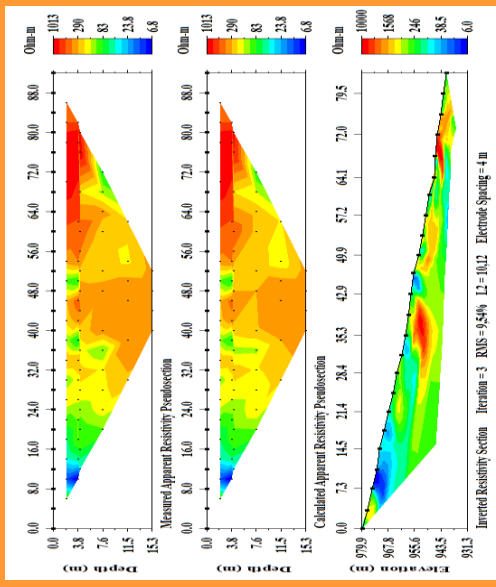
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA (CDMB)

ZONA BARRIO ÁFRICA EN EL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA - SANTANDER

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA REFRACCIÓN SÍSMICA 2D



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

INTRODUCCIÓN 4
OBJETIVOS 5
1 LOCALIZACIÓN GENERAL 6
2 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO 7
2.1 LOCALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA 7
3 EXPLORACIÓN DE CAMPO 9
3.1 EXPLORACIÓN MEDIANTE LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA 9
3.1.1 Parámetros de registro y muestreo de la refracción sísmica 9
3.2 ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW) 11
3.2.1 Parámetros de registro y muestreo 12
3.3 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 14
3.4 EQUIPO DE TRABAJO 16
4 GEOLOGÍA 17
4.1 GEOLOGÍA REGIONAL 17
4.1.1 Miembro limo rojos (Qblr). 18
4.1.2 Miembro gravoso (Qbg). 18
4.1.3 Formación Girón (Jg) 18
4.1.4 Flujos de escombros (Gfe) 20
4.1.5 Terrazas medias (Qal2) 20
4.1.6 Terrazas bajas (Qal1) 21
4.1.7 Aluvial reciente (Qal) 21
5 RESULTADOS OBTENIDOS 22
5.1 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS 22
5.2 CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN NSR-10 23
5.3 ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA LÍNEA LRS1 24
6 CONCLUSIONES 25
7 BIBLIOGRAFÍA 26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de la refracción sísmica. 6
Figura 2. Localización de la unidad central en los diferentes puntos de las líneas de refracción sísmica. 7
Figura 3. Representación de una adquisición de sísmica de refracción. Se observan las ondas generadas a partir de la fuente de energía (golpe de un martillo)..... 10
Figura 4. Método sísmico MASW. 12
Figura 5. Arreglo lineal ensayo Masw1D con cuatro Stacking en el tendido. 13
Figura 6. Flujo de procesamiento ensayos MASW 1D 14
Figura 7. Localización del área de estudio sobre el mapa geológico del AMB. 17
Figura 8. Ensayo de sísmica de refracción No. LRS-1 (Perfil con variación de ondas Vp)..... 24

LISTAS DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de inicio y fin de la línea de refracción..... 7
Tabla 2. parámetros de adquisición para refracciones sísmicas..... 10
Tabla 3. Parámetros de adquisición de masw1D..... 13
Tabla 4. Unidad sismógrafo digital y de tomografía electica..... 16
Tabla 5. Clasificación de suelos de acuerdo con la NSR-10. Tabla A.2.4-1 Clasificación de los perfiles de suelo..... 23

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.

OBJETIVOS

GENERAL

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

ESPECÍFICOS

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

- 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,

1 LOCALIZACIÓN GENERAL

El proyecto se encuentra localizado en el barrio África en el municipio de Bucaramanga en el departamento de Santander.

Figura 1. Localización geográfica de la refracción sísmica.



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

2 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

2.1 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 1. Coordenadas de inicio y fin de la línea de refracción.

LINEA	COORDENADAS			
	INICIO		FIN	
	latitud	longitud	latitud	longitud
LRS	7° 5'41.22"N	73° 7'12.82"O	7° 5'43.72"N	73° 7'10.59"O

Figura 2. Localización de la unidad central en los diferentes puntos de las líneas de refracción sísmica.







Fuente imagen tomada de Google Earth 2025 y autores.

3 EXPLORACIÓN DE CAMPO

3.1 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.

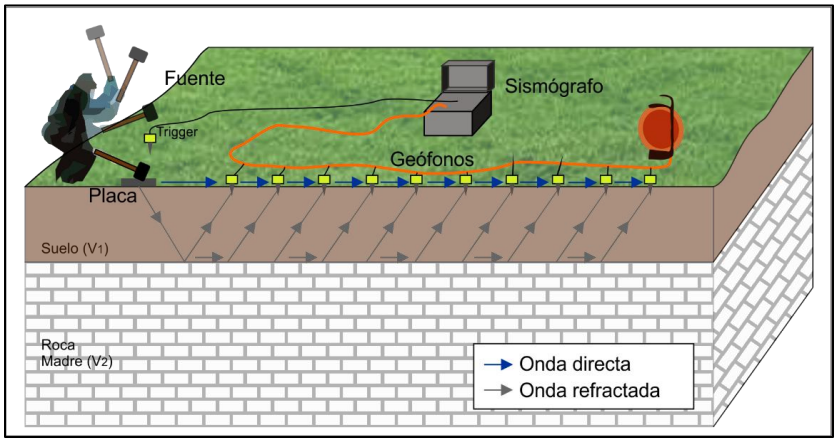
3.1.1 Parámetros de registro y muestreo de la refracción sísmica

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 2. 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

Figura 3. Representación de una adquisición de sísmica de refracción. Se observan las ondas generadas a partir de la fuente de energía (golpe de un martillo).



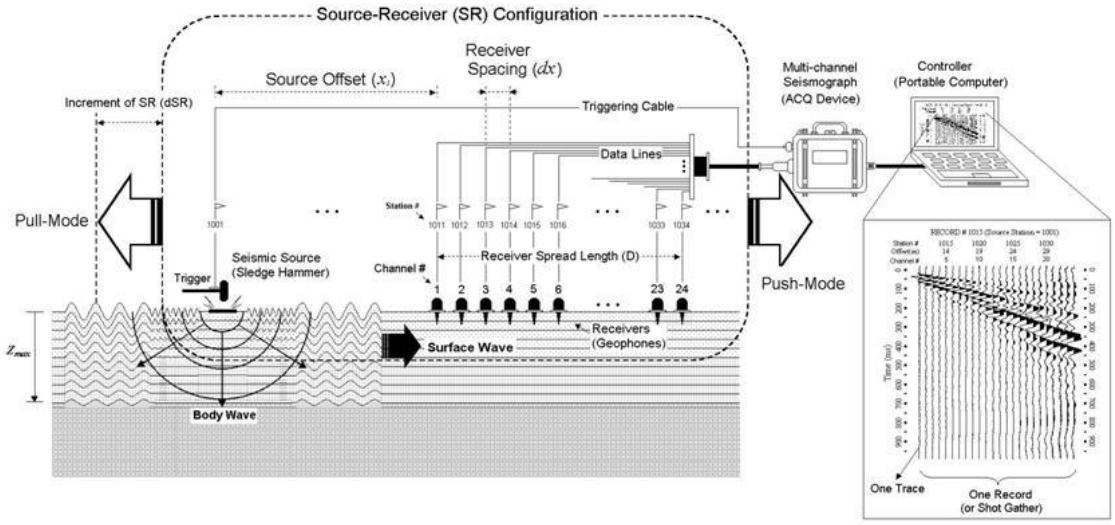
3.2 ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

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).

Figura 4. 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).

3.2.1 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:

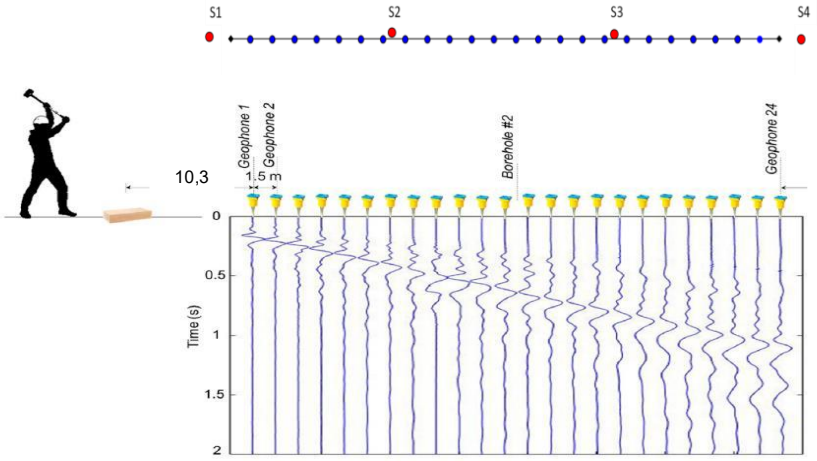
Tabla 3. Parámetros de adquisición de masw1D.

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).

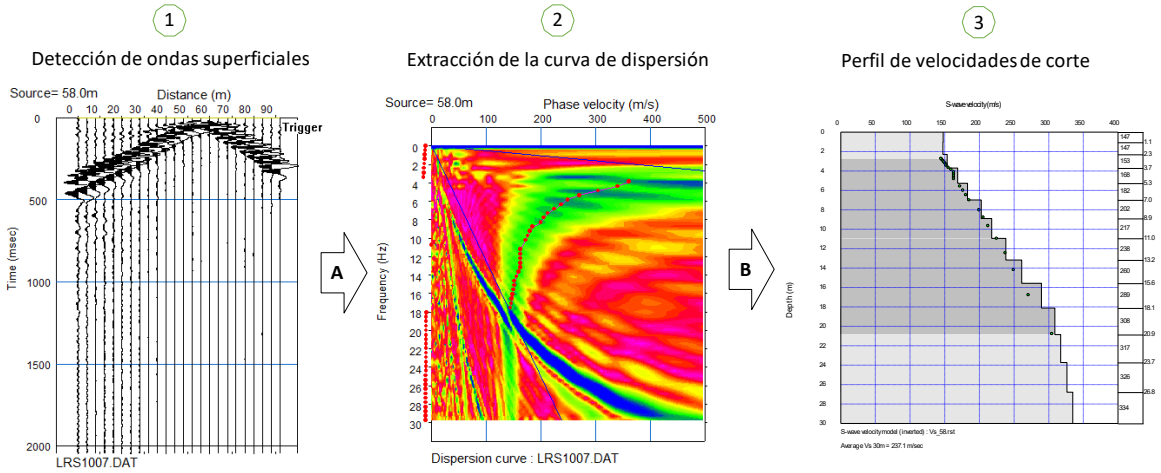
Disparos S2 y S3 localizados la parte media del tendido, a una distancia de 27.4 m a partir del geófono 1 y geófono 24 (30% de la longitud del arreglo).

Figura 5. 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.

Figura 6. Flujo de procesamiento ensayos MASW 1D



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

3.3 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.

3.4 EQUIPO DE TRABAJO

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

Tabla 4. Unidad sismógrafo digital y de tomografía electica.

EQUIPO DE REFRACCIÓN

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

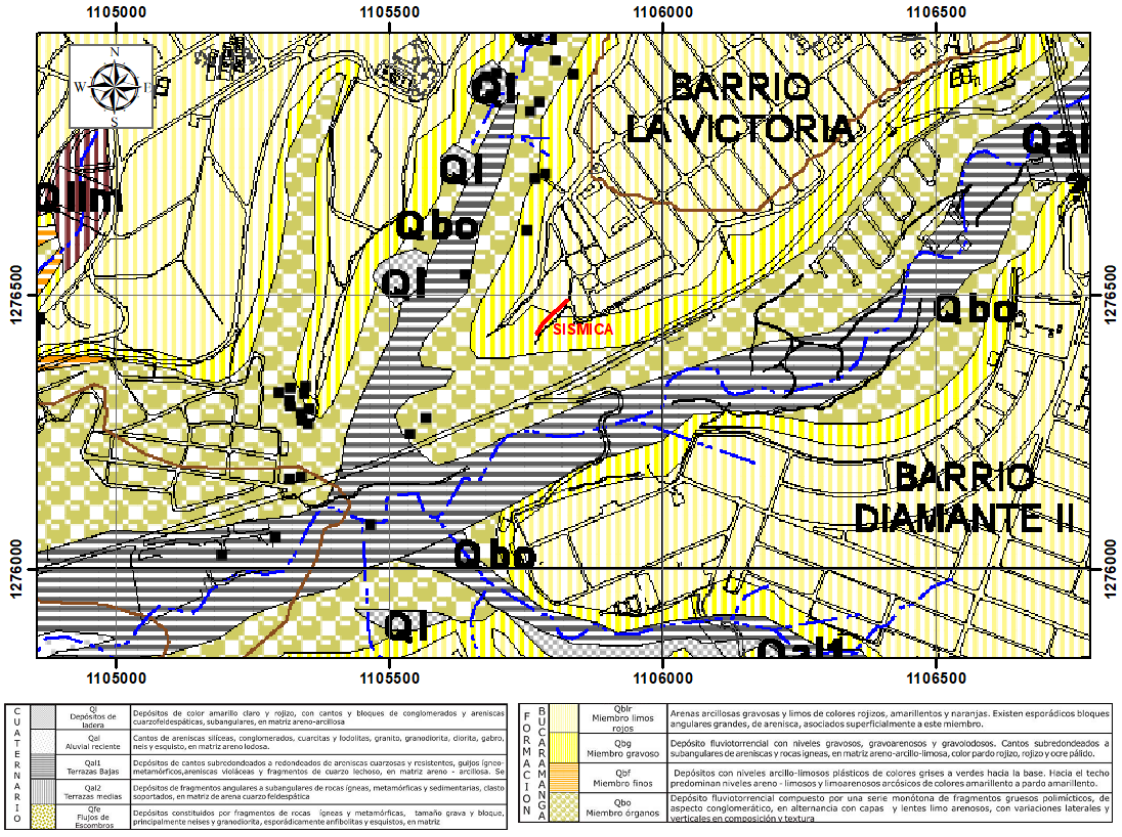
4 GEOLOGÍA

4.1 GEOLOGÍA REGIONAL

El presente capítulo corresponde con la revisión de la geología del área localizado en el barrio África en el municipio de Bucaramanga en el departamento de Santander, donde se realizó una línea sísmica y una tomografía. La geología de esta región se encuentra bien representada en geología del Área Metropolitana de Bucaramanga en el estudio de Zonificación Sismo-geotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga (INGEOMINAS 2001).

Esta área del Municipio de Bucaramanga esta principalmente constituido por miembro órganos (Qbo), miembro gravoso (Qbg), miembro de limos rojos (Qblr), miembros finos (Qbf) relacionados a la formación Bucaramanga

Figura 7. Localización del área de estudio sobre el mapa geológico del AMB.


1105000
1105500
1106000
1106500
1276500
1276000
BARRIO LA VICTORIA
BARRIO DIAMANTE II
SISMICA
Qal
Qbo
Qbo
Qbo
Qal
Qal
Qal

Obsérvese en la figura anterior que el área puntual donde se realizaron los ensayos se ubica sobre los miembros limos rojos (Qblr) y miembros gravosos (Qbg).

4.1.1 Miembro limo rojos (Qblr).

Nivel definido por Julivert (1963). Regionalmente este miembro se localiza hacia la parte alta del sector urbanizado de Bucaramanga y Floridablanca, aunque no en forma uniforme. Está constituido por arenas arcillosas gravosas y lomos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Tiene presencia esporádica en bloques angulares de areniscas asociados superficialmente a este miembro; estos cantos pueden estar embebidos dentro de limos rojos y se caracteriza por estar meteorizados.
En estado seco presentan buena consistencia, pero en presencia de agua esta disminuye noblemente facilitando la erosión.

4.1.2 Miembro gravoso (Qbg).

Definido por Niño y Vargas (1992), ubicado sobre la escarpa occidental y norte de Bucaramanga, La morfología que presenta el miembro Gravoso es similar a la del órgano en los sectores de los valles de las quebradas, pero hacia la parte sur de la quebrada La iglesia la morfología corresponde a colinas suaves onduladas, con un drenaje detrítico. Su espesor varía entre 8 y 30 metros, presenta niveles gravosos, gravo lodoso. Los cantos son en su mayor parte tamaño grava, de diámetro promedia 15 centímetros y bloques de roca, en menor cantidad, hasta de 0.8 metros de diámetro, subangulares a subredondeadas, en matriz areno arcillo limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido.
En general el depósito es matriz soportado, aunque localmente se presenta clasto soportado. El contacto inferior con el miembro finos es neto, continuo y suavemente onduloso, y el contacto con el miembro limo rojos es gradacional. Macroscópicamente se estima que la matriz representa alrededor de un 60% del volumen total, con aproximadamente 2/3 partes de arena, tamaño medio a grueso y 1/3 de finos.

4.1.3 Formación Girón (Jg)

“Hettner la define por primera vez (1982) como “Girón Series” (Ward, D.E. et al., (1973), para designar un conjunto grueso de areniscas, conglomerados y limolitas color marrón rojizo, se encuentra limitando la Formación Tambor, donde infrayace y suprayance respectivamente. Es una sección aproximadamente de 3500 m en un

miembro inferior arenoso de 750 m y uno medio de 1250 m y uno inferior de 1500 m".

"El contacto de Girón que suprayace la Formación Jordán, es una discordancia, que alcanza de 10°-15°. La amplia área de distribución de rocas sedimentarias tipo Girón se encuentra en el norte y este de Colombia y al oeste de Venezuela, la edad y correlación de la formación han sido por mucho tiempo fuente de incertidumbre y especulación. Los límites entre la Formación Girón y Jordán han presentados fragmentos de la fase porfirítica de una de estas rocas, el granito del pescadero es encontrado en las capas inferiores del Jordán cerca a Piedecuesta".

"El occidente del río de Oro esta encuentra cubierto principalmente por depósitos sedimentarios de origen aluvial y coluvial, tales como la formación Bucaramanga y los flujos de escombros y detritos de Floridablanca y Piedecuesta, así como de otros provenientes del cerro de Palonegro. Son presentados como estratos gruesos con intercalaciones de conglomerados, areniscas conglomeráticas con estratificación cruzada, y areniscas de grano grueso a medio, cuarzofeldespáticas, de colores crema, verde y rojo. También se observan intercalaciones de lodolitas masivas, violáceas, con bajo contenido de micas".

"Sobre el talud derecho de la autopista Floridablanca a Piedecuesta, correspondiente a la base de la ladera de la Mesa de Ruitoque, conforma una faja alargada de dirección aproximada norte-sur, caracterizada por la alternancia de estratos muy duros de conglomerados, hasta de 3 m de espesor, capas de arenisca dura de 0.8 a 2 m de espesor, y niveles blandos de lutitas violeta hasta de 2.5 m. Las areniscas presentan estratificación cruzada y gradación, pasando desde grano fino, medio, grueso, a conglomeráticas; su color es café claro".

"Los conglomerados se componen en su mayor parte de cantos de cuarzo, chert y riolita. La orientación de la estratificación varía entre N5°E/50W y N5°W/60°W; se destacan tres juegos de diaclasas: N5°W/50°E; N60°W/40°S; N80°E/60°N. En los alrededores de Floridablanca, muestra niveles de areniscas conglomeráticas de color marrón rojizo con intercalaciones de areniscas violáceas, de grano fino. Las areniscas conglomeráticas están intercaladas con niveles de areniscas de grano medio de mala selección. Estos bancos de areniscas son muy competentes; sin embargo, presentan alto grado de fracturamiento tanto paralelo como perpendicular a la estratificación".

"Afloramientos esporádicos de la formación Girón aparecen en la parte baja de las quebradas que llegan del escarpe occidental de la Meseta de Bucaramanga hacia el río de Oro. Se caracterizan por capas competentes de conglomerados, areniscas verdosas y rojizas, intercaladas con lodolitas violetas masivas".

4.1.4 Flujos de escombros (Gfe)

"Son depósitos de piedemonte de origen fluvio torrencial y fluvio gravitacional, provenientes principalmente de la denudación de los materiales alterados que componen el Macizo de Santander, los cuales son transportados a lo largo de los cauces de las corrientes de agua que nacen en éste".

"Se presentan sobre el piedemonte oriental del Área Metropolitana, entre el casco urbano de Floridablanca y Piedecuesta, donde se reconocen materiales cuyos depósitos, al pie de la ladera montañosa, forman abanicos y conos de deyección coalescentes con pendiente de 2° a 4°, y superficies suavemente onduladas. Sobre esta unidad se desarrolla un drenaje paralelo a subparalelo".

"Están constituidos esencialmente por fragmentos de rocas ígneas y metamórficas del macizo, tamaño grava y bloque, principalmente neises y granodiorita, esporádicamente anfibolitas, dioritas y esquistos, en matriz areno-limosa. Estos depósitos sedimentarios se han venido acumulando mediante repetidos episodios de descargas torrenciales, probablemente violentas, por lo que los espesores y sus proporciones granulométricas y volumétricas son muy variados. Se pueden encontrar eventos clasto-soportados, con predominio de bloques y gravas, como también matriz soportados, con predominio de arena; el tamaño máximo de estos bloques puede sobrepasar 1 m de diámetro. Estos depósitos descansan principalmente sobre rocas de las formaciones Girón, Jordán y Silgará, su espesor medio se estima entre 10 y 15 m".

4.1.5 Terrazas medias (Qal2)

son depósitos de origen aluvial, de superficie más o menos plana, poco disectados, ubicados hacia las márgenes de las principales corrientes de agua. Se observan terrazas altas y sobre la margen izquierda de la quebrada La Estancia, afluente del río Frío, al occidente de Floridablanca, conforma un nivel de terraza medio, compuesto por fragmentos angulares a subangulares, de 20 cm promedio de

diámetro, clasto soportado, con coloración blancuzca, en matriz de arena cuarzo feldespática, provenientes del macizo de Santander. En estos depósitos se aprecia que hay predominio de rocas de neis cuarzo feldespático-micáceo, y que los clástos se encuentran en estado de meteorización alto a moderado".

4.1.6 Terrazas bajas (Qal1)

"Se observan en las márgenes del río Frío; estos depósitos corresponden a los niveles máximos de inundación alcanzados por las crecientes extraordinarias actuales. En los escarpes de las terrazas se observan cantos subredondeados a redondeados de areniscas cuarzosas blancas, amarillentas y resistentes, guijos ígneo-metamórficos, algunas areniscas violáceas y fragmentos de cuarzo lechoso con una disposición no uniforme y esporádicos lentes arenosos. En el municipio de Floridablanca este nivel se presenta como un depósito de forma alargada, de superficie más o menos plana, de aproximadamente 4 Km de longitud por 250 m promedio de ancho, donde se ubican los barrios Bucarica y Lagos II Etapa".

"Este nivel se distribuye aguas abajo por el río Frío y la quebrada La Estancia, hasta muy cerca de la confluencia con el río de Oro. En dicho sector, está compuesto de gravas arenosas y arenas gravosas, de forma angular a subangular, con algunos bloques de roca de tamaño métrico, de neis y cuarzomonzonita provenientes del Macizo de Santander. Corresponde a depósitos aluviales, tipo flujos torrenciales y flujos de escombros, transportados a lo largo del río Frío en época reciente".

4.1.7 Aluvial reciente (Qal)

"Las principales acumulaciones están localizadas en los valles y llanuras de inundación del río Frío, además de sus quebradas tributarias como Zapamanga, Suratoque, Aranzoque y en general toda la red hidrográfica que se desarrolla al occidente del Macizo de Santander. Estos depósitos están compuestos por fragmentos de composición y granulometría muy variable. En general contienen cantos de areniscas silíceas, areniscas conglomeráticas, conglomerados, cuarcitas y lodolitas, como también granito, granodiorita, diorita, gabro, neis y esquisto, en una matriz areno lodosa. El tamaño de los cantos varía desde unos pocos centímetros hasta 1 m, con predominio del diámetro de 50 cm, de forma subredondeada a redondeada y baja esfericidad".

5 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.

5.1 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

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

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

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

5.2 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 5. 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)	

5.3 ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA LÍNEA LRS1

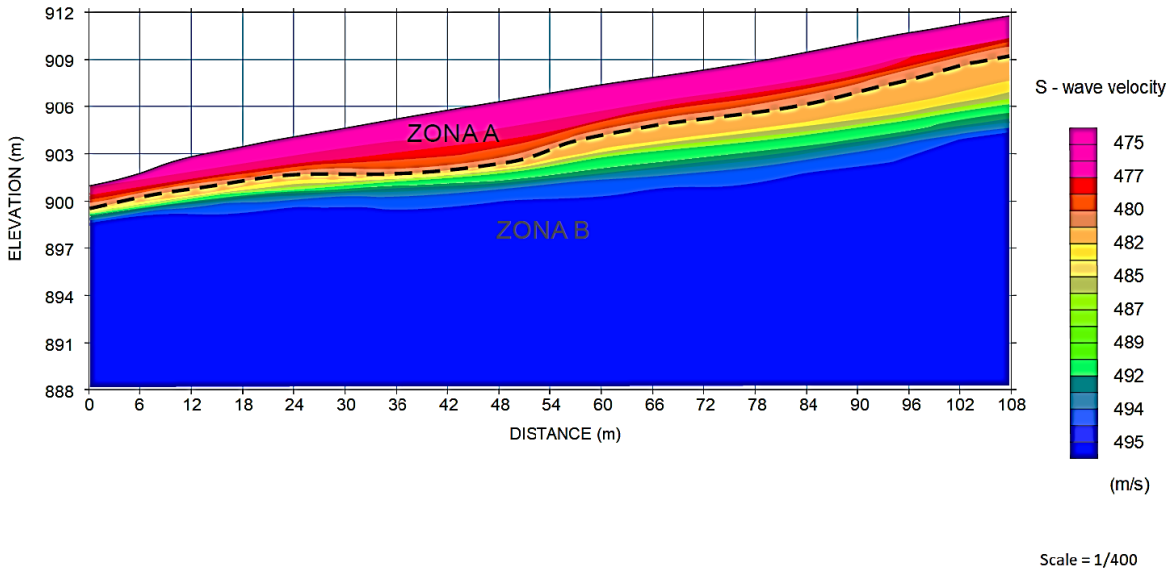
De acuerdo con los resultados de las ondas de corte Vp, en comparación con lo observado en el terreno se tiene:

La imagen de Tomografía Sísmica LRS1 presenta un modelo detallado calculado por elementos finitos, el cual permite observar más de 10 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 a un depósito cuaternario con cierto grado de consolidación, con un espesor que varía entre los 1 y 4 metros aproximadamente.
La ZONA B corresponde a un depósito con mayor grado de consolidación, presentando un ligero aumento en las velocidades de la onda compresional (Vp), como respuesta al mejoramiento existente en el talud, debido a la construcción de la pantalla de anclajes.

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

Figura 8. Ensayo de sísmica de refracción No. LRS-1 (Perfil con variación de ondas Vp).



Fuente: Autores.

6 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	475 - 480	1 - 4	Depósito cuaternario con cierto grado de consolidación
B	480 - 495	Superior a 10	Depósito con mayor grado de consolidación

7 BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía de Floridablanca, (2016). Plan de Ordenamiento Territorial POT del Municipio de Floridablanca Santander,

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2010. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR-10. Bogotá, AIS, 2010.

Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation, (2000). Publicado en |mayo 2000. Originalmente publicado como D 5777 – 95.

Xia-Miller-Park-Ivanov 2004. Utilization of high-frequency Rayleigh waves in near-surface Geophysics.

Kearey, P. and Brooks, M. 1991. An Introduction to Geophysical Exploration, 2nd Edition: Blackwell Science.

Geometrics. 2009. SeisImager/2DTM Manual Versión 3.3.

Burger, H.R. 1992. Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface: Prentice Hall.

INGEOMINAS, (2001). Estudio de Zonificación sismogeotécnica indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Loke, M. H. y Barker, R. D. 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Nexton method. Geophysical Prospecting, v.44, p. 131-152.
Look, B. (2007). Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables.

Orellana, E. 1982. Prospección geoeléctrica en Corriente Continua. Editorial paraninfo.

Auge. M. 2008. Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea. Universidad de Buenos Aires.