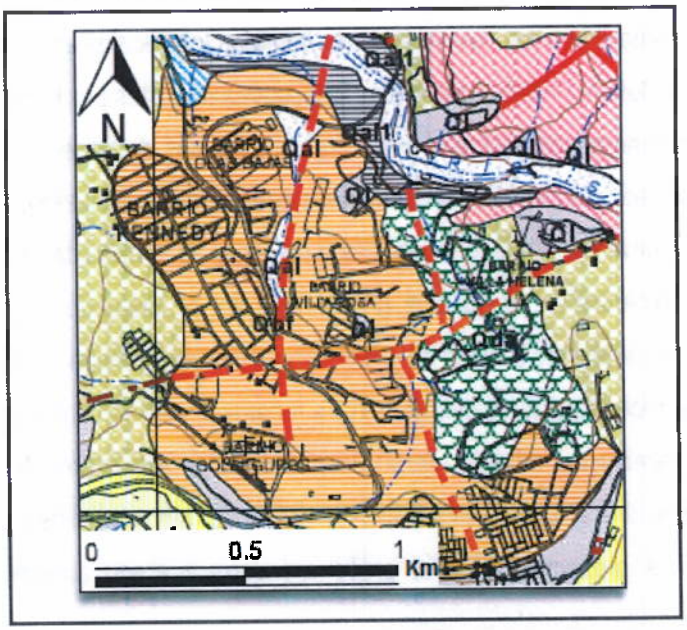


Ilustración 6 Formación Bucaramanga Miembro Finos, al norte del municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

- **Miembro Gravoso (Qbg):** Definido por Niño y Vargas (1992), se encuentra ubicado sobre la escarpa occidental y norte de Bucaramanga. Conforma los escarpes superiores de la parte alta del barrio La Gran Ladera y el nacimiento de la quebrada La Iglesia, en los alrededores de los barrios Lagos del Cacique, Diamante II y San Luis. Presenta un espesor que varía entre 8 y 30 m. presentando niveles gravosos, gravo arenosos y gravo lodosos. Los cantos están compuestos por rocas metamórficas e ígneas y sedimentarias tales como areniscas cuarzosas, areniscas limosas y limolitas moradas. El tamaño grava presenta un diámetro promedio de 15 cm, y predomina sobre bloques de rocas de hasta 80 cm de diámetro. A modo general el Miembro Gravoso es matriz soportado, presentando en sitios puntuales, material clasto soportado. Se encuentra suprayaciendo el Miembro Finos presentando contacto neto, continuo y suavemente onduloso. Infrayace el Miembro Limos Rojos en contacto gradacional (Niño y Vargas, 1992).

Geomorfológicamente es similar al Miembro Órganos en los sectores de los valles de las quebradas. En la parte sur de la Quebrada la Iglesia, su morfología se caracteriza por presentar colinas suaves onduladas y laderas alargadas con un drenaje dendrítico. Estos depósitos presentan un grado de meteorización medio a alto, siendo la parte superficial de este miembro poco compacta y altamente permeable. Su ambiente de deposición es de flujo de escombros (INGEOMINAS, 2001).

- **Miembro Limos Rojos (Qblr):** Nivel definido por Julivert (1963). Se encuentra localizado de forma no uniforme en el sector urbano de Bucaramanga y continúa hacia el sur, hasta el sector norte del municipio de Floridablanca.

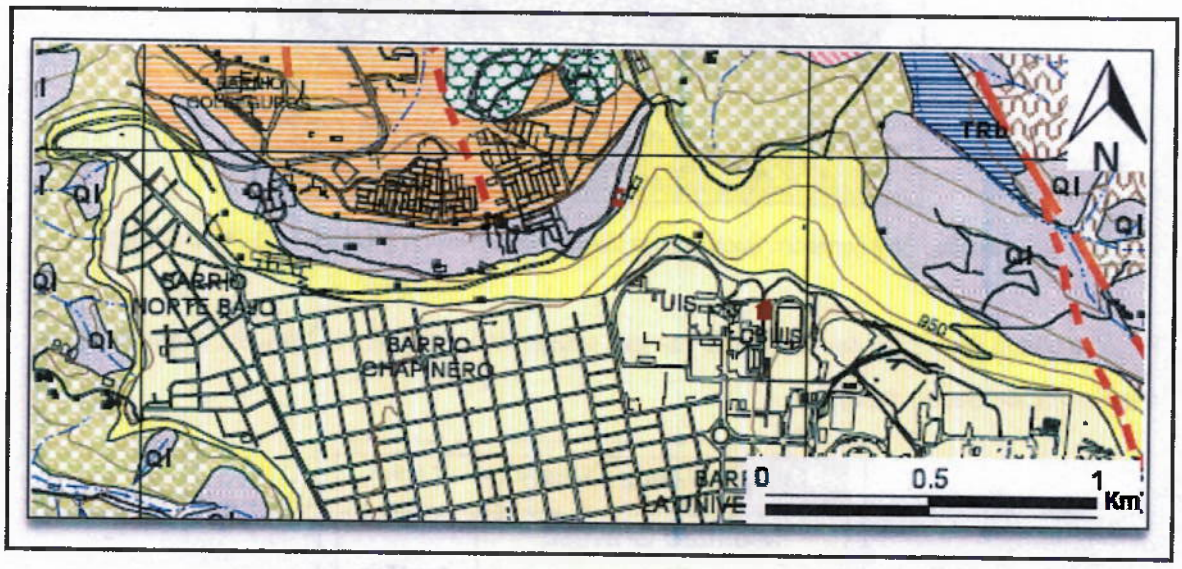


Ilustración 7 Formación Bucaramanga Miembro Gravoso, al norte del municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

Presenta arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. En algunos sectores se aprecian bloques angulares de arenisca meteorizados, embebidos dentro de limos rojos y se asocian superficialmente a este miembro. Este depósito se encuentra suprayaciendo el Miembro Gravoso en contacto gradacional. La parte más superficial de este miembro presenta un alto grado de meteorización formando niveles de oxidación (INGEOMINAS, 2001). Geomorfológicamente se caracteriza por constituir la parte superficial de la llamada inicialmente "Meseta de Bucaramanga",

presentando una topografía plana con pendientes menores al 7%, de drenaje escaso, paralelo y superficial (Niño y Vargas, 1992).

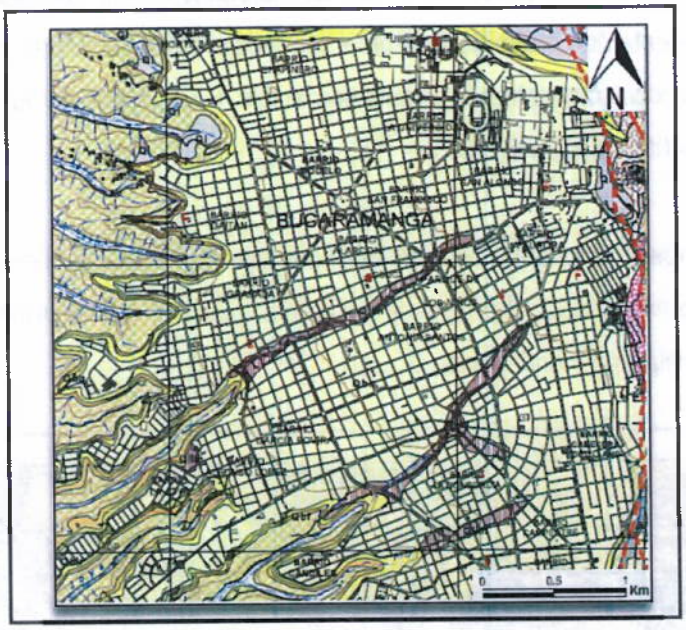


Ilustración 8 Formación Bucaramanga Miembro Limos Rojos (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

En la siguiente ilustracion se muestra de manera esquemática el perfil del subsuelo correspondiente a la Formación Bucaramanga.

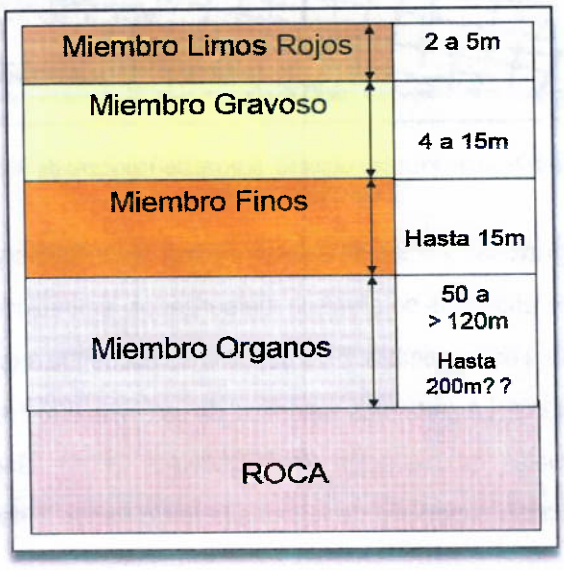


Ilustración 9 Perfil típico y espesores promedio de la Formación Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001)

2.2.2. UNIDADES GEOLÓGICAS DE INGENIERÍA (UGI)

La caracterización geológica a escala detallada se apoya en la delimitación de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI) (SGC - UNAL, 2016), las cuales permiten agrupar sectores con materiales que presentan comportamiento mecánico y origen geológico similares. Estas unidades constituyen el insumo principal para la evaluación del terreno, ya que facilitan distinguir entre suelos y rocas, reconocer espesores significativos de suelo residual o transportado, y establecer las condiciones estructurales y de meteorización del macizo rocoso.

En el sector Buenavista se registran dos materiales, asociados a un suelo residual natural formado por la meteorización del gneis de la Formación Bucaramanga, con erosión superficial leve y un suelo residual antrópico con escombros presente en las zonas urbanizadas.

SUELO RESIDUAL SOBRE GNEIS CUARZO-FELDESPÁTICO DE LA FORMACIÓN BUCARAMANGA (Srgfb)

Corresponde al material residual desarrollado por meteorización profunda del basamento metamórfico de la formación Bucaramanga, es un suelo arcillo-limoso a arcillo-arenoso, de color pardo amarillento a rojizo y estructura masiva, desarrollados sobre pendientes de 15° a 30°, donde se observan evidencias de erosión laminar leve. La cohesión es baja a media, con comportamiento dúctil en condiciones húmedas.



Ilustración 10 Suelo residual sobre gneis cuarzo-feldespático de la formación Bucaramanga, sector Buenavista

SUELO RESIDUAL ANTRÓPICO LLENO DE ESCOMBROS (Srale)

Esta unidad se localiza en el sector urbanizado del área de estudio, donde el suelo residual, ha sido modificado por cortes, nivelaciones y rellenos para la construcción de vías y viviendas, presentando materiales arcillosos residuales, gravas sueltas, fragmentos de concreto, ladrillo y tierra suelta.

CÓDIGO UGI	UNIDADES GEOLÓGICAS PARA INGENIERÍA	ÁREA HECTÁREAS
Srale	Suelo residual antrópico lleno de escombros	0,62
Srgfb	Suelo residual sobre gneis cuarzo-feldespático de la formación Bucaramanga	0,36

Tabla 2. Clasificación de las unidades geológicas para ingeniería UGI, sector Buenavista

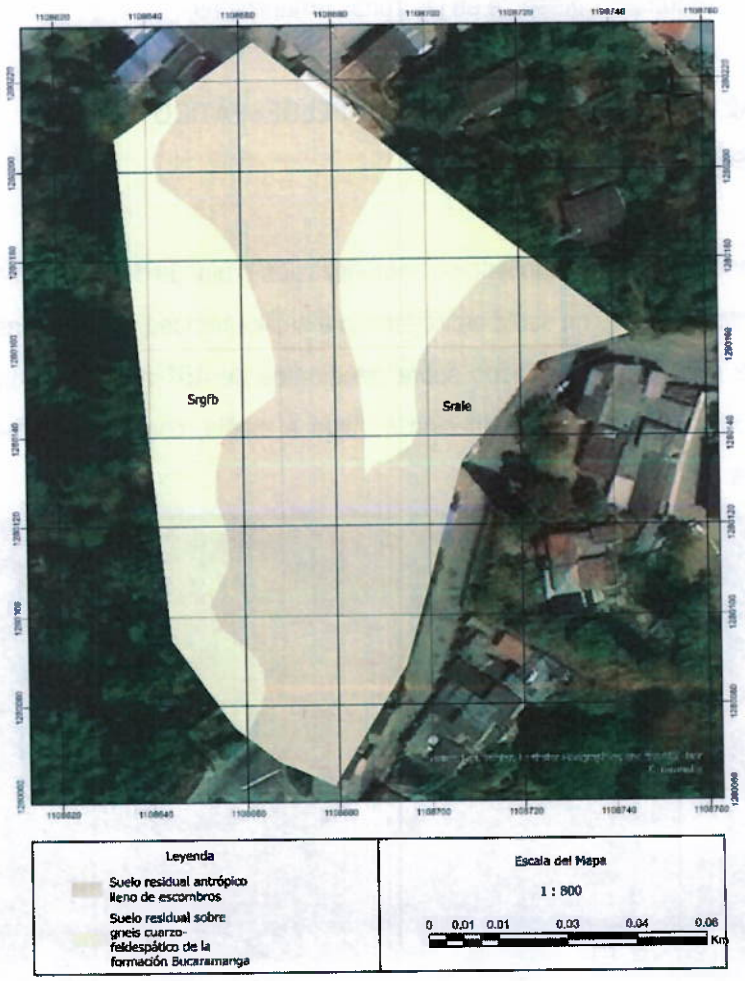


Ilustración 11 Mapa de unidades geológicas para ingeniería UGI, sector Buenavista

2.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

2.3.1. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DE COLOMBIA

Colombia se ubica en la convergencia activa de las placas de Nazca, Caribe y Sudamericana (con influencia del bloque Panamá–Chocó). La placa de Nazca avanza hacia el este (~54 mm/año) y subduce bajo Suramérica, provocando el levantamiento de los Andes y formando las Cordilleras Occidental y Central como arcos volcánicos activos. En cambio, la placa del Caribe se acerca de manera oblicua (≈15 mm/año) por el norte de Colombia, generando fallas de cizalla izquierda de larga extensión (por ejemplo, el sistema Santa Marta–Bucaramanga). Esta dinámica ha dado lugar al denominado Bloque Norte de los Andes, con una compleja red de fallas transversales e inversas que reparte la deformación continental.

El resultado son tres cadenas montañosas principales geológicamente distintas. La Cordillera Occidental y la Cordillera Central son arcos magmáticos meso-cenozoicos (parte del Cinturón de Fuego del Pacífico) asociados directamente a la subducción de Nazca. En cambio, la Cordillera Oriental es un relieve intracontinental plegado, elevado principalmente en el Terciario tardío. Esta cordillera descansa sobre el escudo precámbrico de Guayana (rocas cristalinas de más de 1.300 millones de años) que sirvió como plataforma estable para la sedimentación paleozoica. Sobre dicho basamento se depositaron sedimentos miogeosinclinales (formaciones fluviales y marinas del Paleozoico inferior) que luego fueron plegados y cabalgados durante la orogenia andina terciaria. Como señala Irving (1971), estas tres ramas cordilleranas del norte de Colombia "son geológicamente distintas y se originaron en diferentes épocas".

Además de las cordilleras, en el extremo norte se destaca la Sierra Nevada de Santa Marta, elevada por la colisión oblicua del Caribe, y hacia el este existen cuencas sedimentarias propias de la placa Suramericana (por ejemplo, los Llanos Orientales y la cuenca del Amazonas). En conjunto, el marco tectónico de Colombia es fruto de la continua colisión de placas oceánicas contra el continente, con subducción de Nazca (levantamiento andino) y empuje oblicuo del Caribe (fallas transversales). Este

proceso ha formado las cordilleras andinas y otras estructuras mayores (fosas tectónicas, fallas principales) que siguen activas hoy en día.

2.3.2. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER

Santander se encuentra principalmente sobre la Cordillera Oriental, dominada por el Macizo de Santander, un bloque montañoso intraplaca de origen paleozoico. En el núcleo del macizo aflora un basamento ígneo-metamórfico muy antiguo: gneises, migmatitas y esquistos de alto grado (la llamada Formación Bucaramanga) de edad Precámbrico-Paleozoico. Estas rocas cristalinas constituyen la parte más rígida y elevada del departamento. Asociados a ellas hay plutones graníticos jurásicos (el Grupo Plutónico de Santander), prueba de un pulso magmático mesozoico durante la apertura de las cuencas.

Alrededor del núcleo metamórfico central afloran secuencias sedimentarias paleozoicas. La Formación Silgará (Ordovícico–Silúrico) consta de filitas, esquistos y mármoles de bajo a medio grado de metamorfismo; fue depósito de un mar antiguo en el borde de la plataforma cratónica. Por encima se ubica la Formación Floresta

(Devónico medio), compuesta de lutitas y calizas fosilíferas de bajo grado metamórfico. Estas rocas sugieren un ambiente marino profundo en el Paleozoico. Al final del Paleozoico, depósitos calizos carbonífero-permicos (Formación Diamante) completan la secuencia antes de un hiato de levantamiento.

En el Mesozoico inferior la región sufrió tectónica extensiva: se formaron grabens donde se depositaron los conglomerados y areniscas rojas triásicas de las Formaciones Jordán y Girón. Luego, en el Cretácico la mayor parte del macizo quedó emergido y erosionado, pero en las cuencas marginales colindantes entró un mar somero. En el valle del Magdalena se acumularon sedimentos cretácicos marinos: arenas cuarzosas (Formación Tambor), calizas fosilíferas (Formación Rosa Blanca) y espesos niveles de lutitas orgánicas (Formaciones Paja, Tablazo, Simití, La Luna, Umir). Estos depósitos marinos cretácicos afloran en los flancos del Macizo de Santander, indicando la amplia

transgresión que cubrió la región. En resumen, el basamento antiguo del macizo fue recubierto lateralmente por arenas, calizas y lutitas del Cretácico.

Con la orogenia andina terciaria se invirtió esta geometría: el Macizo de Santander se alzó como un bloque rígido y sus flancos fueron plegados e invertidos. En particular, la Falla de Bucaramanga (rumbo NNW) es la estructura más importante: marca el límite occidental del macizo y presenta un desplazamiento horizontal (sinestral) seguido de un fuerte levantamiento diferencial hacia el este. Al este del macizo, la falla regional de Servitá delimita cuencas sedimentarias internas (de edad Devónico a Cretácico) que también sufrieron cabalgamientos. Otras fallas menores (por ejemplo, la Falla de Salinas) cortan el triásico y cretácico del oeste, controlando la forma de mesetas y valles internos.

El resultado tectónico actual es un relieve de «horst y graben»: un bloque central alto (el Macizo) rodeado de depresiones y valles rellenos con sedimentos cenozoicos. La erosión en el Pleistoceno también es notoria: se han identificado vestigios de glaciaciones alpinas en las cumbres y amplias terrazas fluviales en los valles. En conjunto, la geología estructural de Santander refleja un viejo basamento metamórfico levantado por fallas andinas y esculpido por la erosión reciente, dando al departamento su relieve abrupto y montaña escarpada característica.

3. GEOMORFOLOGÍA

3.1. MORFOGÉNESIS

La morfogénesis del sector Buenavista, está controlada por la presencia del basamento metamórfico de la Formación Bucaramanga, compuesto por gneises cuarzo-feldespáticos y esquistos micáceos, que han favorecido un modelado erosivo, donde la meteorización generó un manto residual arcillo-arenoso expuesto en las laderas disectadas del sector. El relieve actual responde a la denudación y la disgregación del suelo residual sobre una ladera que mantiene pendientes entre moderadas y abruptas, facilitando el transporte de material fino y la formación de pequeños surcos, así mismo la presencia de superficies convexas y cóncavas, que orienta la escorrentía hacia el eje central del área de estudio. Por otra parte, la intervención antrópica representada en cortes del talud, terrazas, rellenos y viviendas, ha generado planos artificiales que modifican el relieve y producen puntos de concentración de escorrentía, alterando el patrón natural de drenaje.

3.2. MORFOMETRÍA

El análisis morfométrico en este estudio busca comprender cómo la forma del relieve condiciona la estabilidad local. Este enfoque se basa en el uso de tres parámetros ampliamente aceptados en geomorfometría: la pendiente la rugosidad y la curvatura del terreno, que según Wood (1996) y Pike et al. (2009), describen de manera efectiva cómo se organiza el terreno y cómo se distribuyen los procesos superficiales.

3.2.1. PENDIENTES

Las pendientes en el sector de Buenavista fluctúan entre 2° y 55°, evidenciando un relieve variado y condicionado por la erosión natural y por intervenciones urbanas en terrazas irregulares. La franja central del área de estudio concentra valores entre 8 y 16°, laderas clasificadas como moderadamente abruptas, donde el suelo residual arcillo-arenoso permite escorrentía moderada y presenta ligeros indicios de erosión laminar. En los límites oriental y occidental predominan pendientes entre 16° y 35°, propias de laderas abruptas, donde se intensifican los procesos denudacionales y la escorrentía tiende

a concentrarse, especialmente en áreas con cobertura vegetal o presencia de suelo desnudo. Los sectores con pendientes de 35° a 55° corresponden a superficies muy abruptas asociadas a los cortes del talud de corte.

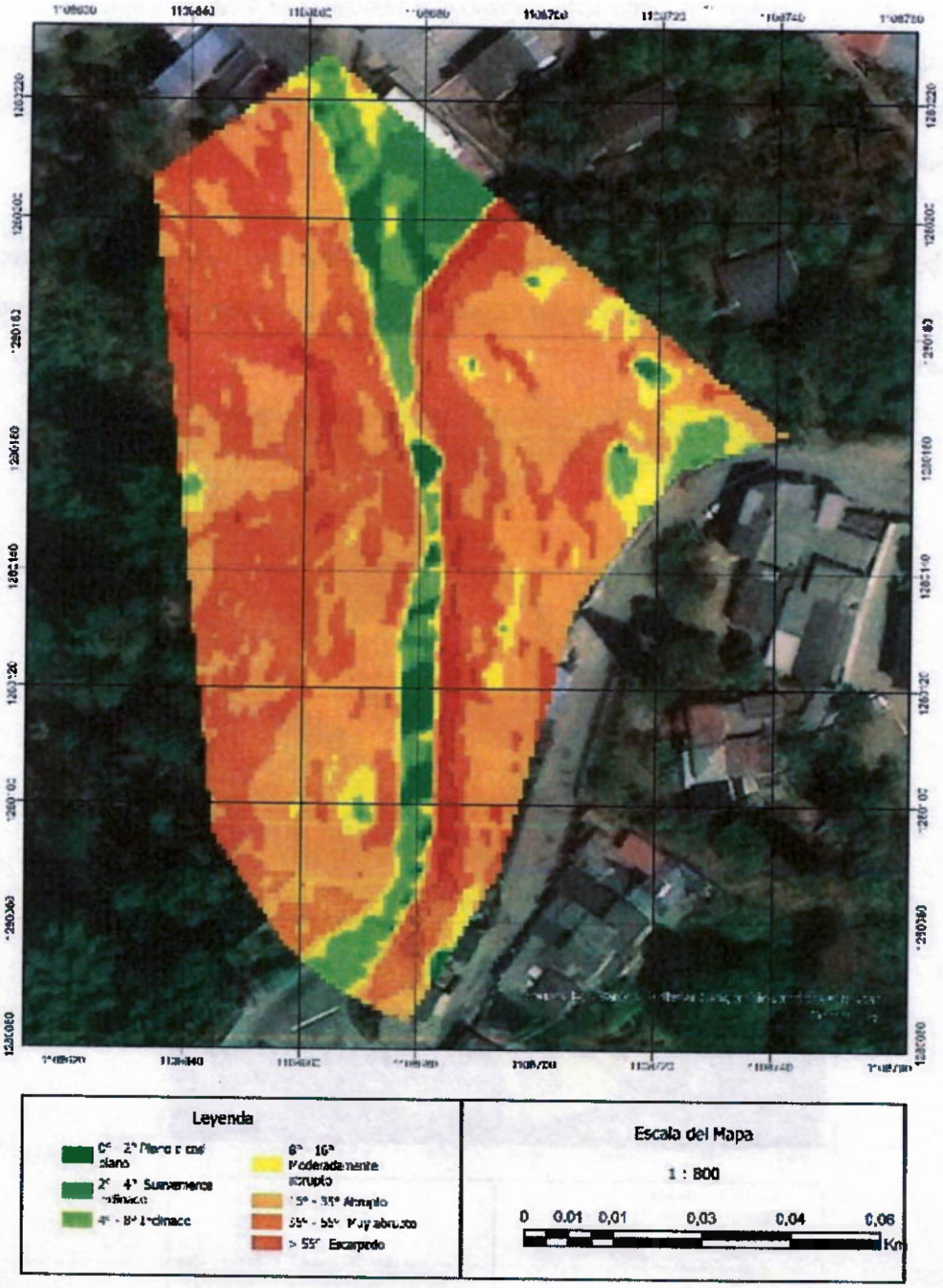


Ilustración 12. Mapa de pendiente del terreno, sector Buenavista

3.2.2. CURVATURA

En el sector de Buenavista la curvatura mayor parte del área, presenta valores cercanos a cero, indicando superficies suavemente onduladas asociadas a pequeñas terrazas y rellenos antrópicos alrededor de las viviendas. En la zona central aparecen franjas continuas de curvatura cóncava, vinculadas a ligeras depresiones y pequeños canales donde se concentra el flujo superficial, favoreciendo mayor humedad y susceptibilidad a erosión en surcos.

Hacia los bordes oriental y sur del área de estudio se observan zonas con curvatura convexa, propias de lomos y taludes ligeramente abombados que dispersan el flujo y aumentan la exposición del suelo a procesos de erosión.

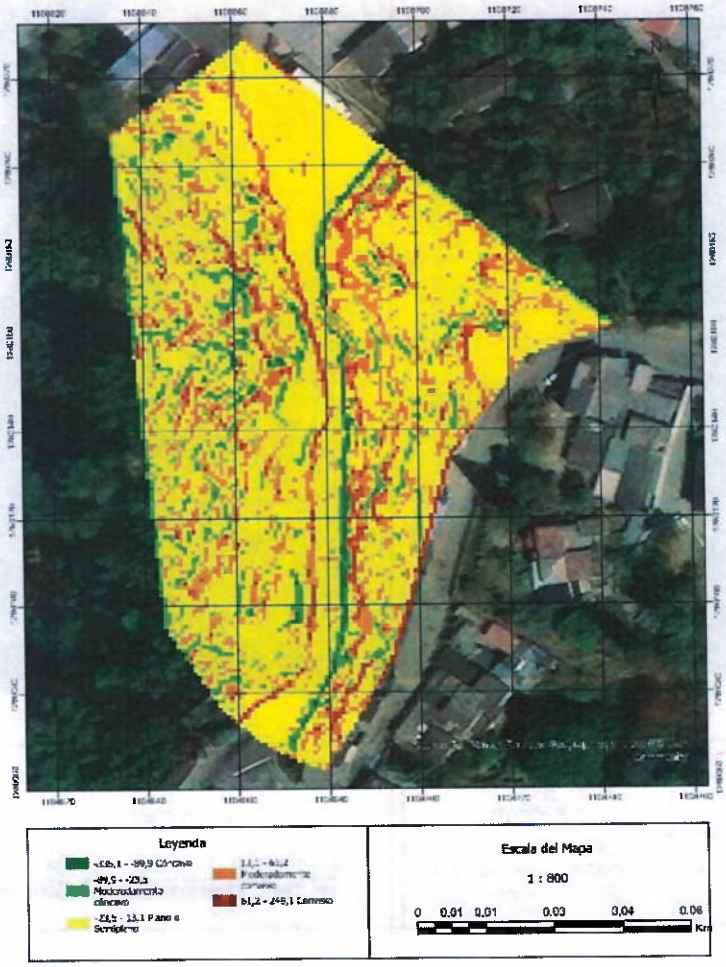


Ilustración 13. Mapa de curvatura del terreno, sector Buenavista

3.2.3. RUGOSIDAD

Para el sector de Buenavista las áreas con rugosidad baja se concentran en la franja oriental y en pequeños sectores cercanos a las viviendas, donde predominan rellenos antrópicos, terrazas niveladas y superficies relativamente uniformes. En contraste, la franja central del sector muestra valores medios a altos topografía más irregular donde se intercalan pequeños lomos, depresiones y variaciones locales del relieve. Esta rugosidad intermedia favorece la infiltración en áreas con vegetación, intensificando la acumulación de humedad en superficies cóncavas.

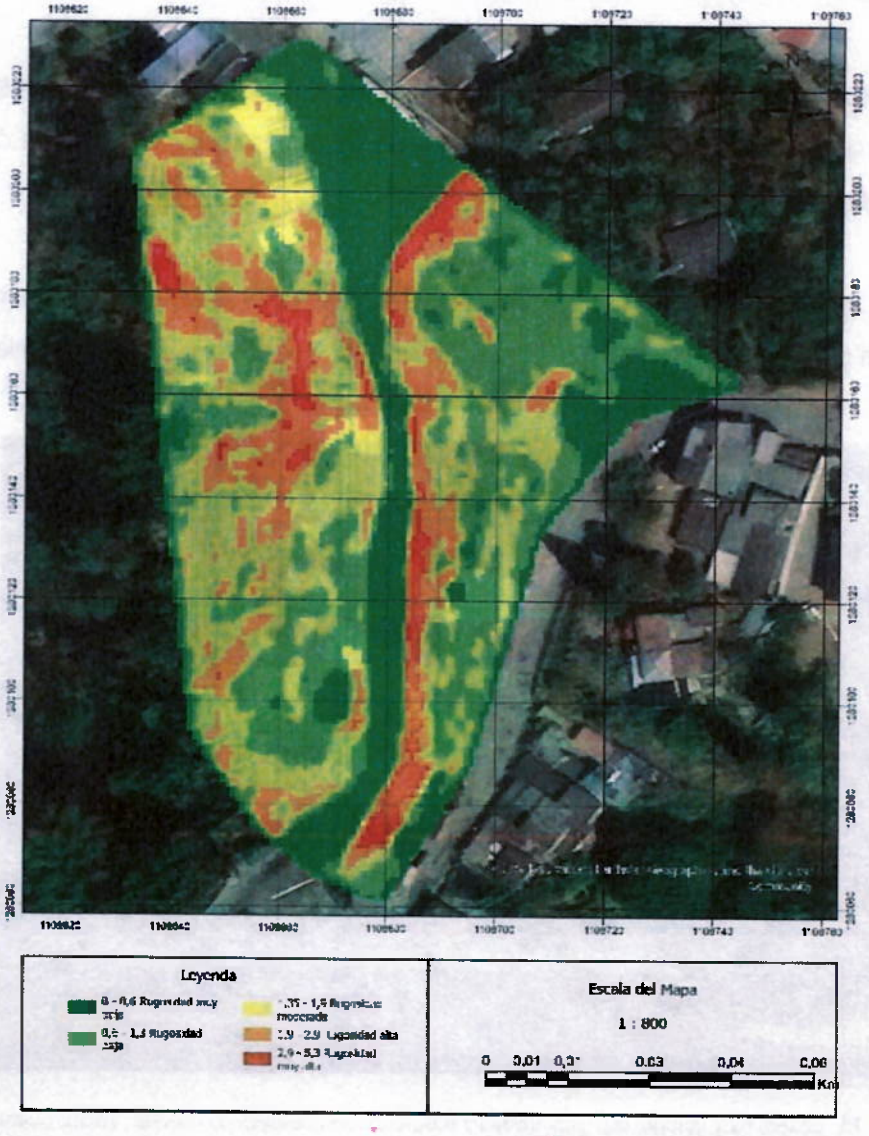


Ilustración 14. Mapa de rugosidad del terreno, sector de Buenavista

3.3. MORFODINÁMICA

La morfodinámica dël sector está condicionada por una ladera de pendiente moderada a abrupta desarrollada sobre suelos residuales del basamento metamórfico. Predominan procesos de erosión superficial, evidenciados en pequeños surcos y zonas de acumulación de humedad que se organizan en las franjas cóncavas centrales, mientras los sectores convexos dispersan el flujo y dejan el material más expuesto generando un patrón de drenaje concentrado hacia el eje medio del área de estudio.

Una característica relevante del sector es el talud que bordea la vía principal, el talud corresponde a una superficie con inestabilidad superficial, que se puede estar presentando por pérdida de suelo, saturación o desprendimientos menores.

Las viviendas, rellenos y senderos modifican el relieve generando puntos de concentración de escorrentía. En contraste, las laderas con vegetación secundaria muestran un comportamiento más estable.



Ilustración 15. Ladera muy abrupta con inestablidad y desprendimientos leves de material, sector Buenavista

3.4. ELEMENTOS GEOMORFOLOGICOS

Para la escala detallada empleada en este estudio, los elementos geomorfológicos constituyen la unidad básica de análisis. La clasificación y descripción de estos elementos se realiza siguiendo los lineamientos de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia (Carvajal, 2011), con el fin de caracterizar cada geoforma según su origen, configuración, dimensiones y dinámica actual.

En el sector se identifican laderas con inclinación suave y una ladera muy abrupta marcada por pequeños surcos que concentran la escorrentía y favorecen la erosión, así mismo se encuentran elementos de origen antrópico asociados a cortes y rellenos utilizados para permitir la construcción y el uso urbano del terreno.

3.4.1. GEOFORMAS DE ORIGEN DENUDACIONAL

LADERA DENUDACIONAL INCLINADA (Dldi)

Corresponde a una ladera con pendientes moderadas, modelada principalmente por procesos de denudación sobre suelos residuales desarrollados a partir del basamento metamórfico. El relieve muestra una combinación de sectores convexos y cóncavos que dirigen la escorrentía hacia el eje central del sector. La cobertura vegetal secundaria aporta estabilidad, aunque se observan puntos localizados de erosión superficial.

LADERA DENUDACIONAL LIGERAMENTE INCLINADA (Dldli)

Superficie de baja a moderada pendiente, con un relieve más suave. La denudación actúa de forma difusa, favoreciendo la continuidad del manto de suelo y el desarrollo de vegetación arbustiva y herbácea. La escorrentía se dispersa y la infiltración aumenta, lo que reduce la erosión.

LADERA DENUDACIONAL DISECTADA MUY ABRUPTA (DIddma)

Geoforma ubicada en el sector central, donde la pendiente es más elevada y el relieve se encuentra claramente diseccionado por pequeños surcos de erosión. Estas pequeñas depresiones canalizan la escorrentía y concentran el flujo, generando una morfología más irregular. El suelo residual es más susceptible a ligeros deslizamientos superficiales.



Ilustración 16. Ladera disectada muy abrupta en el sector de Buenavista al costado de la vía principal.

5.4.2. GEOFORMAS DE ORIGEN ANTRÓPICO

PLANOS Y CAMPOS DE RELLENOS ANTRÓPICOS (Apcra)

Corresponden a superficies artificiales asociadas a ocupación urbana y rellenos generados para soportar viviendas y adecuaciones del terreno en el sector Buenavista. Presentan, cortes verticales, taludes y zonas con material de relleno antrópico.



Ilustración 17. Laderas asociadas a construcciones conforma los elementos geomorfológicos de origen antrópico del sector Buenavista

CODIGO EGMF	ELEMENTOS GEOMORFOLOGICOS	AREA HECTAREAS
Aplla	Planos y campos de llenos antrópicos	0,57
Dldi	Ladera denudacional inclinada	0,25
Dldli	Ladera denudacional ligeramente inclinada	0,085
Dlddma	Ladera denudacional disectada muy abrupta	0,076

Tabla 3. Clasificación de los elementos geomorfológicos del sector Buenavista

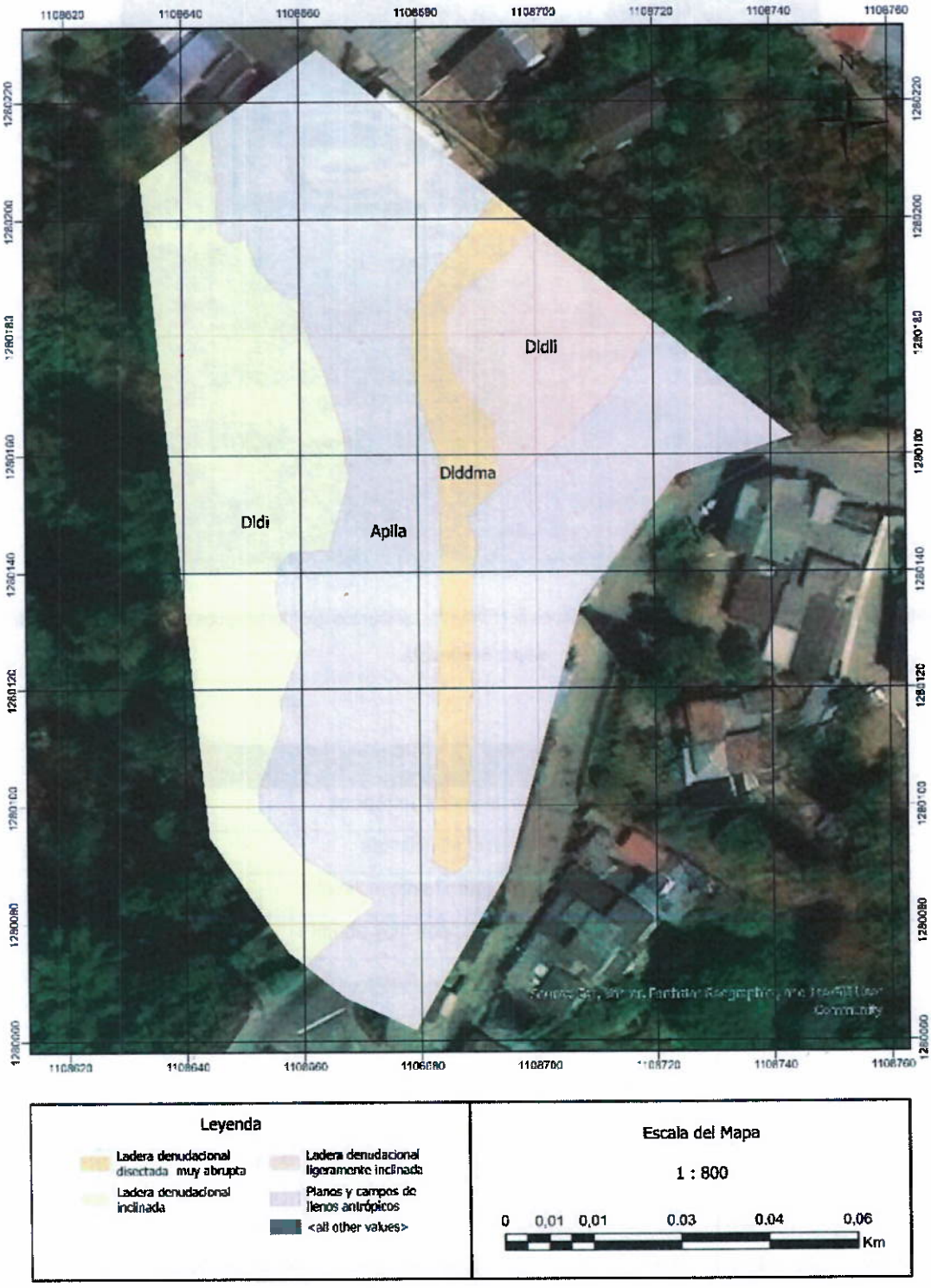


Ilustración 18 Mapa de elementos geomorfológicos, sector Buenavista

4. COBERTURA DEL SUELO

El análisis de coberturas del suelo permite identificar los tipos de uso y vegetación presentes en el área de estudio, así como su relación con la dinámica del terreno y las condiciones de estabilidad local, reflejando el grado de intervención antrópica, la continuidad de la vegetación y la capacidad del terreno para protegerse frente a la erosión y la escorrentía.

4.1. TEJIDO URBANO CONTINUO – VIVIENDAS (Tucv)

Esta cobertura reúne las viviendas construidas. La presencia continua de edificaciones hace que el suelo tenga muy poca capacidad de infiltrar agua, lo que favorece que la escorrentía superficial se dirija directamente hacia la vía o hacia los bordes de la ladera. Es un sector fuertemente intervenido donde el relieve natural ha sido modificado por las construcciones.

4.2. TEJIDO URBANO CONTINUO – CENTRO DEPORTIVO (Tuccd)

Corresponde al pequeño centro deportivo del sector, que incluye áreas pavimentadas y edificadas para uso comunitario. Al igual que las viviendas, se trata de una zona completamente intervenida, donde el terreno original fue nivelado o rellanado para permitir su uso.

4.3. RED VIAL URBANA (Rvu)

Es la vía principal que atraviesa Buenavista. Está pavimentada y canaliza gran parte del agua que baja por la ladera. En varios tramos actúa como un colector de escorrentía, lo que genera acumulaciones puntuales y erosión en los bordes



Ilustración 19. Red vial urbana del sector Buenavista

4.4. HERBAZAL DENSO DE TIERRA FIRME ARBOLADO (Hdtfa)

Se trata de zonas con abundante vegetación, donde predominan pastos altos mezclados con arbustos y algunos árboles jóvenes. Esta cobertura aparece en los márgenes del área urbanizada y sobre la ladera menos intervenida. La vegetación ayuda a retener el suelo, reduce la erosión y regula el paso del agua.

CÓDIGO COBERTURA	COBERTURA DEL SUELO	AREA HECTÁREAS
Tucv	Tejido urbano continuo viviendas	0,43
Hdtfa	Herbazal Densos de Tierra firme arbolado	0,42
Rvu	Red vial urbana	0,113
Tuccd	Tejido urbano continuo centro deportivo	0,021

Tabla 4. Clasificación de las coberturas del suelo, sector Buenavista



Ilustración 20. Mapa de la cobertura del suelo sector Buenavista

5. ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

5.1. Marco metodológico

La zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa se desarrolló mediante un enfoque heurístico multicriterio, basado en la integración espacial y ponderada de variables condicionantes del medio físico.

Este proceso se enmarca en los lineamientos técnicos adoptados en Colombia para la evaluación de susceptibilidad por movimientos en masa, particularmente aquellos desarrollados por el Servicio Geológico Colombiano en estudios de escala regional y local, donde la susceptibilidad se define como la predisposición intrínseca del terreno a presentar procesos de inestabilidad gravitacional en función de sus características geológicas, geomorfológicas y morfométricas.

La metodología aplicada consiste en la combinación lineal ponderada de variables previamente estandarizadas, permitiendo generar un índice continuo de susceptibilidad que posteriormente es categorizado en niveles cualitativos.

5.2. Variables consideradas

Para la modelación de susceptibilidad en el sector Buenavista se integraron las siguientes variables:

- Pendiente del terreno
- Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI)
- Elementos Geomorfológicos (EGMF)
- Cobertura y uso del suelo
- Curvatura
- Rugosidad

Cada variable fue estandarizada en una escala ordinal de 1 a 5, donde:

CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	Muy baja susceptibilidad
2	Baja susceptibilidad
3	Susceptibilidad Media
4	Alta susceptibilidad
5	Muy alta susceptibilidad

Tabla 5. Calificaciones de Susceptibilidad y sus descripciones, sector Buenavista

5.3. Metodología

5.3.1. Preparación y estandarización de la información

Se verificó la coherencia del sistema de referencia espacial y la homogeneidad cartográfica de todas las capas. Las variables en formato vectorial (UGI, EGMF y Cobertura) fueron convertidas a formato raster y se unificó la resolución espacial con base en el modelo digital de elevación. Se garantizó la alineación espacial para permitir la aplicación de álgebra de mapas.

5.3.2. Reclasificación y justificación técnica de variables

5.3.2.1. Pendientes del terreno

RANGO	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN
0 – 2°	Plana a casi plana	1
2 – 4°	Suavemente inclinado	1
4 – 8°	Inclinado	2
8 – 16°	Moderadamente abrupto	3
16 – 35°	Abrupto	4
35 – 55°	Muy abrupto	5
55 – 56,9°	Escarpado	5

Tabla 6. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de Pendientes, sector Buenavista

La pendiente del terreno constituye uno de los factores más determinantes en la estabilidad de las laderas, ya que controla el equilibrio entre las fuerzas resistentes del material y las fuerzas desestabilizantes asociadas al peso propio del terreno.

En el sector Buenavista se identifican pendientes moderadas a fuertes, particularmente hacia los sectores de ladera, lo que incrementa la predisposición del terreno a procesos de remoción en masa. Los sectores con pendientes más pronunciadas presentan mayores valores de susceptibilidad debido al incremento del componente tangencial del peso del material.

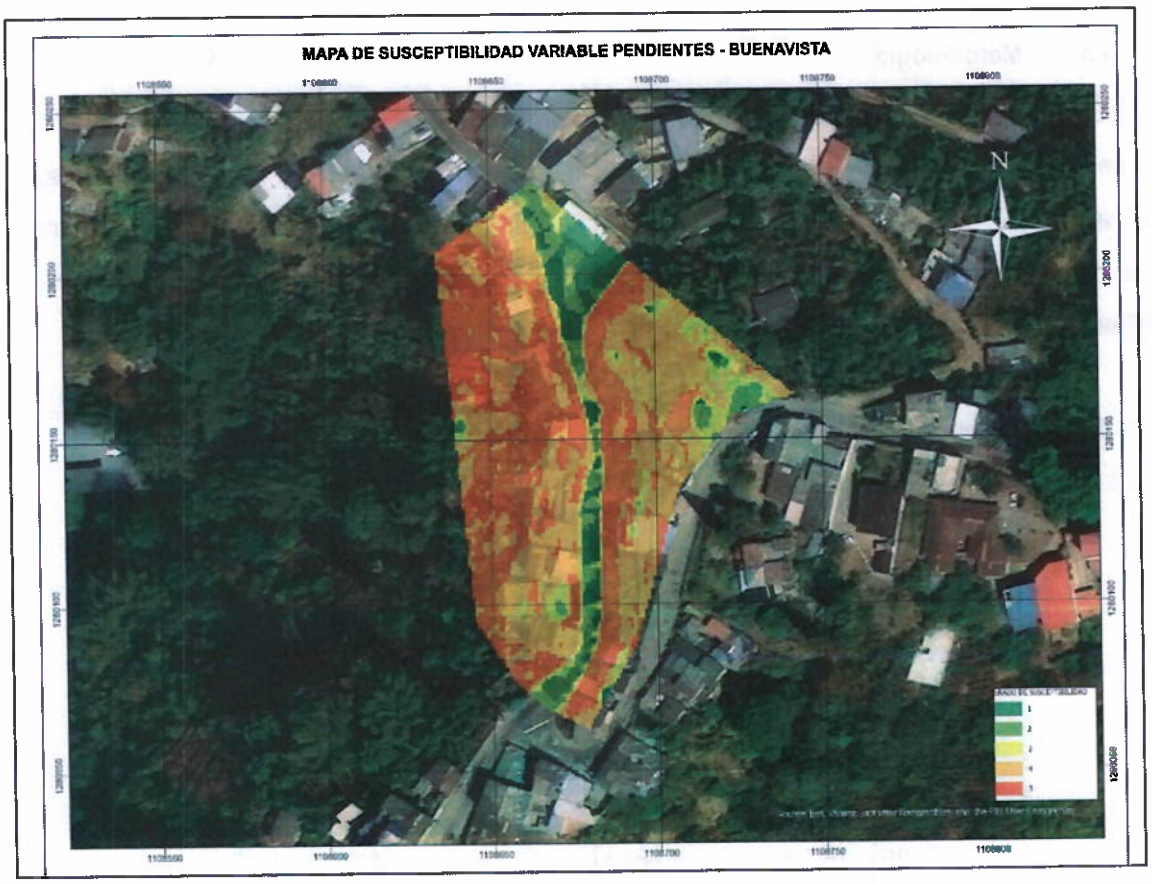


Ilustración 21. Mapa de Susceptibilidad por la variable de Pendientes, sector Buenavista

5.3.2.2. Unidades Geológicas para Ingeniería – UGI

CLASE UGI	CALIFICACIÓN
Suelo residual antrópico con presencia de escombros	4
Suelo residual sobre gneis cuarzo-feldespático (Formación Bucaramanga)	3

Tabla 7. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de UGI, sector Buenavista

Las unidades geológicas para ingeniería representan las características geotécnicas de los materiales presentes en el área de estudio. Los suelos residuales derivados de rocas metamórficas presentan propiedades geotécnicas condicionadas por procesos de meteorización, los cuales generan materiales con variabilidad granulométrica y resistencia mecánica moderada.

En contraste, los suelos residuales antrópicos con presencia de escombros presentan mayor heterogeneidad estructural y menor cohesión, lo que incrementa su susceptibilidad a procesos de inestabilidad.

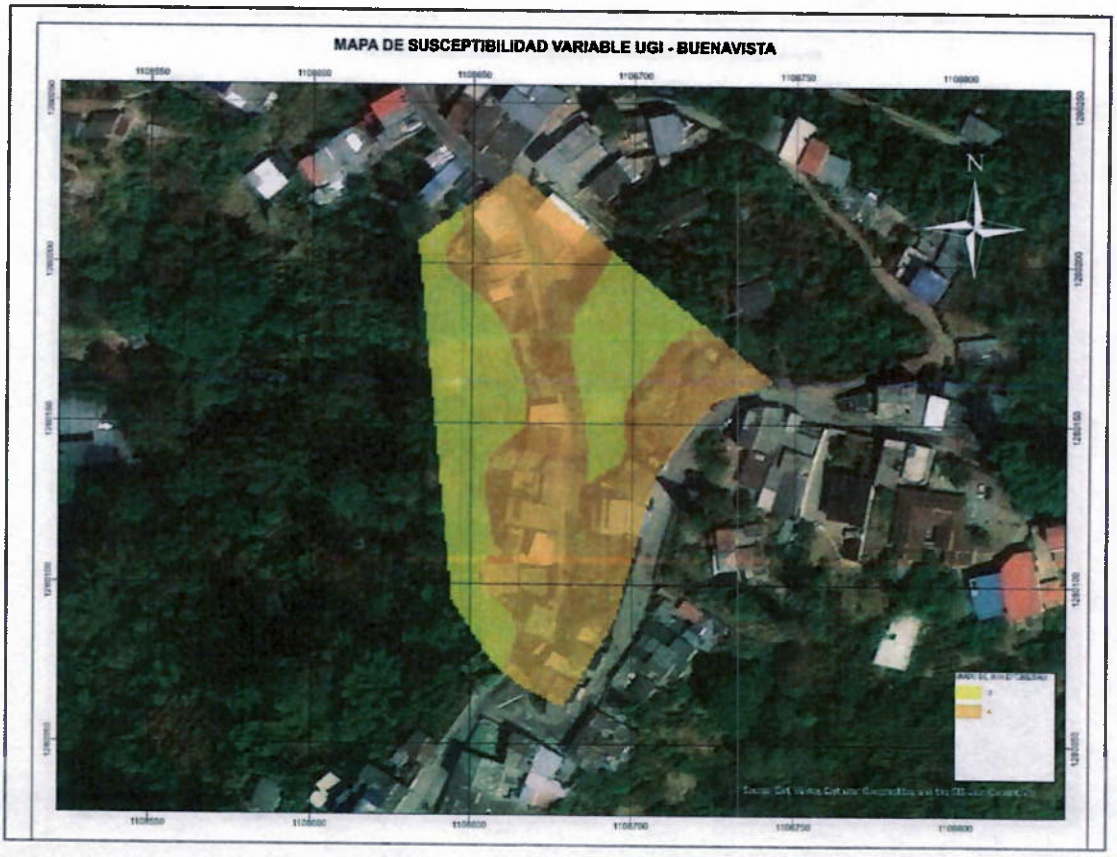


Ilustración 22. Mapa de Susceptibilidad por la variable de UGI, sector Buenavista

5.3.2.3. Elementos Geomorfológicos – EGMF

CLASE EGMF	CALIFICACIÓN
Planos y campos de llenos antrópicos	4
Ladera denudacional ligeramente inclinada	2
Ladera denudacional inclinada	3
Ladera denudacional disectada muy abrupta	5

Tabla 8. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de EGMF, sector Buenavista

Los elementos geomorfológicos permiten identificar las formas del relieve y su dinámica evolutiva. Las laderas denudacionales disectadas muy abruptas representan las zonas con mayor energía de relieve, lo que favorece el desarrollo de procesos gravitacionales.

Por su parte, los planos de llenos antrópicos corresponden a superficies modificadas por intervención humana, donde la heterogeneidad del material puede generar condiciones de inestabilidad.

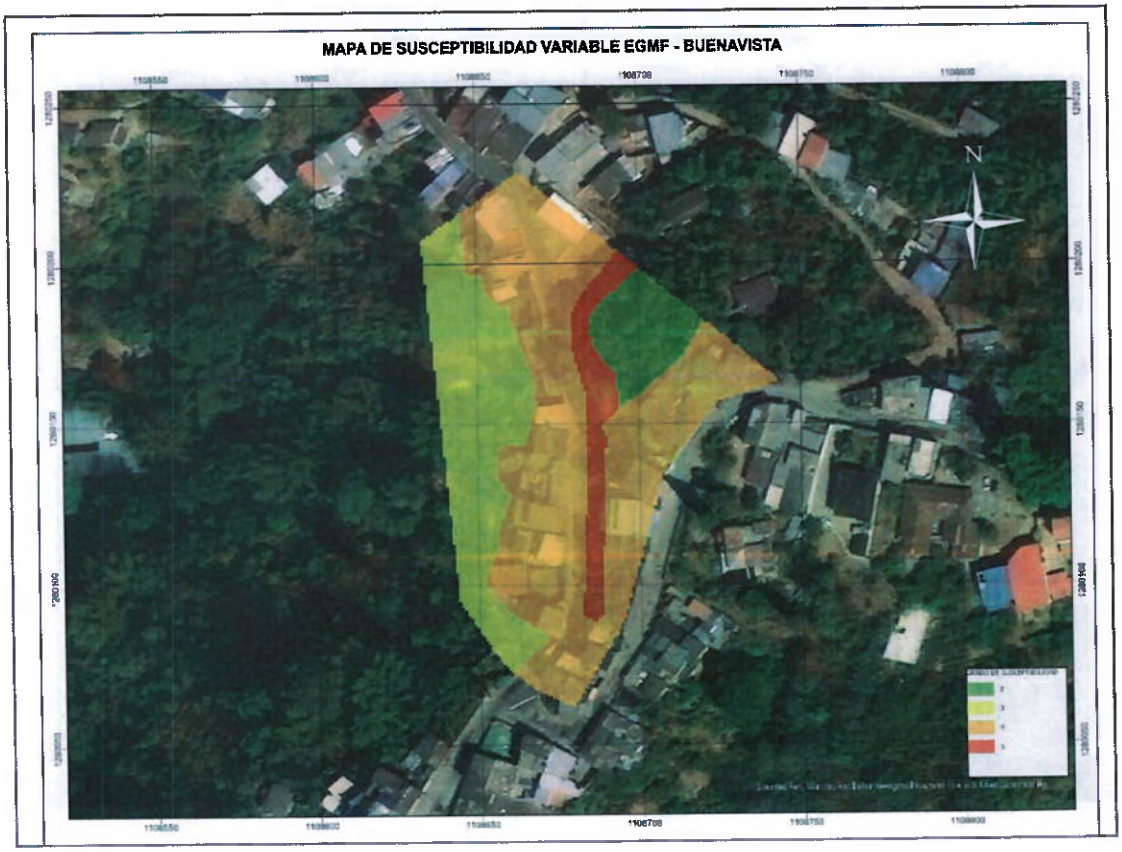


Ilustración 23. Mapa de Susceptibilidad por la variable de EGMF, sector Buenavista

5.3.2.4. Cobertura y Uso del Suelo

COBERTURA	CALIFICACIÓN
Tejido urbano continuo – viviendas	3
Tejido urbano continuo – centro deportivo	3
Red vial urbana	3
Herbazal denso de tierra firme arbolado	3

Tabla 9. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de Cobertura y Uso del Suelo, sector Buenavista

La cobertura vegetal y el uso del suelo influyen en la estabilidad del terreno mediante el control de la infiltración, la protección superficial del suelo y el refuerzo radicular. La cobertura vegetal y el uso del suelo influyen en la estabilidad del terreno mediante el control de la infiltración, la protección superficial del suelo y el refuerzo radicular.

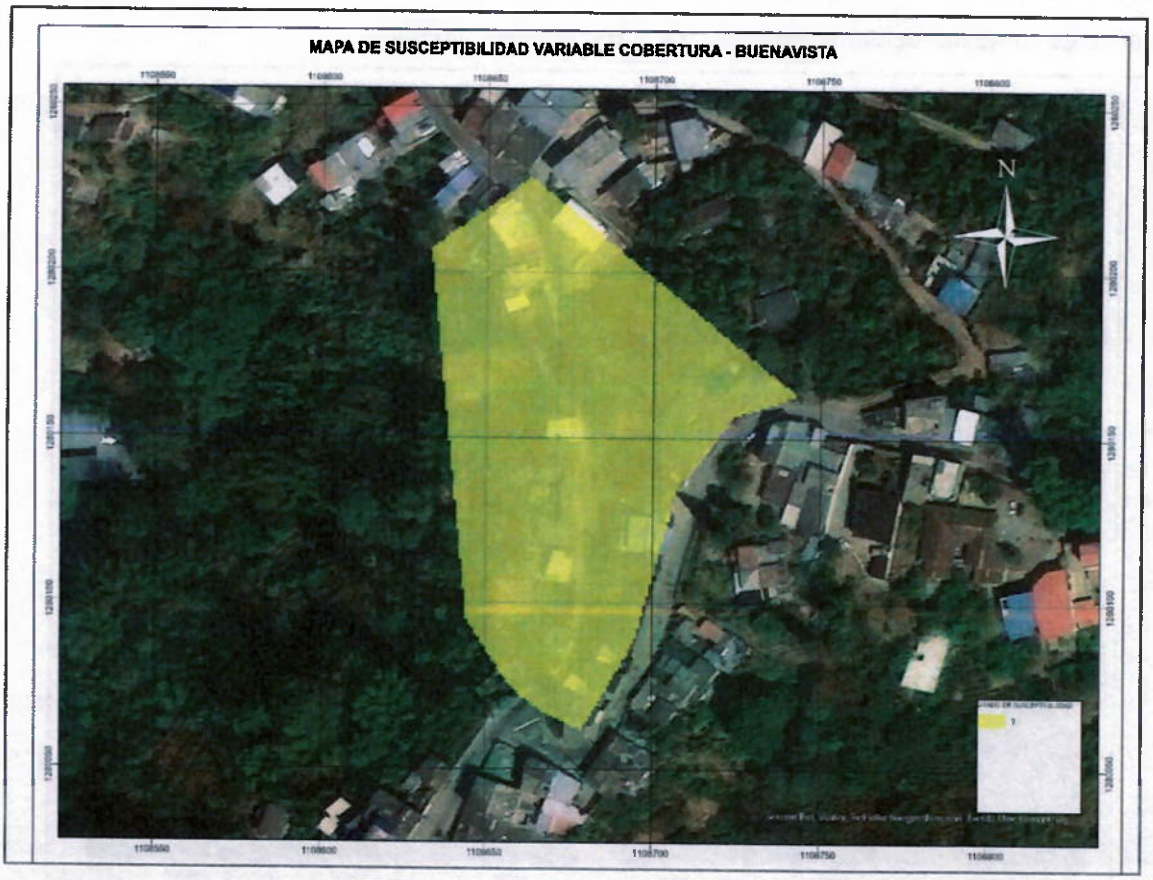


Ilustración 24. Mapa de Susceptibilidad por la variable de Cobertura, sector Buenavista

5.3.2.5. Curvatura del Terreno

RANGO	CLASE	CALIFICACIÓN
-335,1 a -89,9	Cóncava	5
-89,9 a -23,5	Moderadamente cóncava	4
-23,5 a 13,1	Plana a semiplana	3
13,1 a 61,2	Moderadamente convexa	2
61,2 a 249,1	Convexa	1

Tabla 10. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de Curvatura, sector Buenavista

La curvatura del terreno permite identificar zonas de convergencia o divergencia del flujo superficial. Las superficies cóncavas favorecen la acumulación de agua y sedimentos, generando condiciones que pueden incrementar la saturación del suelo y disminuir su resistencia al corte. Por el contrario, las superficies convexas facilitan la dispersión de la escorrentía superficial.

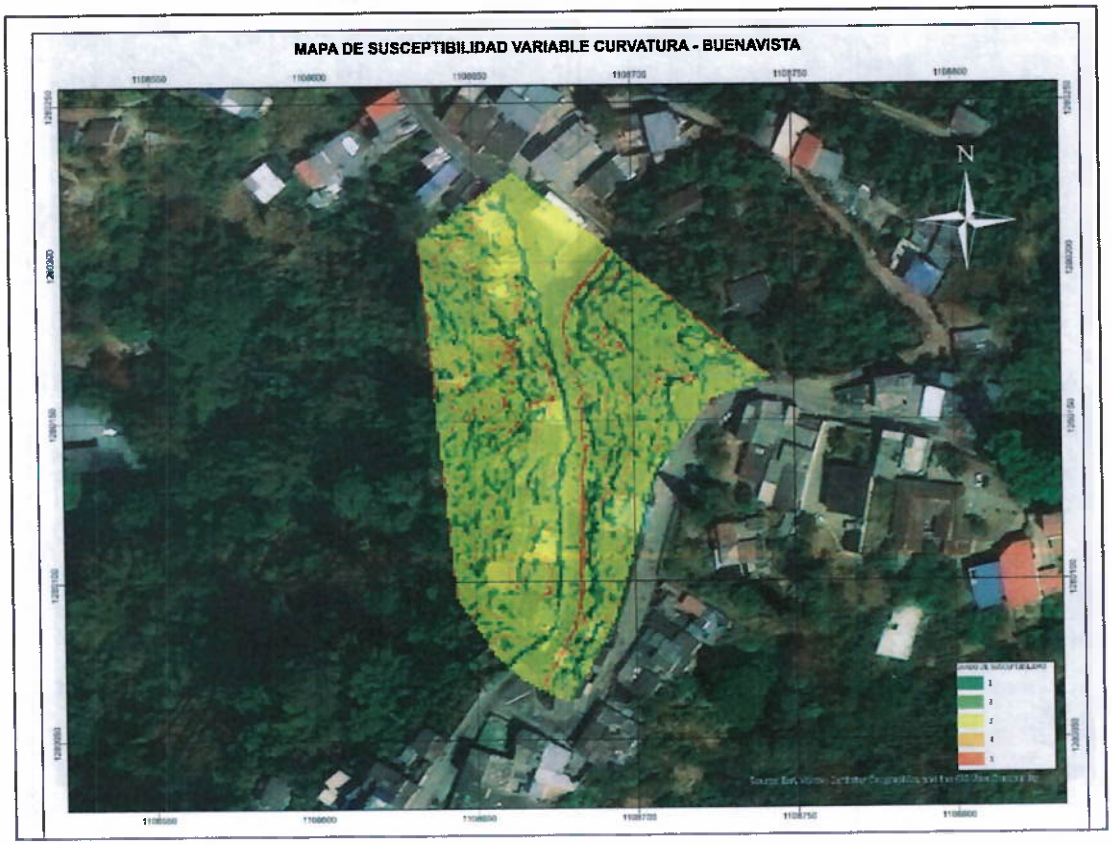


Ilustración 25. Mapa de Susceptibilidad por la variable de Curvatura, sector Buenavista

5.3.2.6. Rugosidad del Terreno

RANGO	CLASE	CALIFICACIÓN
0 – 0,6	Muy baja	1
0,6 – 1,3	Baja	2
1,3 – 1,9	Moderada	3
1,9 – 2,9	Alta	4
2,9 – 5,3	Muy alta	5

Tabla 11. Calificaciones de Susceptibilidad con respecto a la variable de Rugosidad, sector Buenavista

La rugosidad del terreno representa la variabilidad topográfica local y refleja la complejidad morfológica del relieve. Valores altos de rugosidad se asocian generalmente con terrenos más irregulares, presencia de microrelieves o procesos erosivos activos.



Ilustración 26. Mapa de Susceptibilidad por la variable de Rugosidad, sector Buenavista

5.4. Cálculo del índice de Susceptibilidad

El índice de susceptibilidad fue calculado mediante álgebra de mapas en entorno raster, aplicando la siguiente combinación lineal ponderada:

$$S = 0.30(Pend) + 0.25(UGI) + 0.15(EGMF) + 0.15(Cob) + 0.08(Curv) + 0.07(Rug)$$

La ponderación asignada refleja la mayor influencia de la pendiente y las características geotécnicas del material en la estabilidad del terreno.

5.5. Reclasificación final y vectorización

El raster continuo fue reclasificado en cinco categorías cualitativas (Muy baja, Baja, Moderada, Alta y Muy alta) mediante el algoritmo "Reclasificar por tabla", estableciendo rangos de valores coherentes con la distribución del índice y la interpretación geomorfológica del sector.

Este procedimiento permitió garantizar que las categorías superiores correspondieran a zonas donde convergen pendientes elevadas, materiales coluviales y configuraciones morfológicas críticas.

Posteriormente el raster reclasificado fue convertido a formato vectorial mediante:

1. Conversión raster a polígono.
2. Eliminación de polígonos menores al umbral cartográfico mínimo.
3. Disolución por categoría de susceptibilidad.
4. Corrección y validación topológica.

5.6. Grados de Susceptibilidad

En este contexto, los grados de susceptibilidad se interpretan de la siguiente manera:

Susceptibilidad Muy baja

Corresponde a sectores donde la combinación de pendiente, material geológico, morfología y cobertura no favorece la generación de inestabilidad gravitacional. Estas áreas presentan condiciones geométricas y geotécnicas predominantemente estables.

Susceptibilidad Baja

Incluye zonas donde los factores condicionantes presentan baja aptitud para la ocurrencia de movimientos en masa. Aunque pueden existir elementos locales desfavorables, la configuración general del terreno no promueve procesos de remoción significativos.

Susceptibilidad Media

Agrupa áreas donde los factores condicionantes muestran un equilibrio intermedio entre estabilidad e inestabilidad. En estas zonas, la ocurrencia de fenómenos puede incrementarse ante intervenciones antrópicas, modificaciones geométricas o variaciones en las condiciones de humedad.

Susceptibilidad Alta

Corresponde a sectores donde la interacción entre pendiente elevada, materiales con menor resistencia, morfologías abruptas y condiciones de cobertura desfavorables genera una configuración claramente propicia para la ocurrencia de movimientos en masa.

Susceptibilidad Muy alta

Comprende áreas donde la configuración geométrica, geológica y morfodinámica del terreno refleja condiciones críticas de inestabilidad. Estas zonas concentran los valores más altos del índice de susceptibilidad y representan los sectores con mayor predisposición intrínseca a procesos de movimientos en masa.

La integración de las variables condicionantes mediante la combinación lineal ponderada permitió generar el mapa final de susceptibilidad por movimientos en masa para el Sector Buenavista.

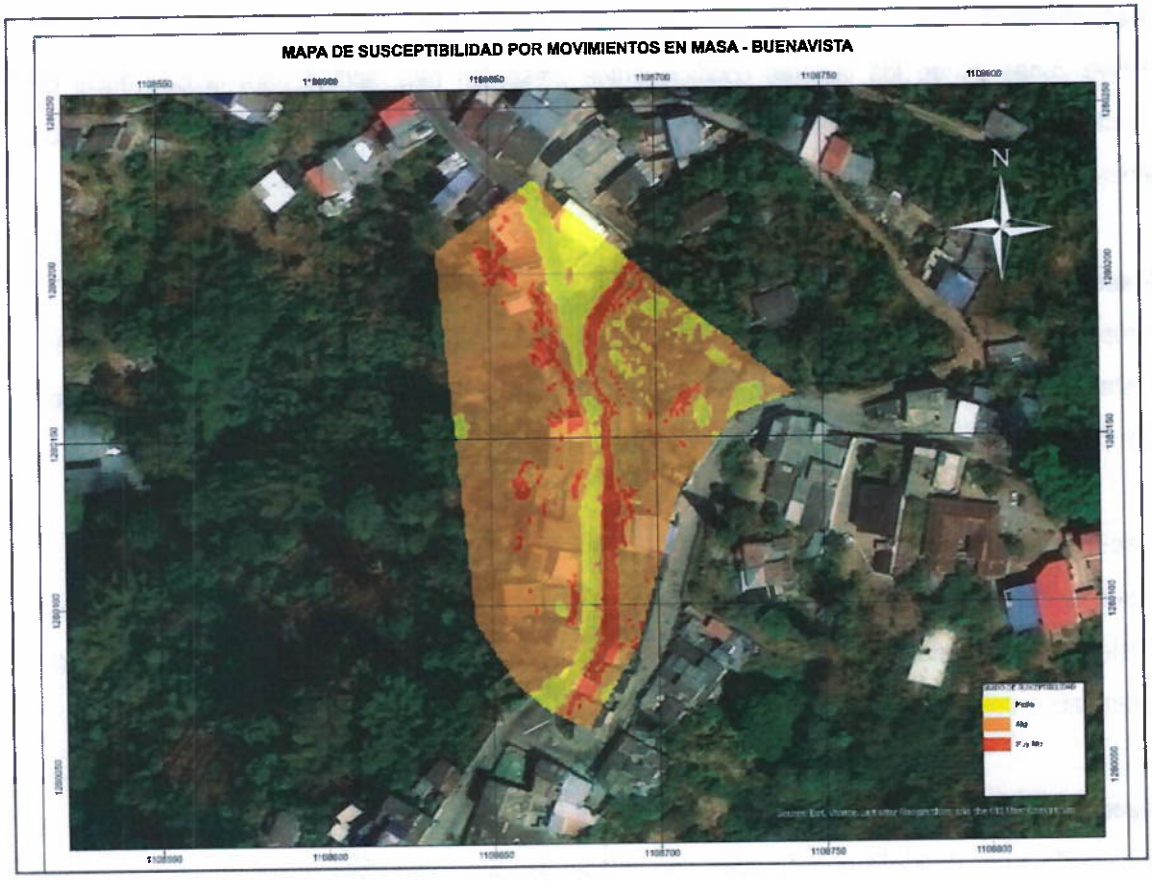


Ilustración 27. Mapa de Susceptibilidad por movimientos en Masa, sector Buenavista

5.7. Análisis e interpretación

El mapa final de susceptibilidad evidencia que la mayor parte del sector Buenavista presenta susceptibilidad alta, asociada principalmente a la presencia de pendientes pronunciadas, materiales residuales meteorizados y configuraciones geomorfológicas de ladera.

Las zonas clasificadas como muy alta susceptibilidad se concentran principalmente en sectores localizados hacia la parte central y baja del área de estudio, donde coinciden con pendientes fuertes, mayor rugosidad del terreno, presencia de materiales coluviales o residuales heterogéneos y configuración geomorfológica de laderas disectadas.

En contraste, las áreas clasificadas como susceptibilidad media corresponden a sectores de menor pendiente o superficies relativamente más estables dentro del tejido urbano.

En términos generales, la susceptibilidad en el sector Buenavista se encuentra controlada principalmente por la pendiente del terreno y la configuración geomorfológica de las laderas, mientras que las características geotécnicas de los materiales y la intervención antrópica actúan como factores moduladores de la estabilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLOOM, A. Geomorphology: A systematic analysis of Late Cenozoic landforms. Waveland Pr Inc, Third edition, 482 p. 2004.

BONACHEA, JAIME Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos, PhD, tesis. 2006.

BOWLES, Joseph E. Foundation Analysis and Design. Fourth Edition. McGraw-Hill Book Company. Singapore, 1988.

BUENO y SOLARTE, Geología, geotecnia y comportamiento erosivo de las áreas de reserva forestal de Bucaramanga. Proyecto de grado (inédito). UIS, Escuela de Geología. Bucaramanga, Santander. Vol. 1, 140 Págs. 1994.

CARREÑO, M.L., CARDONA, O.D., Y BARBAT, A.H. Metodología para evaluación del desempeño de la gestión del riesgo. Monografías de Ingeniería Sísmica. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Barcelona. 2004

CASTRO, E., VALENCIA, A., OJEDA, J., MUÑOZ, F. Y FONCESA, S. Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa, Guía metodológica, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia. 2001

CEDIEL, F. El Grupo Girón una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental: Servicio Geológico Nacional (Colombia), Bol, Geológico, v. XVI, p. 5-96. 1968.

CHOW, V., T., MAYS, L., W., MAIDMENT, D., R., "Hidrología Aplicada", McGraw-Hill, Santafé de Bogotá. 1994.

Decreto 1523 de 24 de abril 2012 por el cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.

DE PORTA, J., La terraza de Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander (Colombia), Bol de Geología, N°3, p. 3-13. 1959.

DELGADO VARGAS, Manuel. Ingeniería de Fundaciones. Primera Edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 1996.

Departamento Nacional de Estadística (DANE), Censo general 2018, disponible en: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018

DIEDERIX, H., TORRES, E., HERNÁNDEZ, C. Y BOTERO, P. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas, y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. INGEOMINAS, 84 p. 2008

ETAYO,. ET AL., Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Publicaciones geológicas especiales INGEOMINAS, (14-I): 235 p. 1983.

GLADE, T.,. Vulnerability assessment in landslide risk analysis. Die Erde 134, 121- 138. 2003

GOMEZ, I. MALDONADO, E. CHIO, G. "Simulación de funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño sísmico para edificaciones de hormigón armado en sistema pórtico". 2008.

GONZALEZ DE VALLEJO, Luis et al. Ingeniería Geológica. Madrid. PEARSON Prentice Hall, 744 p. 2002

Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. 2015.

HERMELÍN, M. Bases de Geología Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 1987.

INGEOMINAS, Microzonificación Sísmica del Área Metropolitana de Bucaramanga. Fase I. Bucaramanga. (Hoy Servicio Geológico Colombiano). 1997.

INGEOMINAS. Geología del departamento de Santander. (Hoy Servicio Geológico Colombiano) 1999.

INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. (Hoy Servicio Geológico Colombiano) 2001.

INGEOMINAS. Mapa geológico de Colombia. Escala 1:1'000.000. Bogotá. (Hoy Servicio Geológico Colombiano). 2007.

INGEOMINAS. Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. (Hoy Servicio Geológico Colombiano). 2009.

JIMÉNEZ, G., SPERANZA, F., FACCENA, C., BAYONA, G. Y MORA, A. Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial Fan: Evidence for a < 3mm/yr slip rate for the Bucaramanga-Santa Marta Fault, Colombia. Journal of South American Sciences, In Press. 2014.

JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Mecánica de suelos Tomo II. Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos. Editorial Limusa. México, 1991.

JULIVERT, M. Morfoestructura de la Zona de la Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S.A.). p. 9-41. 1958.

LANGENHEIM, R. L., JR. Preliminary report on the stratigraphy of Giron formation in Santander and Boyacá: Inst. Geol. Nal. (Colombia), Informe 1011, 20 p. 1954.

LEONE, F., ASTE, J.P., LEROI, E., Vulnerability assessment of elements exposed to mass-moving: working toward a better risk perception. In: Senneset, K. (Ed.), Landslides. Balkema, Rotterdam, pp. 263– 269. 1996

FELL, R. Landslide risk assessment and acceptable risk. Canadian Geotechnical Journal 31, 261–272. 1994

MACCAFERRI, Página web principal. Canalización. http://www.maccaferri-arg.com.ar/soluciones/soluciones-hidraulicas/canalizacion-retangular-y-trapezodial/16198-2.html. 2014.

MESCHEDE, M. Y FRISCH, W. A plate-tectonic model for the Mesozoicand Early Cenozoic history of the Caribbean plate. Tectonophysic 296, p. 269-291. 1998.

Minero-Ambiental y Nuclear INGEOMINAS. Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia. p. 92.

Ministerio de Minas y Energía, Servicio Geológico Colombiano SGC, Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa,182 páginas. 2015

Monsalve, G.,"Hidrología en la Ingeniería", Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C. 1999.

Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente NSR-10. 2010.

NORMAS GEOTECNICA para el control y para la realización de estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos en el área de jurisdicción de la CDMB, Litografía Editar Impresores 2009.

PECK, Ralph, HANSON, Walter E. THORNBURN, Thomas H. Ingeniería de cimentaciones. Talleres de imprenta técnica de Azafrán. México, Enero de 1982.

PMA: GCA. Formato para el inventario de Movimientos en Masa, Versión 1.1. Proyecto Multinacional Andino. 2005.