Revisión Estudio geotécnico de la Quebrada los muertos – La Plata en el departamento de Huila

LISTA DE DISTRIBUCIÓN

CLASE DE DOCUMENTO:	CÓDIGO:	FECHA:
INFORME GEOTÉCNICO LA PLATA - HUILA		12-12-24

LISTA DE DESTINATARIOS

DESTINATARIO DEL INFORME	IDENTIFICACIÓN

CONTROL DE MODIFICACIONES

ÍNDICE REVISIÓN	CAPÍTULO MODIFICADO	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES	APROBADO
V0		**19/11/2024**	**Creación del documento**	
V1	**Cap. 10**	**21/11/2024**		
V2		**12/12/2024**	**Ajuste Observaciones**	

CONTROL DE DOCUMENTOS

ELABORÓ:	FIRMA	APROBÓ	FIRMA

Tabla de Contenido

Pág.

1 INTRODUCCIÓN 10

2 OBJETIVOS 11

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 11

2.2 ALCANCE 11

3 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO 13

4 REGISTROS HISTÓRICOS 15

5 GEOLOGÍA 16

5.1 GEOLOGIA REGIONAL 16

5.1.1 Ortogranito de La Plata, Pєp 17

5.1.2 Formación Saldaña, Js 17

5.1.3 Batolito de Ibagué, Ji 17

5.1.4 Formación Caballos, Kc 18

5.1.5 Formación Hondita, Kh 18

5.1.6 Formación Loma Gorda, Kl 18

5.1.7 Formación Seca (KPgs) 19

5.1.8 Grupo Chicoral, Pgch 19

5.1.9 Formación Palermo, Pgp 19

5.1.10 Formación Baché, Pgb 19

5.1.11 Abanicos Recientes, Qar 20

5.1.12 Depósitos aluviales, Qal 20

5.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 20

5.2.1 Falla Chusma – Teruel 20

5.2.2 Falla de la Plata 21

5.3 GEOLOGÍA LOCAL 22

5.3.1 Caracterización de las Unidades Geológicas de Ingeniería 22

5.3.2 Factores considerados para caracterizar las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) 22

5.3.3 Unidades de Suelos 24

5.3.4 Unidad de Roca 25

5.4 MORFODINÁMICA 29

5.4.1 Procesos de erosión 30

6 CAMPAÑA DE EXPLORACIÓN 32

6.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO 32

6.2 EXPLORACIÓN DIRECTA 33

6.2.1 Actividades de Campo 35

6.2.2 Registro Fotográfico 35

6.2.3 Registro Estratigráfico 36

6.3 EXPLORACIÓN INDIRECTA 39

6.3.1 Localización línea de refracción sísmica 41

6.3.2 Metodología de Adquisición 42

7 ENSAYOS DE LABORATORIO 44

7.1 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS 44

7.1.1 Parámetros de resistencia al corte a partir del SPT 44

7.1.2 Correlaciones utilizadas a partir de los ensayos de SPT 45

7.1.3 Metodología parámetros de resistencia en rocas 46

7.1.4 Cimentaciones superficiales 47

7.2 RESULTADOS EXPLORACIÓN DIRECTA 50

7.2.1 Ensayos de clasificación 50

7.2.2 Ensayos de propiedades mecánicas 50

7.2.3 Parámetros de resistencia en roca 53

7.3 RESULTADO EXPLORACIÓN INDIRECTA 53

7.3.1 Parámetros geomecánicos 54

7.3.2 Resultados de la línea sísmica 54

7.3.3 Clasificación General Del Subsuelo Según Norma NSR – 2010 57

8 CONDICIONES SÍSMICAS 59

8.1 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PARA DEFINIR EL PERFIL DEL SUELO 59

8.2 PERFIL DEL SUELO OBTENIDO 60

8.2.1 Coeficiente de Aceleración Pico del Terreno 61

8.3 PARÁMETROS DE ACELERACIÓN PICO EFECTIVO (AA) Y VELOCIDAD PICO EFECTIVA (AV) 65

8.4 FACTORES DE SITIO 65

8.5 COEFICIENTE DE IMPORTANCIA (I) 66

8.6 COEFICIENTE SÍSMICO DE DISEÑO PARA ANÁLISIS SEUDO ESTÁTICOS PARA TALUDES (KST) 67

8.7 ACELERACIÓN PICO DEL SUELO 67
8.8 ESPECTRO DE ACELERACIONES 68
9 MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO 69
9.1 PARÁMETROS DE RESISTENCIA 77
9.1.1 Material 1: Arena arcillosa (SC) 77
9.1.2 Material 2: Arena limosa (SM) 78
9.1.3 Roca blanda Formación seca 78
9.1.4 Parámetros de diseño adoptados 79
10 DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN 80
10.1 GENERALIDADES MURO EN CONCRETO 80
10.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN 81
10.3 ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES DE DISEÑO 82
10.4 NORMAS DE DISEÑO 82
10.5 CARGAS DE DISEÑO 82
10.5.1 Peso propio 82
10.5.2 Empuje horizontal del relleno (EH) 83
10.5.3 Empuje vertical del relleno (Kv) 83
10.5.4 Empuje horizontal del relleno (Kh) 83
10.5.5 Empuje activo por sismo (EQ - PAE) 83
10.6 DISEÑO GEOTÉCNICO 84
10.7 ASENTAMIENTOS DEL MURO 85
10.8 RESULTADOS ESTABILIDAD LOCAL DEL MURO 86
11 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD 89
11.1 ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA 89
11.2 EVENTO EXTREMO 90
11.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GLOBAL CON OBRAS 91
11.3.1 Perfil K0+245.00 91
11.3.2 Perfil Muro Canal 92
11.3.3 Resultados análisis de estabilidad global 93
11.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GLOBAL PROCESO CONSTRUCTIVO 94
11.4.1 Perfil K0+245.00 94
11.4.2 Perfil Muro Canal 95
11.4.3 Resultados análisis de estabilidad global proceso constructivo 96
12 PLANTEAMIENTO DE OBRAS 97

13 CONCLUSIONES 102

13.1 RECOMENDACIONES 105

Índice de Ilustraciones

Pág.

Ilustración 1. Localización Municipio La Plata - Huila 13
Ilustración 2. Localización específica del área de estudio 14
Ilustración 3. Verificación de registros históricos asociados a movimientos en masa cerca del área de estudio 15
Ilustración 4. Cartografía geológica del área de estudio en los alrededores del municipio de La Plata (denotado en el polígono rojo) 16
Ilustración 5. Cartografía geológica del área de estudio en los alrededores del municipio de La Plata 17
Ilustración 6. Coordenadas: E= 1130801, N= 757297, altura= 1186 m, detalle. Roca muy meteorizada del Batolito de Ibagué, aflorante en montaña del costado occidental del casco urbano de La Plata 18
Ilustración 7. Coordenadas: E= 1130940, N= 755804, altura= 1050 m, detalle. Abanico fluvio torrencial expuesto en talud 25
Ilustración 8. Coordenadas: E= 1132366, N= 756779, altura= 1012 m, detalle. Arcillolitas de la Formación Seca 26
Ilustración 6. Roca aflorante en La Quebrada Los Muertos del casco urbano de La Plata 27
Ilustración 9. Mapas de Unidades Geológicas para Ingeniería 29
Ilustración 10. Coordenadas: E= 1132366, N= 756779, altura= 1012 m, orientación al nororiente. Procesos de socavación lateral sobre arcillolitas de la Formación Seca 31
Ilustración 11. Coordenadas: E= 1132254, N= 755922, orientación al suroccidente. Procesos de socavación lateral, que fueron minimizados con la construcción de un muro; se observa muro de gaviones colapsados por este proceso 31
Ilustración 12. Localización de la exploración subsuelo 32
Ilustración 13. Fotografías de las actividades realizadas de la exploración directa 36
Ilustración 14. Esquema de una refracción sísmica, se observan la dirección de los rayos directos, reflejados y refractados. 39
Ilustración 15. Ubicación de la línea sísmica MASW 3 41
Ilustración 16. Fotografías de las actividades realizadas de la exploración indirecta 43
Ilustración 17.Modelo Simplificado LRS-03 55
Ilustración 18. Tomografía sísmica LRS-03 55
Ilustración 19. Perfil unidimensional MASW-03 56
Ilustración 20.Perfil bidimensional (2D) Vs MASW-03 57
Ilustración 21. Variación del número de golpes de campo, número de golpes corregido en función de la profundidad 60

Ilustración 22. Zonas de amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en funcion de Aa y Av. 62
Ilustración 23. Valor de Aa para la zona de estudio 63
Ilustración 24. Valor de Av para la zona de estudio..... 64
Ilustración 25. Espectro de aceleraciones de diseño para 5% de amortiguamiento en el área de estudio 68
Ilustración 26. Humedad Natural y Límites de consistencia..... 69
Ilustración 27. Características Granulométricas 70
Ilustración 28. Peso específico seco y húmedo..... 71
Ilustración 29. Ensayo de Penetración Estándar 72
Ilustración 30. Humedad Natural y Límites de consistencia..... 73
Ilustración 31. Características Granulométricas 74
Ilustración 32. Peso específico seco y húmedo..... 75
Ilustración 33. Ensayo de Penetración Estándar 76
Ilustración 34. Ensayos de SPT 77
Ilustración 35. Ensayos de SPT 78
Ilustración 36. Parámetros de resistencia Formación seca Roca blanda..... 79
Ilustración 37 Geometría del muro – dimensiones 81
Ilustración 38 Carta de capacidad portante admisible 87
Ilustración 39 Carta de asentamientos para carga unitaria..... 87
Ilustración 40. Diagrama de cuerpo libre del talud en condición seudo – estática 90
Ilustración 41. Análisis estabilidad Perfil K0+245.00 - Condición estática..... 91
Ilustración 42. Análisis estabilidad Perfil K0+245.00 - Condición seudo estática..... 92
Ilustración 43. Análisis estabilidad Perfil Muro Canal - Condición estática..... 92
Ilustración 44. Análisis estabilidad Perfil Muro Canal - Condición seudo estática..... 93
Ilustración 41. Análisis estabilidad Perfil K0+245.00 - Condición estática -Excavación 94
Ilustración 42. Análisis estabilidad Perfil K0+245.00 - Condición seudo estática- Excavación 95
Ilustración 43. Análisis estabilidad Perfil Muro Canal - Condición estática - Excavación ... 95
Ilustración 44. Análisis estabilidad Perfil Muro Canal - Condición seudo estática - Excavación..... 96
Ilustración 45. Esquema obras - talud de corte 97
Ilustración 46. Esquema obras muro de contención en concreto 98
Ilustración 47. Esquema obras Canal rectangular..... 98
Ilustración 48. Detalle Box Coulvert 100
Ilustración 49. Imagen de referencia colchón reno..... 101

Índice de Tablas

Pág.

Tabla 1. Correlación de formaciones propuesta para la Plancha 366 Garzón 20
Tabla 2. Condición de fracturamiento de las rocas..... 23
Tabla 3. Clasificación genética de las unidades de suelo..... 24
Tabla 4. Descripción de las unidades Geológicas para Ingeniería, UGI, en la zona de estudio 28
Tabla 5. Descripción de consistencia para suelos cohesivos. 34
Tabla 6. Descripción de densidad para suelos granulares. 34
Tabla 7. Localización de la exploración del subsuelo..... 35
Tabla 8. Registro Sondeo SM-2..... 37
Tabla 9. Registro Sondeo SM-3..... 38
Tabla 10. Clasificación ripabilidad del suelo en función de la velocidad de las ondas de compresión 40
Tabla 11. Coordenadas y longitudes de la línea sísmica MASW..... 42
Tabla 12. Expresiones para correlacionar el ángulo de fricción a partir del SPT 45
Tabla 13. Correlaciones de Vs a partir de SPT 46
Tabla 14. Módulo de elasticidad para suelos, AASHTO 1996 46
Tabla 15. NcL, NqL, NgL. Factores de corrección por capacidad de carga y forma 49
Tabla 16. ic, iq, ig. Factores de corrección por inclinación de la carga 49
Tabla 17. Factores de corrección por nivel freático (D_w: profundidad del nivel freático tomada desde superficie)..... 49
Tabla 18. Tabla resumen resultados de campo y laboratorio SM-2 y SM-3..... 51
Tabla 19. Parámetros del criterio Hoek-Brown para la Unidad de roca Rb-K2E1s. 53
Tabla 20. Fórmulas utilizadas para cálculos de parámetros Geomecánicos..... 54
Tabla 21. Tabla resumen de parámetros..... 57
Tabla 22. Clasificación de los perfiles de suelo según resultados del método..... 58
Tabla 23. Criterio de clasificación de suelos 61
Tabla 24. Valores del coeficiente Fa, para la zona de periodos cortos del espectro..... 65
Tabla 25. Valores del coeficiente Fv, para la zona de periodos intermedios del espectro 66
Tabla 26. Valores de coeficiente de importancia, I..... 66
Tabla 27. Valores de KST/amax Mínimos para análisis seudo estáticos de taludes..... 67
Tabla 28. Parámetros de resistencia de diseño 79
Tabla 29. Detalle de obra..... 80
Tabla 30. Resumen de las dimensiones de la obra..... 80
Tabla 31. Resultados verificación de estabilidad interna del muro..... 86

Tabla 32. Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos.....90
Tabla 33. Resumen Estado límite de resistencia.....93
Tabla 34. Resumen Evento extremo de resistencia 94
Tabla 33. Resumen Estado límite de resistencia - excavación.....96
Tabla 34. Resumen Evento extremo de resistencia - excavación 96
Tabla 35. Requisitos del material granular drenante 100

Anexos

Anexo 1. Generalidades

Anexo 2. Registro De Apique y Sondeo

Anexo 3. Registro Fotográfico

Anexo 4. Resultados De Laboratorio

Anexo 5. Memorias de cálculo

Anexo 6. Propuesta de obras

Anexo 7. Especificaciones

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento considera el análisis geotécnico y propuesta de obra para el control de cauce y mitigación de amenaza por inundación de la Quebrada Los Muertos en la zona urbana del municipio de La Plata en el departamento del Huila, con el fin de disminuir los efectos negativos y situaciones de riesgo sobre la población vulnerable y la infraestructura del Barrio San Rafael y comunidades vecinas, los cuales se pueden generar por los periodos de la ola invernal.

Con este propósito, se describen los aspectos técnicos del estudio y diseño geotécnico del sitio, tales como las condiciones geológicas y geomorfológicas desde el punto de vista regional y local, procesos morfodinámicos (fenómenos de inestabilidad y erosión), evaluando y analizando los resultados de las actividades de campo y laboratorio con el fin de identificar los diferentes horizontes de geomateriales presentes en la zona de estudio.

Adicionalmente, se determinan las propiedades geomecánicas de los materiales del suelo de fundación, buscando que representen las condiciones más críticas desde el punto de vista geotécnico para el comportamiento de la zona, basándose en mediciones de campo, laboratorio y análisis geotécnicos, que son aplicables en las aproximaciones necesarias del diseño de las obras requeridas para estabilizar y proteger el sector de la Quebrada Los Muertos entre las abscisas K0+220 – K0+700.

2 OBJETIVOS

Estimar las condiciones de diseño geotécnico de las obras de contención propuestas para Mitigar los riesgos por inundación ante posibles crecientes de la Quebrada Los Muertos en el municipio La Plata, a partir de la información antecedente, trabajos de campo y exploración geotécnica.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar la información relacionada a registros históricos de movimientos en masa en el tramo de diseño.
- Identificar las potenciales unidades geológicas de ingeniería (UGI) para la zona de estudio.
- A partir de la campaña de exploración realizada para los estudios de AVR del municipio La Plata, establecer y describir los materiales asociados al modelo geológico – geotécnico del sitio.
- Establecer las particularidades de las condiciones sísmicas del suelo in situ según el reglamento sismo resistente NSR-10.
- Efectuar el diseño geotécnico de las estructuras de contención, de acuerdo con la normatividad vigente aplicable.
- Generar las recomendaciones técnicas para la ejecución de las obras de contención y demás particularidades geotécnicas del proyecto.

2.2 ALCANCE

Las recomendaciones presentadas en este documento se basan en las condiciones geotécnicas y geológicas encontradas en la zona de estudio y en las recomendaciones de la literatura para este tipo de Construcción.

Debe entenderse que los materiales térreos son materiales inelásticos, heterogéneos y no isotrópicos, en los cuales su comportamiento no es fácilmente predecible, ni independiente del entorno climático y antrópico en el cual se encuentran.

Cualquier cambio obtenido en las condiciones del terreno producto de la intervención antrópica, actividad sísmica y obras de ingeniería diferentes a las aquí analizadas pueden cambiar las condiciones de riesgo y por lo tanto deben ser reportadas a la entidad competente y por ende al consultor.

Los diseños incluidos en este informe deberán ser evaluados en campo y verificados por parte del ingeniero geotecnista en obra. El alcance del presente informe incluye el estudio del estado de la situación actual del sector de análisis de la Quebrada Los muertos y la

verificación de las actividades de ingeniería ejecutadas en dicha zona:

- Estado de situación actual del sector
- Análisis de la información antecedente extraída de los estudios de Amenaza, vulnerabilidad y riesgo del municipio de La Plata.
- Propuesta de obras de contención de acuerdo con el problema específico identificado en la zona de estudio.

Este documento no podrá ser alterado o modificado sin autorización explícita de este especialista.

3 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

El área de estudio se encuentra localizada al norte del municipio de La Plata (departamento del Huila) en el barrio San Rafael, en el sector de la Quebrada los Muertos cuyo tramo a intervenir comprende las abscisas K0+220 – K0+700 como se muestra en la Ilustración 2.

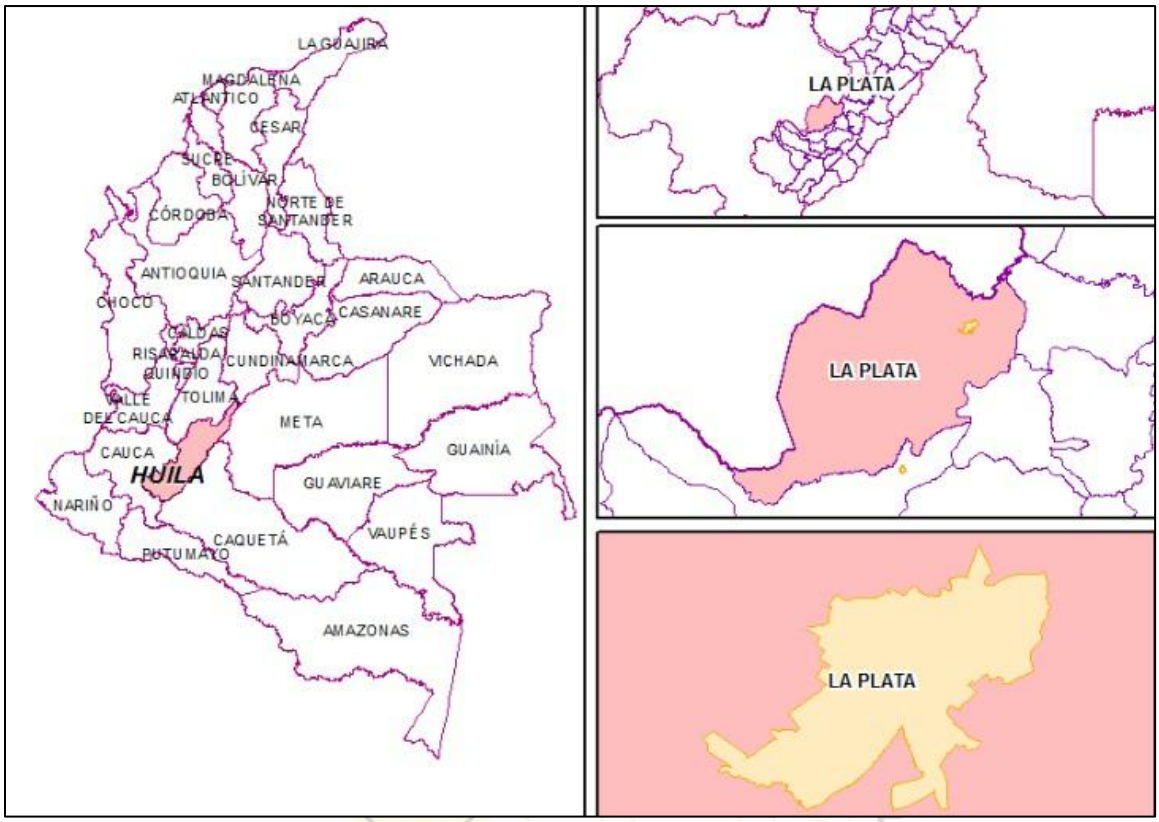


Ilustración 1. Localización Municipio La Plata - Huila
Fuente: Girmava, 2022



Ilustración 2. Localización específica del área de estudio
Fuente: Girmava, 2022

4 REGISTROS HISTÓRICOS

Mediante la recopilación de información realizada a través de la herramienta SIMMA (Sistema de Información de Movimientos en Masa), se han verificado los registros históricos que pudieron haberse presentado en el área de influencia del sitio de estudio, finalmente, se ha establecido que no existen registros históricos asociados a movimientos en masa, los cuales pudiesen correlacionarse directamente con algún grado de daño sobre el área proyectada hacia el norte del casco urbano del municipio La Plata (ver Ilustración 3).

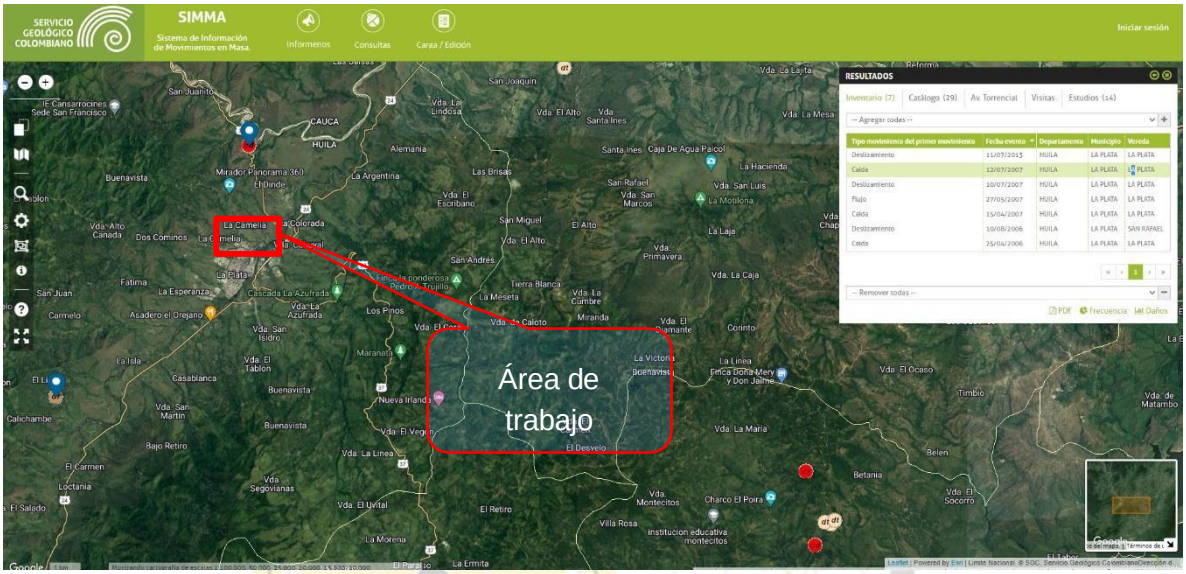


Ilustración 3. Verificación de registros históricos asociados a movimientos en masa cerca del área de estudio.
Fuente: Modificado de SIMMA, 2022

5 GEOLOGÍA

Como objetivo se tiene, determinar las características geológicas, geomorfológicas y procesos morfodinámicos del casco urbano del municipio de La Plata, en el departamento del Huila, que permitan determinar un diagnóstico Geológico - Geotécnico de los diferentes aspectos de estabilidad presentes y/o potenciales, y sus diferentes aplicaciones ingenieriles. La información es extraída del estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo del municipio La Plata, realizado en el año 2017.

La información geológica ha sido obtenida a partir de levantamientos regionales realizados por parte del Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el área enmarcada para la zona de estudio en el municipio de La Plata, reflejados en la plancha geológica 366 “Garzón” de la manera en que se presenta en la Ilustración 4.

5.1 GEOLOGIA REGIONAL

El área de estudio se localiza dentro del área de influencia de la plancha geológica del Servicio Geológico Colombiano 366 – Garzón de la manera en que se presenta en la Ilustración 4.

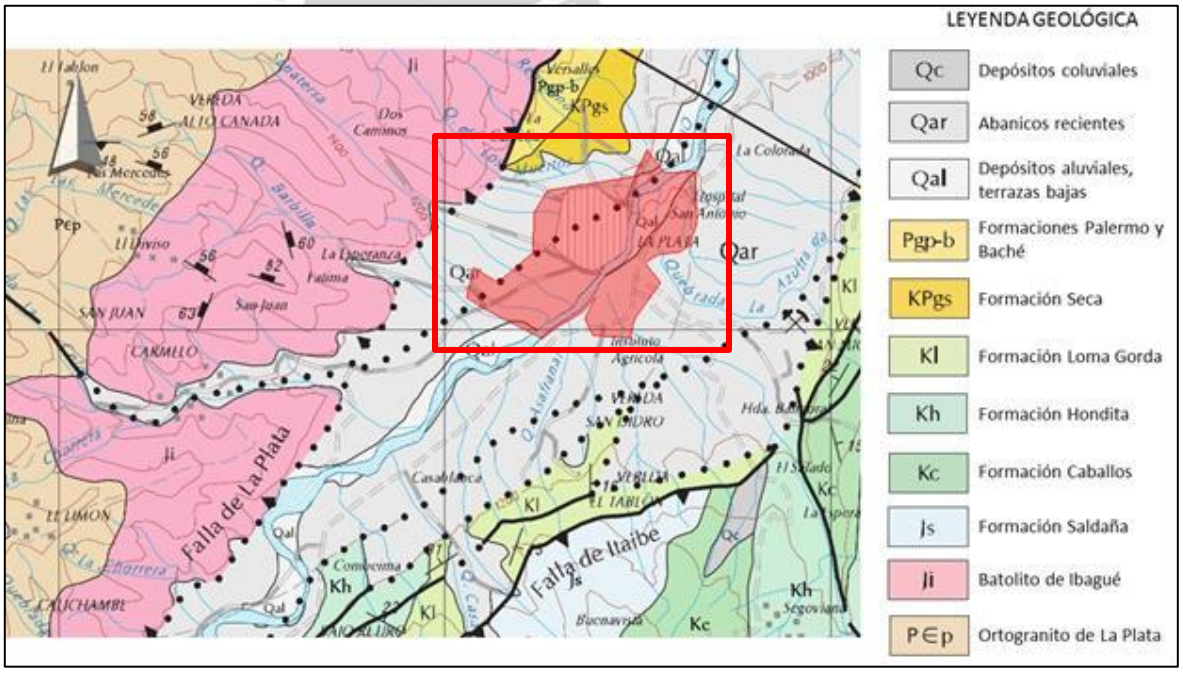


Ilustración 4. Cartografía geológica del área de estudio en los alrededores del municipio de La Plata (denotado en el polígono rojo)
Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017

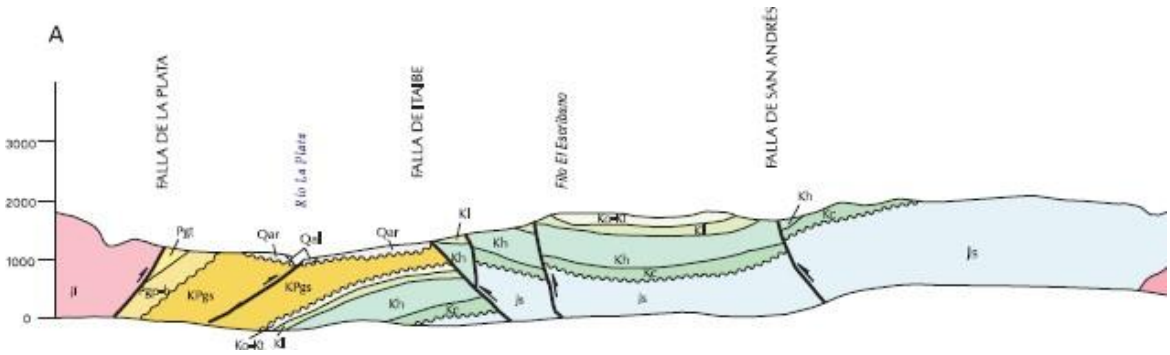


Ilustración 5. Cartografía geológica del área de estudio en los alrededores del municipio de La Plata.
Corte geológico tomado de la Plancha 366 Garzón, SGC.)

De acuerdo a lo observado en la Ilustración 5 la zona de estudio se localiza en inmediaciones del cauce del río La Plata (costado izquierdo de la Ilustración) en medio de la formación seca (KPgs), por consiguiente, este lugar está conformado por areniscas, lutitas y arcillolitas. A continuación, se presenta la descripción de cada una de las unidades geológicas que se muestran en la plancha 366 del SGC.

5.1.1 Ortogranito de La Plata, Pєp

Cuerpo conformado por rocas en avanzado estado de metamorfismo, presentando localmente estructuras de rocas plutónicas. La roca predominante es de composición granítica, pero localmente se encuentran granulitas y neises migmatíticos. Las rocas graníticas pasan gradualmente hacia los bordes y hacia el contacto con el Batolito de Ibagué, a rocas bandeadas con estructuras migmatíticas. Litológicamente predominan los monzogranitos moteados rosados, faneríticos de grano medio a fino y los neises migmatíticos con textura granoblástica. La edad de estas rocas se toma como precámbrica por correlación con el Macizo de Garzón (Rodríguez, 1995ª).

5.1.2 Formación Saldaña, Js

Formación más antigua del área, se le atribuye una edad de Triásico-Jurásico. Se encuentra conformada por tobas de tipo vítreo a cristalino y líticas con variaciones composicionales y texturales. Estas tobas cristalinas se encuentran compuestas principalmente por biotita, plagioclasa y anfíboles. Se encuentra suprayacida, en forma discordante, por la Formación Caballos de edad cretácica.

5.1.3 Batolito de Ibagué, Ji

Cuerpo intrusivo de composición monzogranítica dominante, atravesado en múltiples instancias por diques dioríticos, su textura varía entre fanerítica y afanítica. Se ha hecho

datación radiométrica para este cuerpo, arrojando edades desde 131 ± 2 Ma (Sillitoe et al., 1982) hasta 183 ± 5 Ma (Priem et al. 1989), que corresponden con el Jurásico temprano – Jurásico tardío (Ilustración 6).



Ilustración 6. Coordenadas: E= 1130801, N= 757297, altura= 1186 m, detalle. Roca muy meteorizada del Batolito de Ibagué, aflorante en montaña del costado occidental del casco urbano de La Plata
Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017

5.1.4 Formación Caballos, Kc

Constituida principalmente por areniscas de grano fino cuarzosas con glauconita, posee una matriz arcillosa con cemento ferruginoso, presentan alternancia con calizas micríticas y esparíticas. El contacto inferior con la Formación Saldaña es discordante, mientras que el superior con la Formación Hondita es concordante transicional. Se le atribuye una edad de Aptiano-Albiano (Mendivelso, 1982).

5.1.5 Formación Hondita, Kh

Se estima un espesor de 400 de intercalaciones de areniscas lodosas y limolitas grises fuertemente plegadas y falladas con presencia fósil de bivalvos, peces, amonoideos y fragmentos carbonosos de plantas. El contacto inferior con la Formación Caballos es transicional, mientras que el contacto superior con la Formación Loma Gorda es neto. La formación abarca desde el Albiano medio hasta el Coniaciano (Patarroyo, 1993).

5.1.6 Formación Loma Gorda, Kl

Lutitas, lodolitas silíceas y chert estratificados en capas delgadas a medias, con abundantes foraminíferos. Hacia la base presenta lodolitas calcáreas laminadas e intercalaciones de calizas micríticas negras. Los contactos inferior y superior con la Formación Hondita y con

el Grupo Olini, respectivamente, se observaron cómo concordante neto. De acuerdo con la fauna reportada, se le da una edad de Coniaciano (Patarroyo, 1993).

Esta unidad junto a la Formación Hondita es correlacionable con la Formación Villeta (Mendivelso, 1993)

5.1.7 Formación Seca (KPgs)

Unidad caracterizada por la alternancia de lutitas y arcillolitas rojizas intercaladas con capas de areniscas líticas. La parte superior de la unidad es más arenosa en secuencias granodecrecientes de color gris verdoso. Se estima un espesor aflorante de 400m en esta plancha. En la parte inferior mantiene un contacto neto con la Formación La Tabla, por otro lado, el contacto es discordante en la parte superior con el inicio del Grupo Chicoral.

Esta formación es correlacionable con la Formación Guaduas (Servicio Geológico Nacional, 1959).

5.1.8 Grupo Chicoral, Pgch

Propuesto por Beltrán & Gallo (1968, en Velandia et al., 1996) con el fin de agrupar dos unidades conglomeráticas intercaladas con una lodo-arenosa. Estas unidades han sido separadas de base a techo bajo los nombres de Palermo, Baché y Tesalia. En el área cercana al municipio de La Plata, Las formaciones Palermo y Baché se encuentran cartografiadas de forma conjunta con la nomenclatura Pgp-b.

Esta unidad es correlacionable con la Formación Gualanday Inferior (Servicio Geológico Nacional, 1959).

5.1.9 Formación Palermo, Pgp

Sucesión conglomerática de 50m de espesor con matriz de arena cuarzosa gruesa. Las capas poseen forma de cuñas y mantienen una gradación normal hacia tope y estratificación cruzada, los contactos entre éstas son erosivos.

5.1.10 Formación Baché, Pgb

Se trata de una sucesión de arcillolitas intercaladas con capas medianas de arenitas finas, localmente muestran capas de conglomerados de hasta 5m de espesor presentados en forma de canales con clara estratificación cruzada.

Depósitos Coluviales, Qc.

Depósitos de pendiente asociados con las trazas de falla, no se encuentran detallados

debido a la escala de trabajo, pero algunos son cartografiables en quebradas o escarpes

5.1.11 Abanicos Recientes, Qar

La composición de estos abanicos varía según su localización con respecto a las unidades geológicas aflorantes; se encuentran desde rocas metamórficas y graníticas de los macizos precámbricos. No se conoce dataciones, pero por sus características y asociación se asumen de finales del Pleistoceno hasta el Holoceno.

5.1.12 Depósitos aluviales, Qal

Comprenden los sedimentos actuales transportados como material de arrastre y las terrazas más bajas asociadas a las corrientes principales del Río La Plata, estos depósitos fluviales varían en granulometría y composición. Asociados a corrientes fluviales del Holoceno.

Tabla 1. Correlación de formaciones propuesta para la Plancha 366 Garzón.

Estratigrafía Plancha 366 Servicio Geológico Colombiano	Propuesta Estratigráfica, Consorcio PMAA Magdalena 2017
Formación Baché (Pgb)	Gualanday Medio (Pggm)
Formación Palermo (Pgp)	Gualanday Inferior (Pggi)
Formaciones Hondita (Kh) y Loma Gorda (Kl)	Formación Villeta (Kv)

Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017

5.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Con base en la Ilustración 4 e Ilustración 5 al occidente del municipio se encuentran rocas cristalinas de la Cordillera Central, separadas de los sedimentos del valle del Río La Plata por la falla del mismo nombre, así como también cabalgando sobre rocas paleógenas al norte del municipio. La Falla de La Plata posee una dirección N30°E.

El valle del Río La Plata destaca por una depresión estrecha con dirección noroeste localizada entre las fallas de La Plata e Itaibe (Gómez & Diederix, 1993), donde se ha acumulado una serie de depósitos de abanico provenientes de la Cordillera Central y de la Serranía de Las Minas. En dicha depresión se encuentran expuestas rocas de finales del Cretácico y del Paleógeno.

La siguiente descripción se toma del estudio de "AVR en el municipio de la Plata, 2017".

5.2.1 Falla Chusma – Teruel

La Falla de Chusma pertenece al Sistema de Fallas Chusma – La Plata comprende los departamentos Valle del Cauca, Huila y Tolima. Se considera su tipo de movimiento como inverso sinestral. Con una longitud de 114 km y un azimut de 20 a 35º con un buzamiento Noroeste. Con respecto a su actividad se considera como una falla potencialmente activa.

Fue definida por Montes N, Sandoval A., Vergara H. Presenta un rumbo general SSW - NNE y buzamiento de bajo ángulo hacia el WNW, de tectónica activa durante el Cuaternario.

Esta estructura está localizada en la Cordillera Central desde el sur del departamento del Huila hasta Natagaima. Coloca en contacto rocas del Batolito de la Plata de edad Jurásica con rocas de la Formación Saldaña y rocas sedimentarias Cretácicas. La Falla de Chusma es de movimiento principal inverso y componente sinestral con vergencia al suroriente.

La Falla de Chusma es una falla en echelón, que junto con la Falla de La Plata y otros ramales oblicuos (Falla de San Andrés), conforma el Sistema de Fallas de Chusma – La Plata.

En el sector del municipio de La Plata la traza de la Falla delimita el borde occidental del valle aluvial, separándolo del Batolito que conforma la parte montañosa, identificándose un escarpe de falla sobre la Quebrada la Charrera. En el extremo norte de la falla sólo se observan indicios morfotectónicos desarrollados en rocas del Jurásico y Cretáceo.

5.2.2 Falla de la Plata

Pertenece al Sistema de Fallas de Chusma - La Plata. Localizada en el Departamentos, Huila sobre la margen occidental del Valle Superior del Magdalena, en la zona del Municipio de la Plata, va desde el Páramo de Cutanga hasta el municipio de Aipe. Tiene una extensión 300 km, con un total de tramos activos de 85 km.

Su actitud es: N 30 – 45 °E / 66 – 80 º W Azimut: 30º, con un buzamiento al NW. Está falla es de tipo inversa (Montes, N, Sandoval, A., Vergara H. Paris, G., Romero, J., Wagner, J, J., 1989), definida como de rumbo sinestral (INGETEC-CIMELEC-SINCO ,1997). Se considera activa. Fue definida por INGEOMINAS (Montes, N, Sandoval, A., Vergara H. Paris, G., Romero, J., Wagner, J.J.,1989; INGETEC-CIMELEC-SINCO ,1997).

La falla pone en contacto rocas Jurásicas, Cretácicas y Terciarias del bloque SE con rocas del Macizo de la Plata del bloque NW. Dentro de las trazas de la falla se encuentran situados conos volcánicos Cuaternarios generadores de rocas basálticas.

Existen por lo menos tres trazas a lo largo del Valle del Río la Plata. En la margen izquierda la que pone en contacto la formación Gualanday con el Macizo de la Plata, una traza que afecta los depósitos cuaternarios y en la margen derecha una traza que afecta algunos conos aluviales.

Asociado a la traza de falla que afecta los depósitos Cuaternarios, se presenta un escarpe sinuoso nítido, en una longitud de 12 km. La Falla de La Plata parece controlar por 10 km el río del mismo nombre, deflectando su curso en algunos trayectos. Se encuentra el cono volcánico del Pensil alineado a su traza y se observan depósitos fluvio lacustres

aparentemente truncados por la falla. Algunas expresiones geomorfológicas de actividad encontradas son los escarpes de falla, facetas triangulares, contraescarpes, silleta de falla, entre otras.

5.3 GEOLOGÍA LOCAL

Para el desarrollo del estudio, se llevó a cabo el levantamiento cartográfico de las unidades geológicas superficiales (rocas y suelos) presentes en el área de investigación, al igual que los elementos geomorfológicos, y procesos morfodinámicos, los cuales fueron procesados, analizados y presentados a una escala de utilidad para los análisis geotécnicos (escala 1: 2000) y su caracterización correspondiente.

5.3.1 Caracterización de las Unidades Geológicas de Ingeniería

Se caracterizaron y cartografiaron las Unidades Geológicas Superficiales a escala detallada, según las condiciones físico-mecánicas de los suelos en diferentes sitios, siguiendo la metodología y nomenclatura del INGEOMINAS (2007).

Las Unidades Geológicas Superficiales corresponden a un conjunto de materiales que incluyen suelos y rocas, cuyas propiedades se conservan por debajo de la superficie hasta algunas decenas de metros. Las UGS se utilizan como herramienta para evaluar el comportamiento mecánico de los terrenos ante diferentes usos, como desarrollo de obras de infraestructura, desarrollos mineros y demás usos definidos en los planes de ordenamiento territorial.

5.3.2 Factores considerados para caracterizar las Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

En la cartografía geológica para ingeniería, la clasificación de rocas y suelos está basada en las propiedades físicas de dichos materiales en su estado actual, dependiendo de la combinación de factores como el origen, la diagénesis, la historia tectónica, el metamorfismo y los procesos de meteorización, los cuales gobiernan el comportamiento mecánico de dichos materiales (resistencia, deformabilidad, durabilidad, y permeabilidad, entre otros). Para la descripción y caracterización de las unidades geológicas superficiales, se tienen en cuenta cinco parámetros fundamentales: Litología (composición y textura), dureza o resistencia, condición de las discontinuidades, grado de meteorización y rasgos estructurales. Estas características se obtienen mediante la descripción de perfiles de afloramientos rocosos, exploración del subsuelo, muestreo de suelos y rocas, ensayos in situ y análisis de laboratorio, debido a las condiciones que se presentaron en el área de estudio algunas de estas características se restringen para el análisis y resultados a presentar.

La International Asociation of Engineering Geology (IAEG) recomienda usar propiedades geológicas que de alguna manera indican las características geológicas de ingeniería, como las que se relacionan a continuación:

5.3.2.1 Litología

Características de textura y estructura tales como la distribución del tamaño de las partículas, su correlación con el peso unitario y la porosidad.

Contenido de humedad, humedad de saturación, consistencia, diaclasamiento, alteración y grado de meteorización.

Composición mineralógica, la cual está estrechamente relacionada con el peso específico, los límites de Atterberg y el índice de plasticidad.

5.3.2.2 Grado de Meteorización

Es uno de los aspectos que juega un papel importante en la caracterización de las unidades superficiales, se define como la descomposición física y química In situ de los materiales cercanos a la superficie de la tierra. Influye en la formación de los suelos residuales, estabilidad de las laderas y en la acción de los procesos erosivos, al igual que sobre las propiedades físico–mecánicas de las rocas tales como densidad, esfuerzo a la comprensión inconfinada, esfuerzo a la tensión inconfinada, porosidad, permeabilidad, deformabilidad y consistencia. Para definir el grado de meteorización de las rocas se utilizaron los perfiles generalizados de Deere y Patton (1971) y Dearman (1974, 1991).

5.3.2.3 Grado de fracturamiento o discontinuidades:

Se definen como planos o fracturas de origen mecánico o sedimentario que independizan o separan bloques de roca. En la Tabla 2, se muestra una de las clasificaciones del grado de fracturamiento tenida en cuenta en el estudio de las discontinuidades.

Tabla 2. Condición de fracturamiento de las rocas.

INTERVALO DE SEPARACION (espaciamiento)*	> 2 m (mayor de 200 cm)	60 - 200 cms	20 - 60 cm	6 - 20 cm	< 6 cm (menor de 6 cm)
CLASIFICACION (Grado de fracturación)	MASIVA	POCO FRACTURADA	FRACTURADA	MUY FRACTURADA	FRAGMENTADA o TRITURADA
CARACTERISTICAS	Discontinuidades bastante espaciadas (mayor de 2 m)	Fracturas regularmente espaciadas a ampliamente espaciadas	Frcturas próximas o moderadamente espaciadas	Fracturas muy próximas o estrechamente espaciadas. Las rocas se separan en bloques tabulares	La roca se presenta triturada, astillosa y se separan en lajas con facilidad

Fuente: Según Bieniawsky (1979), Dearman (1991) y Medina (1991)

De acuerdo con los factores considerados para caracterizar las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) (según su origen, litología, grado de meteorización, y grado de fracturamiento o discontinuidades en roca, entre otros aspectos), en el sitio estudiado las UGS se dividieron en:

5.3.3 Unidades de Suelos

- Transportado (St)

Para la clasificación de estas unidades se tomó como base la clasificación genética utilizada por el INGEOMINAS (2007) (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación genética de las unidades de suelo

Tipo	Origen	Nombre de los depósitos
Residual	In situ	Suelo Laterítico y Suelo Saprolítico
Transportado	De Ladera	De gravedad: depósitos coluviales y flujos de tierra
	Aluvial – Fluvio torrencial	Aluviones en el lecho o fuera de él (Llanura de Inundación, Barras, Terrazas, Abanicos, Deltas)
	Glaciares	Fluvioglaciares
	Antrópico	Materiales diversos, naturales o no (Rellenos sanitarios, presas, escombreras y rellenos de disposición)

Fuente: Modificado de Montero (2001)

De acuerdo con la Tabla 3, en el sector estudiado, se presentan según la clasificación del INGEOMINAS 2007, en la zona estudiada:

5.3.3.1 Suelo transportado, aluvial reciente, Stfal2

Corresponde a intercalaciones de lentes de: arenas, arcillas, limos, y niveles de gravas, asociados a la dinámica del río la Plata, de las quebradas que drenan en el sector del casco urbano del Municipio de la Plata, y en proporciones diferentes. Entre las quebradas se destacan: El Remolino, Los Muertos, Quiebramuelas, Zapatero, Guamito, Cuchayaco, Muceñas o Azufrada, e intercalaciones de lentes de arenas, limos, asociados a la actividad fluvial del canal de Bellavista.

Entre las quebradas, los depósitos asociados a la quebrada Zapatero, presentan la mayor concentración de bloques y de mayor tamaño.

5.3.3.2 Suelo transportado, abanico aluvio torrencial subreciente, Staft

Corresponde a un depósito de origen fluvio – torrencial, que contiene intercalación e interdigitación de bloques heterométricos de composición ígnea, con arenas y arcillas, provenientes de la meteorización de rocas ígneas.

Este material se encuentra localizado sobre la margen izquierda el río La Plata, y su origen se haya asociado a eventos torrenciales asociados principalmente a la quebrada Zapatero. La parte superior de este material se encuentra muy meteorizada, tanto los bloques como la matriz (Ilustración 7).

Los ondeos mecánicos S01 y S02, dieron rechazo en este material aproximadamente a los 6 metros, quedando colgados en este material S01 a los 15 metros y S02 a los 10 metros). El sondeo S03, reporta aproximadamente 12 metros de este material, y le infrayace un material meteorizado de arcillolitas laminadas de la Formación Seca.



Ilustración 7. Coordenadas: E= 1130940, N= 755804, altura= 1050 m, detalle. Abanico fluvio torrencial expuesto en talud
Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017

5.3.4 Unidad de Roca

5.3.4.1 Roca blanda, Formación Seca, Rb-K2E1s

En curva casi que a 90° del cauce del río la Plata, y sobre su margen izquierda, se observa ene escarpe una serie de intercalaciones de capas medias de limos arcillosos, de color

negro, café y gris verdoso, que intercalan con láminas gruesas de areniscas arcillosas (Ilustración 8).

Este material, soporta constantemente el embate constante de las aguas del cauce del río la Plata, siendo un material caracterizado con una gran competencia ante este evento de socavación lateral.

En el sector donde afloran, presentan una disposición casi que horizontal, y ligeramente al norte se pliegan.

La perforación S03, reporta a partir de los 12 metros, arcillolitas laminadas, de color algo rojizo, infrayacidas por material de abanico fluvio – torrencial. La línea de refracción sísmica LRS04, reporta valores de Vs para este material del orden de 663 m/s (a partir de los 20 metros de profundidad).



Ilustración 8. Coordenadas: E= 1132366, N= 756779, altura= 1012 m, detalle. Arcillolitas de la Formación Seca
Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017

A partir de la visita de campo y el registro fotográfico que se resume en las siguientes imágenes se observa afloramiento rocoso de la Formación Seca en las márgenes del cauce de La Quebrada Los Muertos en el municipio de La Plata.



Ilustración 9. Roca aflorante en La Quebrada Los Muertos del casco urbano de La Plata
Fuente: Girmava, 2022

A continuación, en la Tabla 4 se resumen las características principales de las unidades geológicas para ingeniería presentes en el área.

Tabla 4. Descripción de las unidades Geológicas para Ingeniería, UGI, en la zona de estudio

Periodo / época	Símbolo UGI	Unidad UGI	Características
Cuaternario	Stfal2	Suelo transportado, aluvial reciente	Correlaciona con la unidad geológica de Depósito aluvial reciente (Q2al). Corresponde a intercalaciones de lentes de: arenas, arcillas, limos, y niveles de gravas, asociados a la dinámica del río la Plata y de las quebradas que drenan en el sector del casco urbano del Municipio de la Plata, y en proporciones diferentes. Entre las quebradas se destacan: El Remolino, Los Muertos, Quiebramuelas, Zapatero, Guamito, Cuchayaco, Muceñas o Azufrada, e intercalaciones de lentes de arenas, limos, asociados a la actividad fluvial del canal de Bellavista.
	Staft	Suelo transportado, abanico aluvio torrencial subreciente	Correlaciona con la unidad geológica de Depósito de abanico fluvio - torrencial (Q1aft). Corresponde a un depósito de origen fluvio – torrencial, que contiene intercalación e interdigitación de bloques heterométricos de composición ígnea, con arenas y arcillas, provenientes de la meteorización de rocas ígneas. Este material se encuentra localizado sobre la margen izquierda el río La Plata, y su origen se haya asociado a eventos torrenciales asociados principalmente a la quebrada Zapatero.
Paleógeno	Rb-K2E1s	Roca blanda, Formación Seca	Correlaciona con la unidad geológica de Formación Seca (K2E1s). En curva casi que a 90° del cauce del río la Plata, y sobre su margen izquierda, se observa en el escarpe una serie de intercalaciones de capas medias de limos arcillosos, de color negro, café y gris verdoso, que intercalan con láminas gruesas de areniscas arcillosas. Este material, soporta constantemente el embate constante de las aguas del cauce del río la Plata,

Periodo / época	Símbolo UGI	Unidad UGI	Características
			siendo un material caracterizado con una gran competencia ante este evento de socavación lateral.

A continuación, en la Ilustración 10 se presenta el mapa geológico de unidades para ingeniería del área de estudio.



Ilustración 10. Mapas de Unidades Geológicas para Ingeniería
Fuente: modificado de Estudio AVR municipio La Plata, 2017

5.4 MORFODINÁMICA

A continuación, se describen los principales tipos de procesos erosivos y de remoción en masa, observados y/o con alta posibilidad de ocurrencia en el casco urbano, de acuerdo con lo presentado en el estudio de AVR del municipio La Plata.

Es de recordar que los procesos erosivos, si no son mitigados a tiempo, pueden favorecer la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa (FRM). La probabilidad de ocurrencia de estos FRM, constituyen amenazas que al materializarse pueden generar riesgo para la infraestructura y/o población del casco urbano del Municipio de La Plata.

5.4.1 Procesos de erosión

En la región estudiada se presentan dos tipos de erosión, una que es producto de la acción natural combinada, de diferentes agentes atmosféricos y geológicos sobre el paisaje, que provoca el desgaste natural de la superficie del suelo, la modelación del relieve, la meteorización de las rocas y la formación de suelos; y la erosión provocada por la intervención antrópica sobre la naturaleza, por medio de la tala de bosques, las quemas, la construcción de vías de comunicación y la utilización de sistemas de explotación agropecuarios inadecuados entre otros, que ha resultado en la ruptura del equilibrio entre el suelo, la vegetación, el agua y el viento (Bahamon y Gaitán, 1.981).

5.4.1.1 Procesos de erosión, tipo socavación lateral

Este tipo de erosión se produce cuando en épocas de lluvias, el aumento de los caudales de corrientes de agua como ríos y quebradas trae como consecuencia el aumento en la capacidad de carga y poder erosivo de las corrientes, dando lugar al socavamiento lateral de los cauces o a la profundización de estos (socavación de fondo), que puede llegar a desestabilizar los taludes aledaños.

Es importante anotar que el socavamiento lateral del cauce se da en corrientes sinuosas o meándricas, típicas del piedemonte y el sector de bajo gradiente de estas cerca de su nivel base de erosión. Este tipo de erosión excava la parte inferior de los escarpes o taludes de las márgenes de los cauces, específicamente hacia el costado convexo en los cambios de dirección del cauce

Las corrientes de alta montaña, de cauces siempre más rectos e incisados, rara vez presentan socavamiento lateral; en cambio la ganancia en la capacidad de carga y poder erosivo de la corriente se invierte en la profundización de su canal, que puede llegar a desestabilizar las márgenes de las corrientes por falta de soporte, provocando remociones en masa hacia las mismas.

Todas las corrientes de agua dentro del casco urbano de la Plata son altamente susceptibles a desarrollar procesos de socavación lateral y de fondo. Actualmente existen dos (2) sectores con desarrollo de procesos de socavación lateral, ambos generados sobre la margen izquierda del río la Plata:

-El primero, en cercanías del hospital, donde existe socavación sobre la margen izquierda, y que afecta roas de la Formación la Seca; este punto es vulnerable ya que actúa sobre una loma donde afloran arcillolitas de la Formación Seca; de continuar el proceso, el cauce del río la Plata puede inundar el cauce de la quebrada los Muertos (

Ilustración 11).

-Un segundo punto, aguas arriba de la confluencia de la quebrada Zapatero, unos 400 metros, y sobre la margen izquierda, donde al finalizar curva del río se produce el proceso (Ver Ilustración 12).

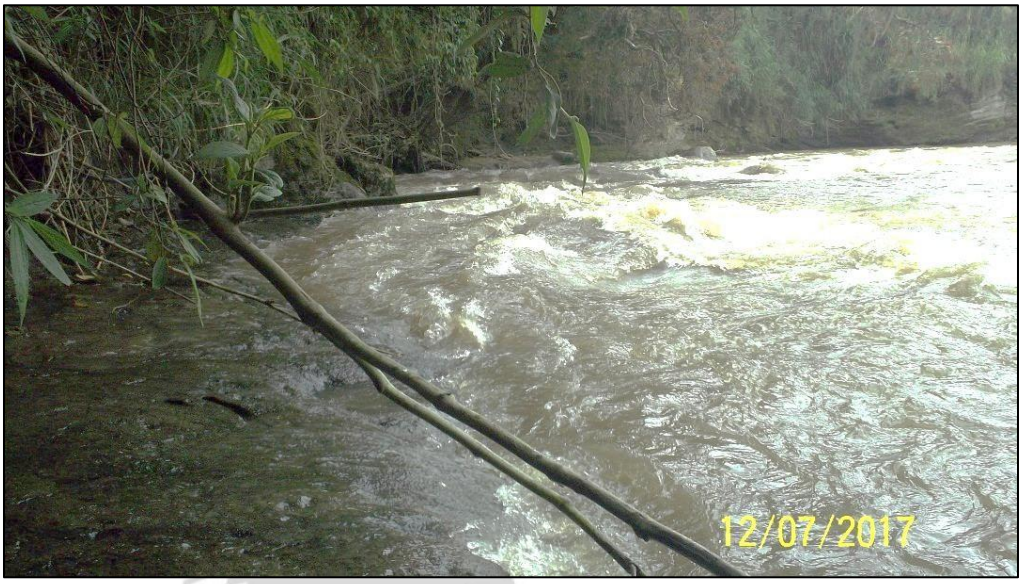


Ilustración 11. Coordenadas: E= 1132366, N= 756779, altura= 1012 m, orientación al nororiente. Procesos de socavación lateral sobre arcillolitas de la Formación Seca
Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017



Ilustración 12. Coordenadas: E= 1132254, N= 755922, orientación al suroccidente. Procesos de socavación lateral, que fueron minimizados con la construcción de un muro; se observa muro de gaviones colapsados por este proceso
Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017

6 CAMPAÑA DE EXPLORACIÓN

Con el fin de analizar el suelo de fundación del área aferente a la Quebrada Los Muertos en el tramo de estudio y determinar las características y propiedades mecánicas del subsuelo, se tomaron como referencia los sondeos más próximos a la zona, ejecutados durante la realización del Estudio del AVR del municipio de La Plata: SM-2 y SM-3 de 10.0 y 15.0m de profundidad respectivamente; complementado con una línea de refracción sísmica: LRS-03 de 82 m de longitud. La localización de la exploración se muestra en la Ilustración 13.

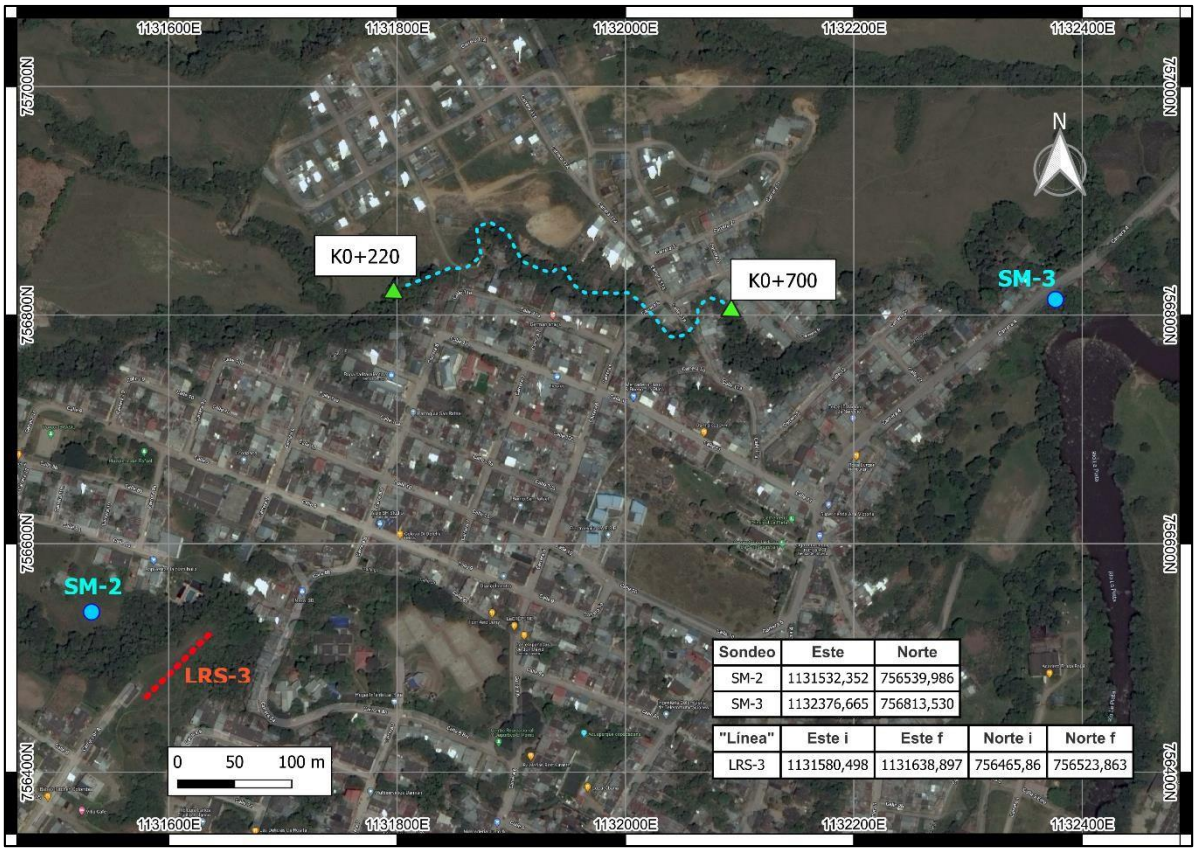


Ilustración 13. Localización de la exploración subsuelo
Fuente: Girmava, 2022

6.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

La exploración se ejecuta con el fin de caracterizar la zona para el diseño geotécnico de las estructuras de protección del cauce proyectadas para el tramo de estudio de la Quebrada Los Muertos, las perforaciones ejecutadas se realizaron de carácter mecánico, con profundidad máxima de 15.0 m, de manera tal que se caractericen los materiales que rigen el comportamiento del suelo de fundación.

Debido a la naturaleza de las muestras extraídas, en los materiales dominantemente granulares, se utilizaron correlaciones para determinar la envolvente de resistencia a partir del ensayo de campo SPT, por lo menos para las muestras de suelo superficial en las que fue posible ejecutar el ensayo SPT.

6.2 EXPLORACIÓN DIRECTA

- Suelos finos y granulares

Para la caracterización visual en materiales arcillosos o limosos se debe intentar, en primera instancia, tomar muestras con tubo de pared delgada tipo Shelby. Si esto no es posible por la dureza del material, se intentará, en segunda instancia, tomar muestras con la cuchara partida y se realizarán ensayos de penetración estándar cada 0.5 m.

En suelos granulares tales como arenas y gravas se deben ejecutar, también cada 0.5 m, ensayos de penetración estándar y siguiendo en general los procedimientos establecidos en la norma ASTM D1586 (Ensayo de Penetración Estándar y Muestreo de Suelos con Cuchara Partida). En caso de encontrar gravas de tamaño tal que no permitan el paso del muestreador (se presenta rechazo durante el procedimiento de hincado, éste se retira y se utiliza una barrena de doble tubo, con diámetro HQ, para perforar hasta una longitud tal que permita el avance posterior de la prueba. Una vez superado el obstáculo, se retira la barrena de la sarta de perforación, se ensambla el muestreador y se continúa ejecutando el ensayo de penetración estándar. En el caso de encontrarse suelos finos, se tomarán muestras con tubo Shelby.

- Descripción de suelos

Para la descripción de suelos es indispensable identificar el componente principal para determinar si es un suelo fino (cohesivo) o granular, y dependiendo de esto se determinan las características que se deben incluir en la descripción, aplicando la norma INV-E-102-13.

Para suelos finos (cohesivos), se deben describir las siguientes características y en el siguiente orden: componente principal, el término de proporción del componente secundario (con trazas de, con un poco de, con algo de, y o con) de acuerdo con el porcentaje, color de la muestra, humedad, plasticidad y consistencia.

Para suelos granulares se describen las siguientes características y en el siguiente orden: componente principal (arena o grava), tamaño del componente principal, término de proporción del componente secundario (con trazas de, con un poco de, con algo de, y o con), color, densidad y humedad.

Para evaluar la consistencia o la densidad dependiendo del caso que se presente con base en el resultado de N de ensayo de penetración estándar se debe tomar como referencia la Tabla 5.

Tabla 5. Descripción de consistencia para suelos cohesivos.

CONSISTENCIA (Suelos cohesivos)	
N (SPT) Golpes/pie	Descripción
0-2	Muy blanda
2-4	Blanda
4-8	Medio firme
8-15	Firme
15-30	Muy firme
30-45	Dura
>45	Muy dura

Fuente: Hunty, 1984

Tabla 6. Descripción de densidad para suelos granulares.

DENSIDAD (Suelos granulares)	
N (SPT) Golpes/pie	Descripción
0-2	Muy suelta
2-4	Suelta
4-8	Medio suelta
8-15	Medio densa
15-30	Densa
30-45	Muy densa

Fuente: NAVFAC DM-7.1, 1986

- Rotulado de muestras

Las muestras recobradas deberán protegerse contra la pérdida de humedad utilizando papel aluminio y vinipel, transportarse y almacenarse adecuadamente para evitar cualquier tipo de alteración y ser transportados al sitio de almacenamiento que el cliente indique. Estas muestras al ser empacadas deben ser rotuladas en un formato que contenga la siguiente información:

- Nombre y número del proyecto
- Número y ubicación del sondeo
- Fecha de realización del sondeo
- Profundidad de extracción de la muestra
- Observaciones relevantes de ser necesario

6.2.1 Actividades de Campo

Para el programa de exploración se ejecutaron dos sondeos mecánicos según la topografía de la zona. El registro estratigráfico de campo para las perforaciones se encuentra en el Anexo 2. La ubicación de los sondeos ejecutados durante la campaña de exploración se resume en la Tabla 7, y se puede observar su localización a detalle en el Anexo 1.

Tabla 7. Localización de la exploración del subsuelo

NOM	COORDENADAS		PROF. (m)
	N	E	
SM-02	756539.986	1131532.352	10.00
SM-03	756813.530	1132376.665	15.00

Fuente: Girmava, 2022

6.2.2 Registro Fotográfico

En la Ilustración 14 se presentan algunas de las fotografías del registro fotográfico recopilado durante los trabajos de campo de exploración.

El catálogo de fotografías que registra detalles de las actividades realizadas para la obtención de las diferentes muestras a partir de los apiques convencionales durante la campaña de exploración del subsuelo se encuentra en el Anexo 3 del presente documento.





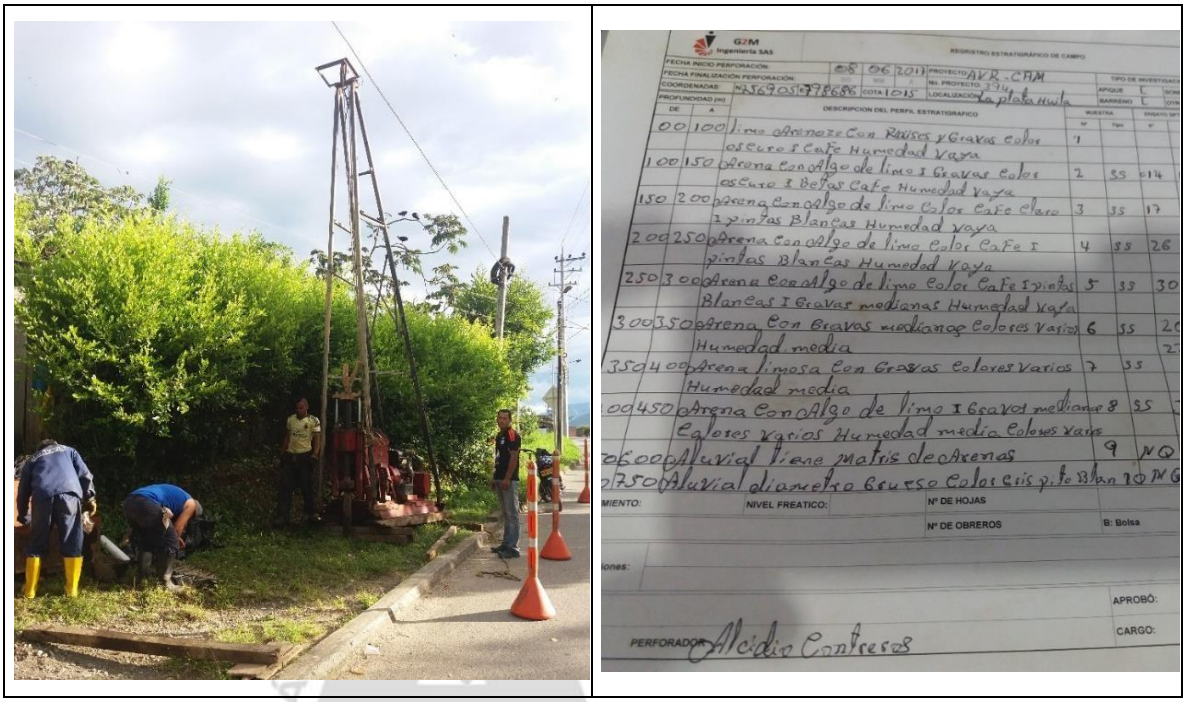


Ilustración 14. Fotografías de las actividades realizadas de la exploración directa
Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017

6.2.3 Registro Estratigráfico

A través del análisis de los resultados obtenidos durante la etapa de exploración se recopilan los registros estratigráficos detallados para cada uno de los apiques realizados. Donde se relacionan los métodos de logeo y la ubicación de las respectivas muestras a lo largo del perfil estratigráfico definido. Además, de las características físicas y geotécnicas de los diferentes materiales que conforman la columna.

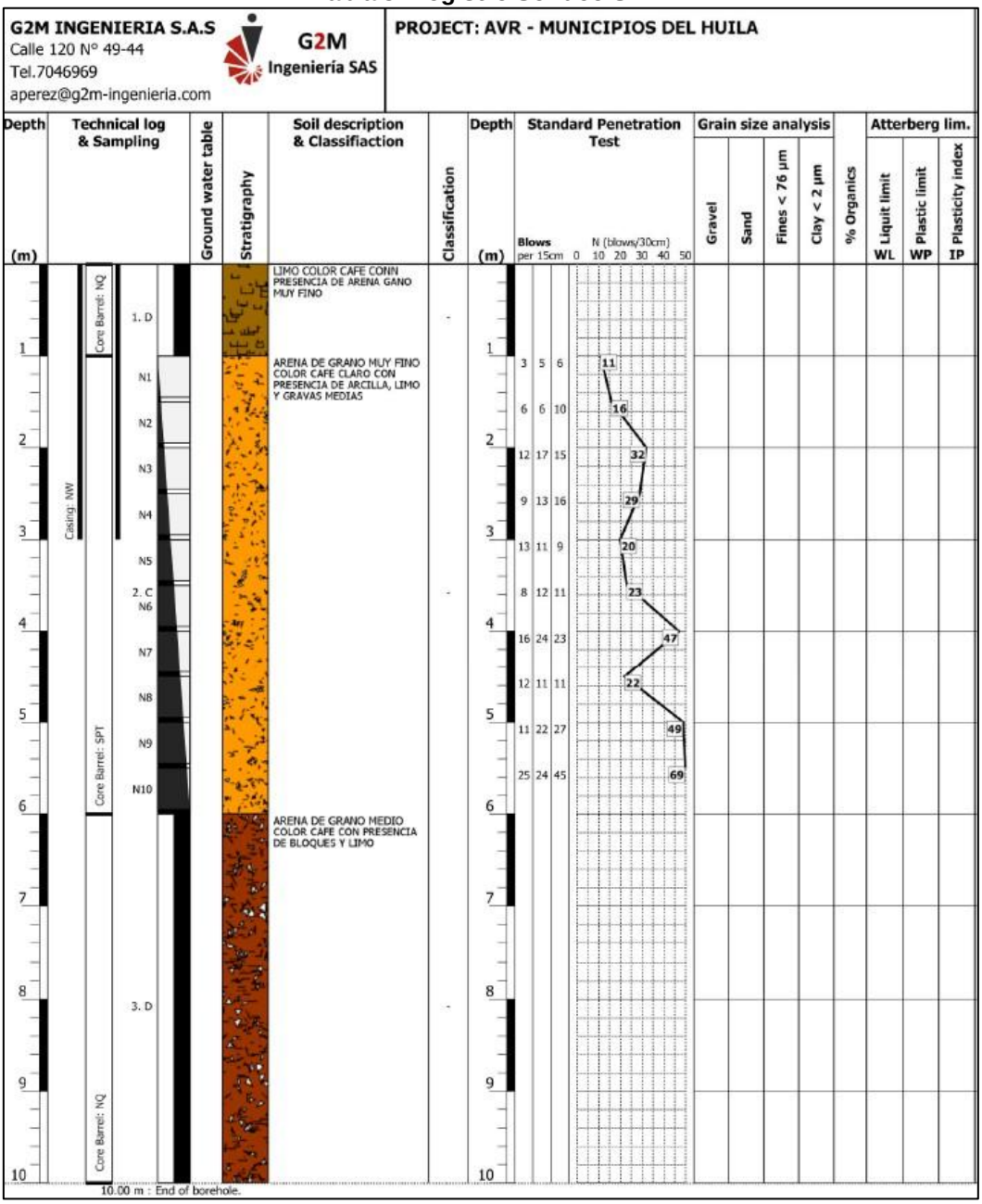
Los formatos que se emplean deben ser avalados por el geotecnista o coordinador del proyecto. Este es un registro físico que se elabora simultáneamente con la ejecución del sondeo. Estos registros estratigráficos se relacionan en el Anexo 2 del presente documento.

En el registro del sondeo se debe considerar la siguiente información:

- Nombre, número y localización del proyecto
- Número del sondeo
- Fecha de inicio y fin de la ejecución del sondeo
- Coordenadas de ubicación y cotas inicial y final del sondeo
- Profundidad total del sondeo
- Sistema de perforación y tipo de investigación del suelo
- Profundidad y descripción de la litología encontrada a lo largo de la perforación indicando los cambios estratigráficos

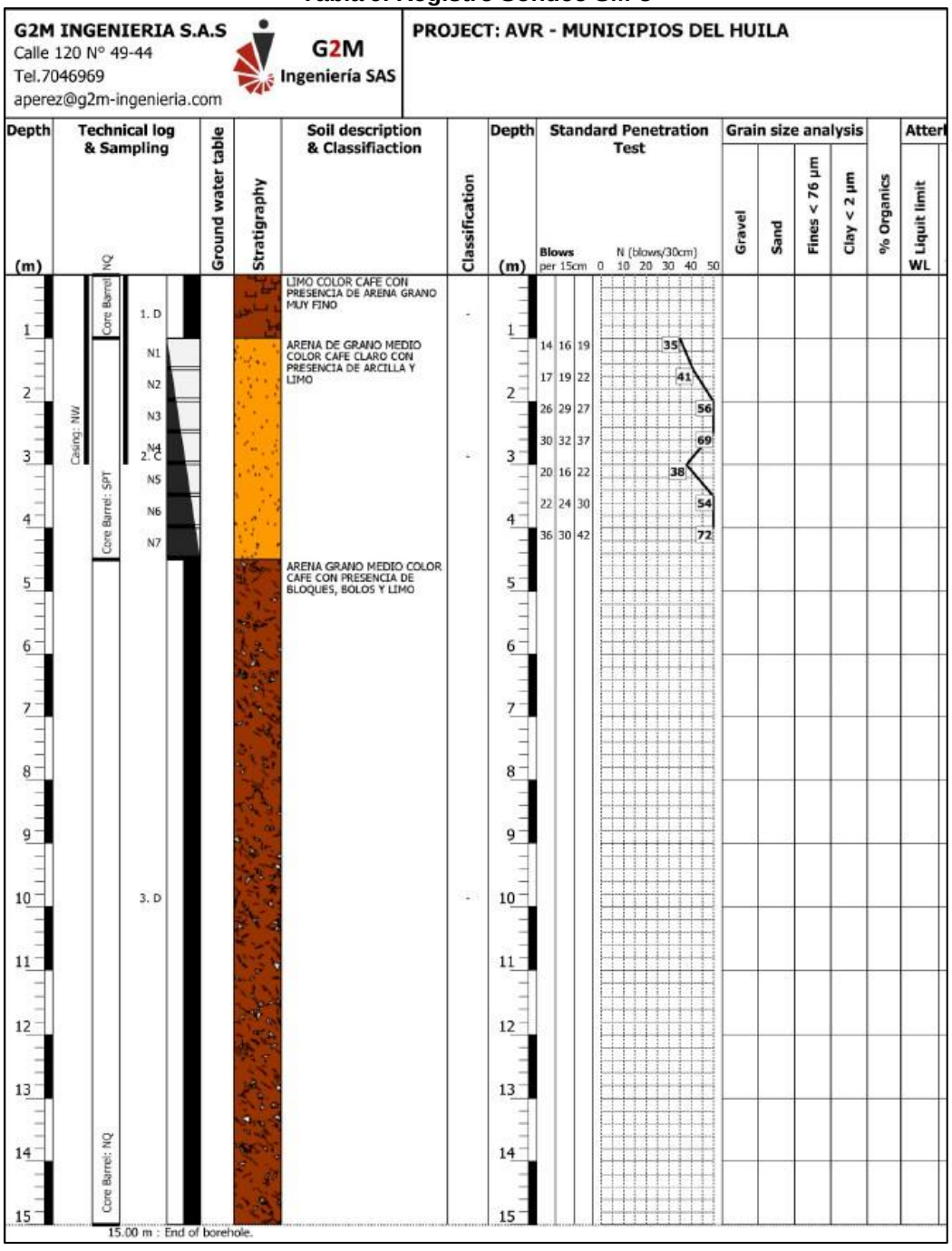
- Tipo y consecutivo de muestra tomadas
- Nivel freático encontrado
- Nombre del ingeniero de campo y del perforador
- Observaciones de algunos eventos tales como pérdidas de lodos de perforación, cambios importantes en la velocidad de rotación del equipo de perforación, etc.

Tabla 8. Registro Sondeo SM-2



Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017

Tabla 9. Registro Sondeo SM-3



Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017

6.3 EXPLORACIÓN INDIRECTA

La refracción sísmica es una técnica geofísica, que se utiliza en la ingeniería civil y geotecnia, este método indirecto, consiste en estudiar la propagación de ondas sísmicas en el subsuelo, las cuales se generan con una fuente de energía externa, esta fuente de energía se produce con ayuda de explosivos, un martillo grande (porra o mazo) o un generador de ondas elásticas. El ensayo consiste en registrar los tiempos de viaje de las ondas producidas hasta los geófonos superficiales, los cuales se instalan en una línea recta y se registra utilizando un sismógrafo. Una onda sísmica atraviesa una interfaz entre dos medios, donde se contrasta la impedancia acústica, parte de esta energía se refleja y permanece en el mismo medio que la energía incidente, la energía restante se refracta con un cambio de ángulo en su dirección de propagación. Este cambio en la dirección puede ser explicada con la Ley de Snell.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2}$$

En la ecuación 1, se muestra lo siguiente, i es el ángulo de incidencia y r es el ángulo de refracción, $v1$, $v2$ son las velocidades del medio superior y medio inferior respectivamente. La Ilustración 15 ilustra el esquema de refracción y propagación de ondas en el subsuelo según su trayectoria.

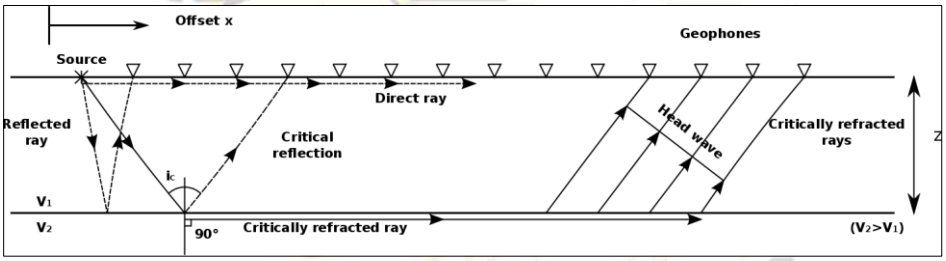


Ilustración 15. Esquema de una refracción sísmica, se observan la dirección de los rayos directos, reflejados y refractados.
Fuente: Reynolds, 2011

Con la información recogida en campo se puede calcular la distribución de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el plano vertical que pasa por la línea de medición y este dato se correlaciona con el terreno, este método permite obtener una caracterización del perfil del suelo de la zona de estudio. Este ensayo puede tener ciertas limitaciones, entre las que se destacan:

- Algunos tipos de roca o suelos pueden tener velocidades de propagación semejante, por lo cual se debe tener en cuenta la información geológica o geotécnica disponible.
- La distancia y el arreglo de los geófonos tienen implicaciones en la precisión con la que se puede evaluar el espesor de los estratos.

La refracción sísmica se presenta, para cada línea, en dos perfiles llamados modelo simplificado y tomografía, los cuales corresponden a los métodos de interpretación conocidos como “Tiempos Interceptados” y “Tomografías Sísmica” respectivamente. Ambos perfiles representan velocidades compresionales (Vp).

El modelo simplificado es un modelo sencillo, general, de dos a cuatro capas que muestra los conjuntos principales de capas del subsuelo, caracterizados por su velocidad compresional (Vp) y sus espesores, producto de interpretar con el método de tiempos interceptados.

La tomografía sísmica es un método de cálculo que permite modelar el subsuelo con elementos finitos reproduciendo las trayectorias de los frentes de onda desde y hacia cada punto de disparo y desde y hacia cada uno de los geófonos. El resultado es un modelo detallado del subsuelo en 10 o más capas que muestran la variación de la velocidad compresional con la profundidad, muy útil para definir el contacto con roca con base en el aumento de la velocidad.

La ripabilidad o excavabilidad de un suelo representa una medida del grado de dificultad que se presenta al excavar el terreno mediante la rotura con un tractor o bulldozer que permite su excavación o carga directa.

Un material puede ser clasificado como ripable, ripable marginalmente o no ripable, dependiendo de la capacidad de los equipos convencionales para excavarle. Son varios los criterios que se han venido utilizando para juzgar a priori la ripabilidad de un terreno, el más utilizado consiste en determinar la velocidad sísmica de propagación de las ondas de compresión Vp a través del suelo mediante la sísmica de refracción.

Las posibilidades de ripado se definen, para diversos tipos de suelos densos, por medio de su velocidad sísmica Vp. Para cada material se definen los márgenes de velocidad sísmica para los cuales es ripable o no ripable.

En este caso la ripabilidad se determina de acuerdo al criterio presentado en la Tabla 10 :

Tabla 10. Clasificación ripabilidad del suelo en función de la velocidad de las ondas de compresión

Velocidad de las ondas de compresión	Categoría
Vp<600 m/s	Materiales sueltos
Vp=600 - 1300 m/s	Ripado fácil
Vp=1300 - 1700 m/s	Ripado normal

Velocidad de las ondas de compresión	Categoría
Vp=1700 - 1850 m/s	Ripado duro
Vp> 1850 m/s	No son ripables

6.3.1 Localización línea de refracción sísmica

Cerca de la zona de estudio se realizó una línea de refracción sísmica: la línea LRS-03 con espaciamiento entre geófonos de 5 metros. En la Ilustración 16 se muestra la ubicación de la línea de refracción sísmica realizada.



Ilustración 16. Ubicación de la línea sísmica MASW 3
Fuente: Girmava, 2022

La Tabla 11 presenta las coordenadas MAGNA-SIRGAS Origen Nacional, de inicio y fin de la línea sísmica MASW.

Tabla 11. Coordenadas y longitudes de la línea sísmica MASW

ID Línea		MAGNA-SIRGAS Origen Nacional 3115	
		ESTE (m)	NORTE (m)
LRS-3	Inicio	1131580.4976	756465.8595
	Fin	1131638.8971	756523.8634

Fuente: Girmava, 2022

6.3.2 Metodología de Adquisición

6.3.2.1 Adquisición de sísmica de MASW

La metodología para la adquisición de datos para la técnica de ondas superficiales con el método Análisis Mutil-Espectral de Onda Superficial de siglas en inglés MASW, se realiza de manera similar a la técnica de refracción sísmica que consiste en un tendido a lo largo de una línea disponiendo una serie de geófonos a una distancia definida de acuerdo con la longitud de la línea, 24 Geófonos de 4.5 Hz espaciados de 3 m o 4 m entre sí. Para el caso de la técnica MASW se generan energizaciones (disparos o impactos del martillo) en diferentes puntos de la línea para cada punto de energización se registran las ondas generadas en cada uno de los geófonos en un sismógrafo multicanal en un tiempo tal que se pueda registrar las ondas de superficie en su totalidad esto es mayor a 0.5 seg.

6.3.2.2 Equipos de Trabajo para sísmica MASW

A continuación, se nombran los principales se equipos utilizados en campo:

- Sismógrafo Geode Seismic de Geometrics Co.
- Almádana de 20 libras.
- 2 rollos de cable con 12 canales cada uno.
- 24 geófonos para adquirir andas P.
- 24 geófonos para adquirir ondas S.
- Batería de 12 Voltios.
- Computador portátil.
- GPS Garmin etrex Venture HC. MASW Seimex24

6.3.2.3 Registro Fotográfico

En la Ilustración 17 se presentan algunas de las fotografías del registro fotográfico recopilado durante los trabajos de campo de exploración indirecta.





Ilustración 17. Fotografías de las actividades realizadas de la exploración indirecta
Fuente: Estudio AVR municipio La Plata, 2017

7 ENSAYOS DE LABORATORIO

De las muestras recuperadas durante la etapa de exploración del subsuelo, se seleccionaron algunas muestras representativas de los materiales identificados, y sobre estas, se realizaron ensayos de laboratorio enfocados a la caracterización de estos materiales (propiedad índice, granulometría, propiedades mecánicas).

7.1 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

7.1.1 Parámetros de resistencia al corte a partir del SPT

Durante la exploración se llevaron a cabo ensayos in-situ de penetración estándar (SPT), con el objetivo de: a) identificar los cambios estratigráficos; b) extraer muestras para su posterior análisis en laboratorio; c) proveer herramientas para la deducción del soporte; d) identificar la constitución física del perfil; y d) obtener información base para el cálculo por correlaciones de los parámetros de resistencia al corte.

El SPT consistió en contar el número de golpes necesarios para que se introduzca a una determinada profundidad una cuchara (cilíndrica y hueca) muy robusta (diámetro exterior de 51 milímetros e interior de 35 milímetros, lo que supone una relación de áreas superior a 100), que permite tomar una muestra en su interior (parcialmente alterada). El peso de la masa está normalizado, así como la altura de caída libre, siendo de 63.5 kilopondios y 76 centímetros respectivamente. La relación de energía promedio aplicada, se corrige de acuerdo con la siguiente expresión:

$$N'_i = C_N * N * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4$$

En donde:

- N'_i : Número de golpes corregido para un determinado nivel de transmisión de energía
- C_N : Factor de ajuste para tener en cuenta el esfuerzo geostático, $\sigma'v$. Se evaluó con base en las propuestas de Peck, Seed, Meyerhoff-Ishihara, Liao-Whitman, Skempton, Sedd-Isdriss, Schmertmann y González, cuidando siempre que este factor no resultara mayor que 2. Estos valores posteriormente se promediaron
- η_1 : Factor de corrección por eficiencia de energía transmitida del martillo al varillaje y al tomar muestras. Se obtiene como la relación entre las eficiencias medias de cada país así, para Japón la eficiencia es del 72%, para USA del 60% y para Colombia del orden de 45%.

- η_2 : Factor de corrección por longitud del varillaje.

η_3 : Factor de corrección por presencia de revestimiento. Debido a que no se utilizó revestimiento, el factor de corrección es 1.0.

η_4 : Factor de corrección por diámetro de la perforación. Los diámetros de las perforaciones fueron inferiores a 12 cm, por lo cual el factor de corrección es 1.0

Con el fin de estimar los valores del ángulo de fricción equivalente, ϕ_{eq}, se promediaron los resultados obtenidos de las siguientes expresiones (véase la siguiente Tabla).

Tabla 12. Expresiones para correlacionar el ángulo de fricción a partir del SPT

Kishida	$\phi = 15 + \sqrt{(20*N72)}$
JRB	$\phi = 15 + \sqrt{(15*N72)}$
Shiou & Fukui	$\phi = 27 + 0.36 * N72$
JNR	$\phi = 27 + 0.30 * N72$

Para terminar, se estiman los parámetros c' y ϕ' por tipo de material a partir de la propuesta de González, A.J. (1999) que consiste en graficar puntos (σ_v', τ) en planos Mohr-Coulomb donde los coeficientes de una regresión lineal representan los parámetros geomecánicos efectivos buscados. El esfuerzo efectivo vertical se calcula como la diferencia entre el esfuerzo geostático total y la presión de poros y, el esfuerzo cortante a la profundidad del ensayo, se obtiene como el producto del esfuerzo efectivo vertical por la tangente del ángulo de fricción equivalente estimado antes.

Así la ecuación de la envolvente de cada material se determina (las cuales reposan en los anexos del informa para cada material y encontrado en cada una de las perforaciones) junto con los respectivos parámetros de resistencia. Adicionalmente, el procedimiento descrito con anterioridad se puede constatar en los anexos del presente informe que en la normalización del ensayo (SPT).

7.1.2 Correlaciones utilizadas a partir de los ensayos de SPT

El módulo de corte para pequeñas deformaciones G, ha sido correlacionado con el Nspt, con la siguiente relación dada por la siguiente relación dada por la FHWA-SA-97-076, de 1997.

$$G_o(kPa) = 15.560\ (N_{60})^{0.68}$$

La velocidad de ondas de corte de un suelo, puede ser valorada a partir de las propuestas de diferentes autores listados con sus respectivas correlaciones en la siguiente tabla.

Tabla 13. Correlaciones de Vs a partir de SPT

Investigadores	Ecuación	Observaciones
Imai y Yoshimura (1970)	$V_s=76N^{0.33}$	
Ohba y Toriumi (1970)	$V_s=84N^{0.31}$	
Imai (1977)	$V_s=aN^b$	a=102, b=0.29 Arcilla Holoceno a= 81, b=0.33 Arena Holoceno a=114, b=0.29 Arcilla Pleistoceno a= 97, b=0.32 Arena Pleistoceno
Ohta y Goto (1978)	$V_s=85.34N^{0.348}$	Para todo tipo de suelo
Okamoto *et al.* (1989)	$V_s=125N^{0.3}$	Arena del Pleistoceno
Japan Road Association (2002)	$V_s=80N^{1/3}$ $V_s=100N^{1/3}$	Arenas Arcilla
Vs=velocidad de ondas de corte en m/s; N=numero de golpes del SPT		

Utilizando la propuesta de la AASHTO 1996 se ha valorado el módulo de elasticidad, E, en función del tipo de suelo, a partir del número N al 60% de la eficiencia, según la siguiente tabla.

Tabla 14. Módulo de elasticidad para suelos, AASHTO 1996

Tipo de suelo	Módulo Young (kPa)
Limos, arenas limosas, mezclas ligeramente cohesivas	400 (N)
Arena limpia fina mediana y mezcla de limo y arena	700 (N)
Arena cuarzosa y arena con gravas pequeñas	1000 (N)
Arena gravosa	1200 (N)

7.1.3 Metodología parámetros de resistencia en rocas

Para caracterizar la resistencia de las unidades de roca perteneciente a la formación seca Rb-K2E1s se empleó el criterio de falla de Hoek-Brown, considerando que la resistencia a la compresión inconfinada sigue una función de probabilidad uniforme, con valores característicos de este tipo de materiales sedimentarios (arcillolitas y areniscas). Los demás parámetros del criterio Hoek-Brown (D, mi, mb, s, a) fueron considerados constantes y sus valores corresponden a los valores típicos propuestos por Rocscience (2000) y González Vallejo et al., (2004).

El comportamiento mecánico de la roca blanda fue caracterizado por el criterio de Hoek-Brown generalizado. La ecuación no lineal que define este criterio requiere la definición de las siguientes propiedades y constantes del material:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

σ_{ci} Resistencia a la compresión uniaxial del material intacto.

s Medida de la resistencia a la compresión simple de la roca debido a la fracturación.

m_i Constante que depende de las propiedades de la matriz rocoso.

El parámetro m_b es el valor reducido de la constante del material m_i y está dado por la siguiente ecuación:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

s y *a* son constantes del macizo rocoso dadas por las siguientes ecuaciones:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right)$$

Dónde:

GSI es el Índice geológico de resistencia y D es un factor que depende del grado de alteración del macizo rocoso por efecto de las excavaciones o por la relajación de esfuerzos.

7.1.4 Cimentaciones superficiales

Las cimentaciones superficiales como zapatas y/o losas de cimentación deberán ser dimensionadas y diseñadas de tal manera que el suelo o roca de soporte proporcione una resistencia nominal adecuada, teniendo en cuenta el potencial de capacidad de carga adecuada y el potencial de asentamiento, bajo los estados límite y factores de resistencia aplicables de conformidad con las disposiciones establecidas en la normatividad aplicable (Norma Sismo Resistente NSR-10, CCP-14). En zapatas o cimientos superficiales cargados excéntricamente, el diseño geotécnico tanto para la capacidad de carga como para el asentamiento, debe considerar un área efectiva (B´x L´) dentro de los límites físicos del

cimiento, así mismo estos cimientos deben estar diseñados para asegurar que la capacidad de carga mayorada no es inferior a los efectos de las cargas mayoradas en todos los estados limites aplicables.

7.1.4.1 Capacidad de carga

La capacidad de carga nominal debe estimarse mediante las teorías aceptadas de mecánica de suelos y deben basarse en parámetros de suelo medidos. Los parámetros del suelo utilizados en los análisis deberán ser representativos de la resistencia al corte del suelo bajo la carga y condiciones del subsuelo consideradas. Además, se estudiarán las posibles fallas por cortante local, es decir aquellas que puedan afectar solamente una parte del suelo que soportara el cimiento, así como la falla por punzonamiento en suelos blandos. En el cálculo se deberá considerar:

a) Posición del nivel freático más desfavorable durante la vida útil de la estructura
b) Excentricidades entre el punto de aplicación de cargas y el centroide geométrico de la cimentación.
c) Influencia de estratos blandos bajo la cimentación.
d) Influencia de taludes próximos a los cimientos.
e) Suelos susceptibles a la pérdida parcial o total de su resistencia (suelos especiales, presiones de poros, deformaciones volumétricas y solicitaciones sísmicas).
f) Existencia de galerías, cavernas, grietas u otras oquedades.

Para la estimación de la capacidad portante del suelo de fundación se emplea el análisis por corrección del talud y nivel freático propuesto por Vesic (1973, 1975), donde la carga ultima se determina por:

$$q_{ultL} = c' N_{cL} s_c i_c + q_L N_{qL} s_q i_q c_{wq} + 0.5 \gamma B N_{\gamma L} s_\gamma i_\gamma c_{w\gamma}$$

Dónde:

c:	Cohesión	β:	Inclinación del talud
q:	Esfuerzo efectivo de sobrecarga	sc, sq, sg:	Factores de corrección por forma
g:	Peso unitario	ic, iq, ig:	F. de corrección por inclinación
B:	Ancho del cimiento	Cwq, Cwg:	Factor de corrección por nivel freático
L:	Largo del cimiento	NcL, NqL, NgL	Factores de capacidad de carga

Tabla 15. NcL, NqL, NgL. Factores de corrección por capacidad de carga y forma

	Para ϕ'>0	Para ϕ'=0
$N_{cL} = (N_{qL} - 1)\cot(\phi')$	$S_c = 1.0 + \frac{N_q}{N_c}\frac{B}{L}$	$S_c = 1.0 + \frac{B}{5L}$
$N_{qL} = Kp\ \exp[(\pi - 2\beta)\tan\ \phi']$	$S_q = 1.0 + \frac{B}{L}\tan(\phi)$	$S_q = 1.0$
$k_p = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right)$		$S_\gamma = 1.0$
$N_{\gamma L} = 2(N_{qL} + 1)\tan(\phi')$	$S_\gamma = 1.0 - 0.4\frac{B}{L}$	

Fuente: CCP-14 (tabla 10.6.3.1.2ª)

Tabla 16. ic, iq, ig. Factores de corrección por inclinación de la carga

Para ϕ'=0	$i_\gamma = 0$	$i_c = i_q = \left(1 - \frac{\theta}{90}\right)^2$	$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{H}{V}\right)$
Para ϕ'>0	$i_\gamma = \left(1 - \frac{\theta}{\phi'}\right)^2$	$i_c = i_q = \left(1 - \frac{\theta}{90}\right)^2$	

Fuente: CCP-14 (tabla 10.6.3.1.2ª)

Tabla 17. Factores de corrección por nivel freático (D_w: profundidad del nivel freático tomada desde superficie)

D_w	C_{wq}	$C_{w\gamma}$
0.0	0.5	0.5
D_f	1.0	0.5
$>1.5B + D_f$	1.0	1.0

Fuente: CCP-14 (tabla 10.6.3.1.2ª)

La capacidad de carga neta (q_{ult}) calculada mediante la metodología anteriormente descrita, de acuerdo con lo contenido en el CCP-14, debe ser afectada por un factor de resistencia ϕ_b para la resistencia geotécnica de cimentaciones superficiales en el estado límite de resistencia. Para el presente caso de estudio el apoyo de las estructuras tipo muro se realiza sobre roca. De esta manera, el factor de resistencia adoptado de la tabla 10.5.5.2.2-1 del CCP-14 es de 0,45. Además, para el cálculo de la capacidad de carga neta se adoptó como el estado de esfuerzos movilizados igual a la mitad de los parámetros de resistencia en la falla para la roca de apoyo. En el anexo 5 se presenta a detalle el cálculo de la capacidad portante.

$$q_R = \phi_b * q_{ult}$$

7.2 RESULTADOS EXPLORACIÓN DIRECTA

7.2.1 Ensayos de clasificación

Con el fin de obtener una descripción estratigráfica y geotécnica detallada de subsuelo, sobre algunas muestras de suelo se realizaron ensayos de clasificación (contenido de humedad INV E-122, peso unitario ASTM D7263, granulometría INV E-123 y límites de consistencia INV E-125, INV E-126). A partir de los resultados obtenidos, las muestras de suelo serán clasificadas según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos” (SUCS) descrito en la norma I.N.V.E-181.

7.2.2 Ensayos de propiedades mecánicas

Con el fin de conocer parámetros de resistencia del suelo, dependiendo del tipo de suelo encontrado, se realizó ensayo in situ de penetración estándar SPT sobre las muestras hasta donde presentaron rechazo y se ejecutó ensayo de compresión inconfinada (INV E – 152) sobre una muestra del sondeo SM-2 a una profundidad de 1.50 – 2.00 m.

En la Tabla 18 se consolida los resultados de ensayos, correspondientes a los diferentes ensayos de laboratorio aplicados a cada unidad de muestra producto de la exploración previamente llevada a cabo en campo, los cuales se pueden ver a detalle en el Anexo 4.

Tabla 18. Tabla resumen resultados de campo y laboratorio SM-2 y SM-3

PROYECTO: ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL CONTROL DEL CAUCE, QUEBRADA LOS MUERTOS - MUNICIPIO LA PLATA EN EL DEPARTAMENTO DEL HUILA.

ID Sondeo	Identificación Muestra				Propiedades Índice				USCS	Granulometría			Propiedades Físicas		Otros Parámetros	Carga Puntual		N Campo (Golpes/pie)			
	No.	Inicial (m)	Final (m)	Prom (m)	w_n (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)		G (%)	A (%)	F (%)	γ_t (T/m³)	γ_d (T/m³)	q_u (T/m²)	σc (Mpa)	Is	1	2	3	N_{45}
SM-2	1	0,00	1,00	0,50																	
SM-2	2	1,00	1,50	1,25	19,44	30,70	20,70	10,00	SC	0,00	56,70	43,30	1,97	1,65				3	5	6	11
SM-2	3	1,50	2,00	1,75	21,06	28,50	20,50	8,00	CL	4,00	43,30	52,70	2,00	1,65	10,4			6	6	10	16
SM-2	4	2,00	2,50	2,25														12	17	15	32
SM-2	5	2,50	3,00	2,75														9	13	16	29
SM-2	6	3,00	3,50	3,25														13	11	9	20
SM-2	7	3,50	4,00	3,75														8	12	11	23
SM-2	8	4,00	4,50	4,25	11,33				SM	15,90	56,10	27,90	1,78	1,60				16	24	23	47
SM-2	9	4,50	5,00	4,75														12	11	11	22
SM-2	10	5,00	5,50	5,25														11	22	27	49
SM-2	11	5,50	6,00	5,75	7,91					21,30	50,50	28,20	1,84	1,71				24	24	45	50
SM-2	12	6,00	7,50	6,75																	
SM-2	13	7,50	9,00	8,25												252,16	11,42				
SM-2	14	9,00	10,00	9,50	16,45					11,00	64,00	25,00	1,93	1,65							
SM-3	1	0,00	1,00	0,50																	
SM-3	2	1,00	1,50	1,25	7,96				SM	21,10	56,10	22,90	1,75	1,62				14	16	19	35
SM-3	3	1,50	2,00	1,75														17	19	22	41
SM-3	4	2,00	2,50	2,25														26	29	27	50
SM-3	5	2,50	3,00	2,75	7,03					24,70	57,60	17,70	1,75	1,64				20	32	37	50

PROYECTO: ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL CONTROL DEL CAUCE, QUEBRADA LOS MUERTOS - MUNICIPIO LA PLATA EN EL DEPARTAMENTO DEL HUILA.

ID Sondeo	Identificación Muestra				Propiedades Índice				USCS	Granulometría			Propiedades Físicas		Otros Parámetros	Carga Puntual		N Campo (Golpes/pie)			
	No.	Inicial (m)	Final (m)	Prom (m)	w_n (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)		G (%)	A (%)	F (%)	γ_t (T/m³)	γ_d (T/m³)	q_u (T/m²)	σc (Mpa)	Is	1	2	3	N_{45}
SM-3	6	3,00	3,50	3,25														20	16	22	38
SM-3	7	3,50	4,00	3,75														22	24	30	50
SM-3	8	4,00	4,50	4,25														36	30	42	50
SM-3	9	4,50	6,00	5,25												72,99	3,31				
SM-3	10	6,00	7,50	6,75																	
SM-3	11	7,50	9,00	8,25	35,71	57,50	27,40	30,10	CH	2,00	33,00	65,00	1,82	1,34		152,83	6,92				
SM-3	12	9,00	10,50	9,75																	
SM-3	13	10,50	12,00	11,25												285,73	12,95				
SM-3	14	12,00	13,50	12,75																	
SM-3	15	13,50	15,00	14,25	37,10					0,00	64,50	35,50	1,71	1,25							

Fuente: Girmava, 2022

7.2.3 Parámetros de resistencia en roca

Para la unidad de suelo Rb-K2E1s se emplearon los valores adoptados en el estudio de AVR del municipio La Plata, los cuales fueron basados en el criterio de Hoek-Brown tomando valores típicos de Rocscience (2000) y González Vallejo et al., (2004), estos valores caracterizan materiales rocosos y con índices geológicos de resistencia altos, la muestra solo se puede astillar con un martillo geológico.

La Tabla 19 presenta los parámetros del criterio Hoek-Brown definidos para la Formación Seca.

Tabla 19. Parámetros del criterio Hoek-Brown para la Unidad de roca Rb-K2E1s.

Parámetro	Valor
σ_{ci}	5000 kPa
GSI	48
D	0.5
m_i	4
m_b	0.336
s	1.0e-03
a	0.507

γ = Peso unitario.

σ_{ci} = Resistencia a la compresión inconfinada.

GSI = Índice geológico de resistencia.

D = Factor que depende del grado de alteración del macizo rocoso.

m_i = Constante de la matriz rocosa.

m_b = Valor reducido de la constante m_i

s y a = Constantes de la matriz rocosa

7.3 RESULTADO EXPLORACIÓN INDIRECTA

El procesamiento e interpretación de los datos se realizó mediante el uso del software Geometrics que consta de cuatro módulos, Geometrics Seismodule Controller, para adquirir datos en campo, Pickwin (Pick First Breaks or Dispersion Curves) para identificar los primeros arribos de las ondas P, Plotrefa (Refraction Analysis) para generar perfiles simples y tomografías para ondas P y por último el Surface Wave Analysis Wizard con el cual se crean los perfiles 1D y 2D de las ondas de corte, que permiten analizar todas las señales

registradas. Con los resultados obtenidos se realiza el análisis de los modelos obtenido de los perfiles bidimensionales para las ondas compresionales “P” y perfiles unidimensionales y bidimensionales para ondas de Corte “S”, que son correlacionados con la geología local de la zona de estudio

7.3.1 Parámetros geomecánicos

Mediante las siguientes fórmulas matemáticas presentadas en la Tabla 20 son calculados los principales parámetros geomecánicos relacionados con las velocidades compresionales y de corte de los materiales, muy útiles para la caracterización de los perfiles de suelos.

Tabla 20. Fórmulas utilizadas para cálculos de parámetros Geomecánicos

Descripción	Definición
Relación de Poisson	$\gamma = \frac{(\frac{Vp}{Vs})^2 - 2}{2(\frac{Vp}{Vs})^2 - 2}$
Módulo de corte o Módulo de Rigidez	$G = \frac{E}{2(1+\gamma)}$
Módulo de elástico	$E = {Vp^2}/{50}$
Deformación volumétrica o Módulo de Bulk	$K = \frac{1}{3}\frac{E}{1-2\nu}$

7.3.2 Resultados de la línea sísmica

La siguiente sección contiene los resultados de todas las pruebas realizadas en campo. Para el ensayo de símica de refracción se muestran las gráficas del modelo simplificado y tomografía sísmica con sus respectivas interpretaciones. Seguidamente se muestran los resultados obtenidos para el Análisis Multi-Espectral de Onda Superficial de siglas en inglés MASW, de los cuales se obtiene los perfiles unidimensionales en profundidad y el perfil bidimensional (2D) del suelo, con una profundidad de investigación de 30 metros.

- **Modelo Simplificado LRS-03:**

En la Ilustración 18, se presenta el modelo simplificado de dos conjuntos de velocidades compresionales promedio:

El primer conjunto de Vp1 644 m/s, con espesor de 10 m aproximadamente, heterogéneo, y contacto irregular en su base. Se caracteriza como material de ripado fácil.

El segundo conjunto de velocidades promedio Vp2 990 m/s presenta por debajo de 10 m un contacto superior irregular. Se caracteriza como material ripado fácil de suelo denso que se presenta a una profundidad de 10 m aproximadamente.

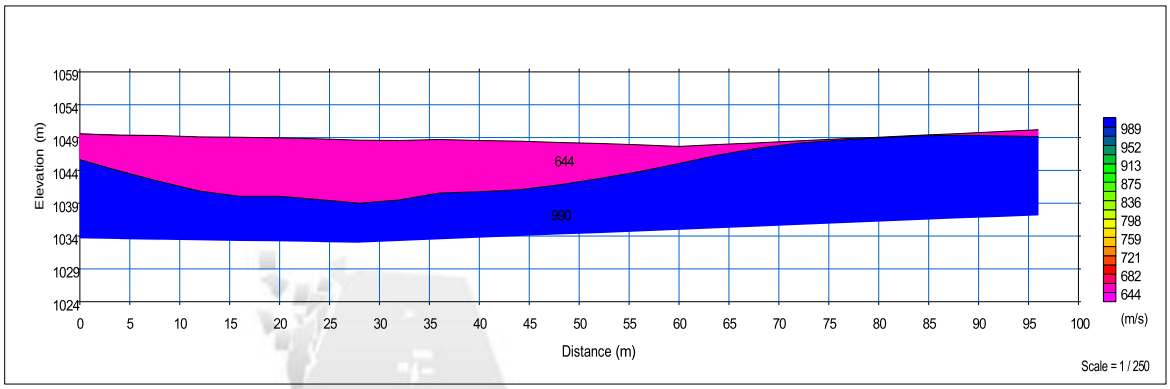


Ilustración 18.Modelo Simplificado LRS-03
Fuente: AVR La Plata, 2017

En la Ilustración 19, se muestra la tomografía sísmica donde se presentan iso-velocidades bajas desde 644 – 721 m/s, la cual se asocia a la capa vegetal y suelos no consolidados compuesto principalmente de arenas, gravas y limos con un espesor de 3 m. Después de los 3 m de profundidad se presentan las iso-velocidades medias con rango desde 721 – 913 m/s, asociados a suelos residuales con espesor promedio de 7m. Finalmente a los 10 m de profundidad se presentan las iso-velocidades altas que superan los 913 – 989 m/s que caracteriza a suelos densos.

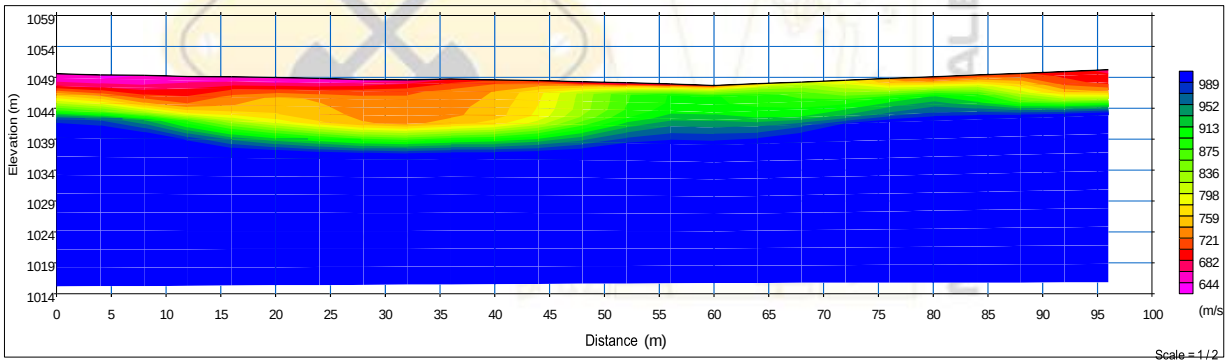


Ilustración 19. Tomografía sísmica LRS-03
Fuente: AVR La Plata, 2017

En general el perfil unidimensional presenta una velocidad de corte promedio Vs 382.8 m/s m/s, que según la norma NSR-10, se clasifica como un perfil de suelos tipo C, que caracteriza a perfiles de suelos densos o roca blanda (Ver Ilustración 20).

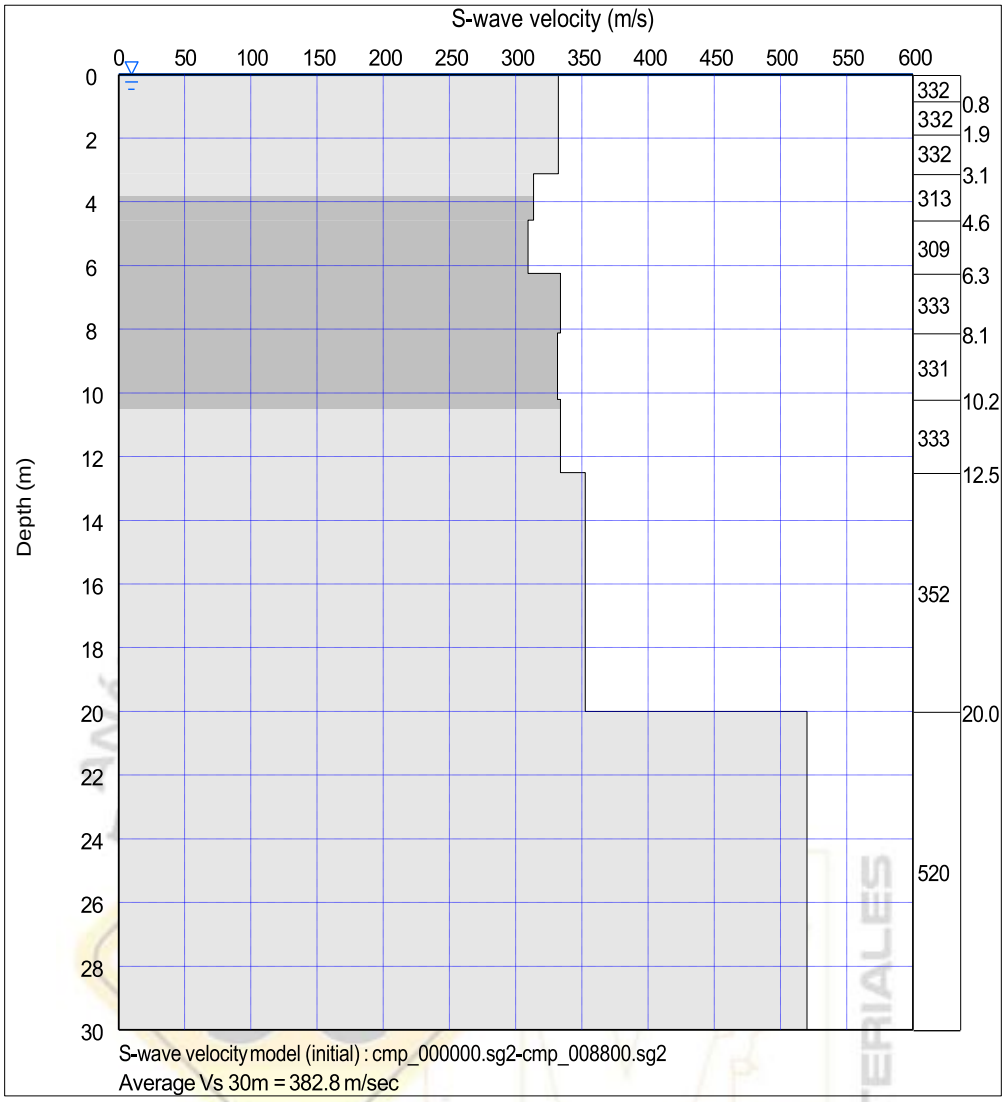


Ilustración 20. Perfil unidimensional MASW-03
Fuente: AVR La Plata, 2017

En la Ilustración 21, se muestra el perfil bidimensional de onda de corte, sin continuidad lateral homogénea con Vs1 que comprenden un rango de a 305 - 353 m/s con un espesor de 12 m aproximadamente, que caracterizan a los materiales de suelos residuales. Vs2 con rango de 353 a 472 m/s con espesor de 8 m aproximadamente, asociados a suelos altamente alterados, y las velocidades altas que superan los 472 - 350 m/s, por debajo de los 20 m de profundidad se consideran materiales moderadamente alterados con mayor grado de compactación.

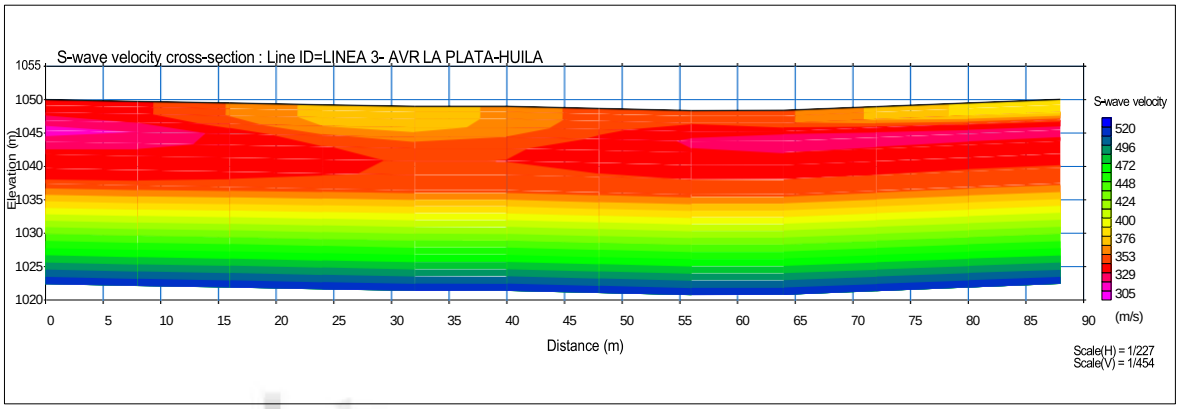


Ilustración 21.Perfil bidimensional (2D) Vs MASW-03
Fuente: AVR La Plata, 2017

- Interpretación

A continuación, se presenta la Tabla 21 resumen de los parámetros geomecánicos obtenidos para la clasificación de suelos a partir de Vp y Vs:

Tabla 21. Tabla resumen de parámetros

Línea	Capa	Vp (m/s) Promedio	Vs (m/s) Promedio	Profundidad	Espesor (m)	N (aprox)	E kN/m2	G kN/m2	K kN/m2	Poisson	DESCRIPCIÓN	PERFIL DE SUELO TIPO
LRS-03	1	682.5	325	0-3	3	12	9316.1	3419.0	1800.4	0.31	Perfil de suelo rígido.	D
	2	817	352	3-10	7	16	13349.8	4905.2	2584.8	0.35	Perfil de suelo rígido.	D
	3	951	520	10-Indeterm	-	20	18088.0	6654.0	3508.8	0.24	Perfil de suelo denso o roca blanda.	C

Fuente: AVR La Plata, 2017

7.3.3 Clasificación General Del Subsuelo Según Norma NSR – 2010

Teniendo en cuenta los resultados de las velocidades de ondas presentados en los modelos 2D de MASW, es posible clasificar los perfiles del suelo según la Norma Sismo Resistente 2010 NSR-10. La Tabla 22 muestra la clasificación del perfil de suelo en términos de la velocidad de onda promedio durante los primeros 30 metros de profundidad.

Tabla 22. Clasificación de los perfiles de suelo según resultados del método

Línea ID	Velocidad de Onda S Vs (m/s)	Tipo de Perfil (Según Tabla A.2.4-1 de la NSR-2010)	Descripción y definición (Según la Tabla A.2.4-1 de la NSR-2010)
LRS-3	382.8	C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante 760 m/s > Vs ≥ 360 m/s.

Fuente. Girmava, 2022

La velocidad de onda de corte (Vs) promedio en los primeros 30 metros para el perfil sísmico es de 382.8 m/s, y según la clasificación de los perfiles de suelos de la tabla Norma Sismo-Resistente Colombiana NSR10 clasifica el suelo como **suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante 760 m/s > Vs ≥ 360 m/s (perfil tipo C).**

8 CONDICIONES SÍSMICAS

Con base al título A de la norma NSR-10 se establecieron los distintos parámetros sísmicos tales como la aceleración pico efectivo, coeficiente horizontal, de tal forma que sea posible asociar las condiciones sísmicas que rigen la zona de estudio, al modelo geotécnico.

8.1 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PARA DEFINIR EL PERFIL DEL SUELO

Según la normativa Colombiana Sismo resistente NSR – 10 se deben seguir los siguientes pasos:

- Verificar si el suelo posee las características de clasificación del perfil de suelo tipo F, en cuyo caso debe realizarse un estudio sísmico particular de clasificación en el sitio por parte de un ingeniero Geotecnista siguiendo los lineamientos del apéndice A.2.10.
- Establecer la existencia de estrato de arcilla blanda, la arcilla blanda se define como aquella que tiene una resistencia al corte no drenado menor de 50 kPa (0.50 Kgf/cm2), un contenido de agua (W), mayor del 40%, y un índice de plasticidad (IP) de 20%. Si hay un espesor total, H, de 3 metros o más de estratos de arcilla que cumplan estas condiciones el perfil se clasifica como tipo E.
- El perfil se clasifica utilizando uno de los tres criterios Vs, N, o la consideración conjunta Nch y Su, seleccionando el aplicable como se indica a continuación. En caso de obtener la velocidad de onda de corte (Vs) prevalecerá la clasificación basada en este criterio, en caso de que no se cuente con Vs se podrá utilizar el criterio basado conjuntamente en Su, para la fracción de suelos cohesivos y el criterio Nch, que toma en cuenta la fracción de los suelos no cohesivos del perfil. Para esta tercera consideración, en caso de que las dos evaluaciones respectivas indiquen perfiles diferentes, se debe utilizar el perfil de suelos más blandos de los dos casos. Por ejemplo, asignando un perfil tipo E en vez de tipo D.
- En la tabla A.2.4-2 se resumen los tres criterios para clasificar perfil de suelos tipo C, D o E. Los tres criterios se aplican así:
  - Vs en los 30m superiores del perfil.
  - N en los 30m superiores del perfil
- Nch para los estratos de suelos existentes en los 30m superiores que se clasifican como no cohesivos cuando IP<20, o el promedio ponderado Su en los estratos de suelos cohesivos existentes en los 30m superiores del perfil, que tienen IP>20, lo que indique un perfil más blando.

8.2 PERFIL DEL SUELO OBTENIDO

De acuerdo a la NSR-10 en el titulo A, el numeral A.2.4.5 (ver Ilustración 22) define primero, revisar si el suelo es tipo F, segundo, revisar si se tiene un estrato de arcilla blanda de más de 3 metros con una resistencia al corte no drenado menor a 50 kPa, w>40% y un IP>20, de acuerdo a lo que se identificó en el perfil en la zona no se encuentran estratos arcillosos de estas características. En vista de que ninguno de estos tipos de suelo corresponde al estudiado, se procede con el paso tres del procedimiento de clasificación, en donde la norma menciona *“El perfil se clasifica utilizando uno de los tres criterios: Vs, N, o la consideración conjunta de Nch y Su, seleccionando el aplicable como se indica a continuación. En caso que se cuente Vs prevalecerá la clasificación basada en este criterio”.*

A.2.4.5 — PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACIÓN — El procedimiento para definir el perfil es el siguiente:

A.2.4.5.1 — *Paso 1* — Debe primero verificarse si el suelo cae dentro de la clasificación de alguna de las categorías de perfil de suelo tipo **F**, en cuyo caso debe realizarse un estudio sísmico particular de clasificación en el sitio, por parte de un ingeniero geotecnista siguiendo los lineamientos de A.2.10.

A.2.4.5.2 — *Paso 2* — Debe establecerse la existencia de estratos de arcilla blanda. La arcilla blanda se define como aquella que tiene una resistencia al corte no drenado menor de 50 kPa (0.50 kgf/cm²), un contenido de agua, **w**, mayor del 40%, y un índice de plasticidad, **IP**, mayor de 20. Si hay un espesor total, **H**, de 3 m o más de estratos de arcilla que cumplan estas condiciones el perfil se clasifica como tipo **E**.

A.2.4.5.3 — *Paso 3* — El perfil se clasifica utilizando uno de los tres criterios: $\bar{v}_s$, $\bar{N}$, o la consideración conjunta de $\bar{N}_{ch}$ y $\bar{s}_u$, seleccionando el aplicable como se indica a continuación. En caso que se cuente $\bar{v}_s$ prevalecerá la clasificación basada en este criterio. En caso que no se cuente con $\bar{v}_s$ se podrá utilizar el criterio basado en $\bar{N}$ que involucra todos los estratos del perfil. Alternativamente se podrá utilizar el criterio basado conjuntamente en $\bar{s}_u$, para la fracción de suelos cohesivos y el criterio $\bar{N}_{ch}$, que toma en cuenta la fracción de los suelos no cohesivos del perfil. Para esta tercera consideración, en caso que las dos evaluaciones respectivas indiquen perfiles diferentes, se debe utilizar el perfil de suelos más blandos de los dos casos, por ejemplo asignando un perfil tipo **E** en vez de tipo **D**. En la tabla A.2.4-2 se resumen los tres

Ilustración 22. Variación del número de golpes de campo, número de golpes corregido en función de la profundidad
Fuente: NSR-10

A partir del perfil obtenido del suelo descrito y analizado en función de la exploración indirecta, se obtuvieron las velocidades de corte (Vs) por medio de la línea de refracción sísmica LRS 3 (382.8 m/s), en donde las velocidades se encuentran en el rango de 760 m/s > Vs > 360 m/s, según las Tablas A.2.4 - 1 y A.2.10 – 1 de la NSR-10, se clasifica como un perfil de suelos tipo C (ver Tabla 23).

Tabla 23. Criterio de clasificación de suelos

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	Vs ≥ 1500 m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > Vs ≥ 760 m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante .	760 m/s > Vs ≥ 360 m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	N ≥ 50 , o Su ≥ 100 kPa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	360 m/s > Vs ≥ 180 m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	50 > N ≥ 15, o 100kPa > Su ≥ 50 kPa
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda cortante	180 m/s > Vs
	Perfil que contiene un espesor total H mayor a 3m de arcillas blandas	IP > 20, W ≥ 40% , 50kPa > Su
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimientos A.2.10. se contemplan las siguientes sub clases: **F1 -** Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. **F2-** Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H> 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). **F3-** Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7,5m con índice de plasticidad IP >75). F4- Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H>36m).	

Perfil de Suelo Tipo	Subtipo de Perfil	Descripción del Perfil
F	F1	Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la exitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, entre otros.
	F2	Turba o arcillas orgánicas, y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas)
	F3	Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7,5 m con Índice de Plasticidad IP > 75)
	F4	Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36m)

Fuente: Tablas A.2.4 - 1 y A.2.10 – 1, NSR-10

8.2.1 Coeficiente de Aceleración Pico del Terreno

Con base a Ilustración 23 adoptado por la NSR-10, se define que la zona de estudio se encuentra dentro de una zona de amenaza sísmica ALTA en función de Aa y Av.

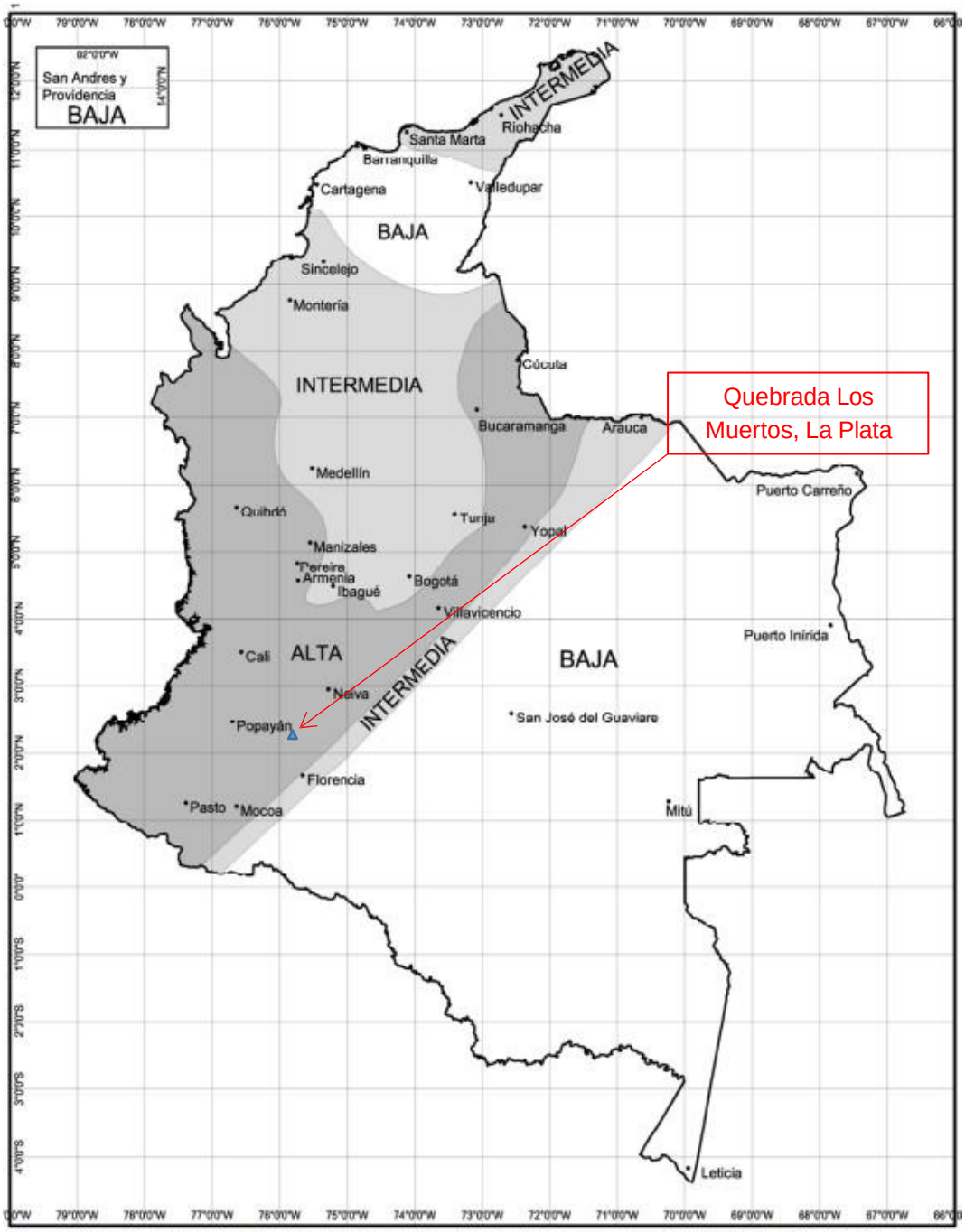


Figura A.2.3-1 — Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de A_a y A_v

Ilustración 23. Zonas de amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en funcion de Aa y Av.
Fuente: NSR-10 Título A

En la Ilustración 24 adoptada por la NSR-10, se ha considerado que el proyecto se encuentra localizado en la región 5, la cual obedece a un valor del coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva igual a 0.25 (Aa).

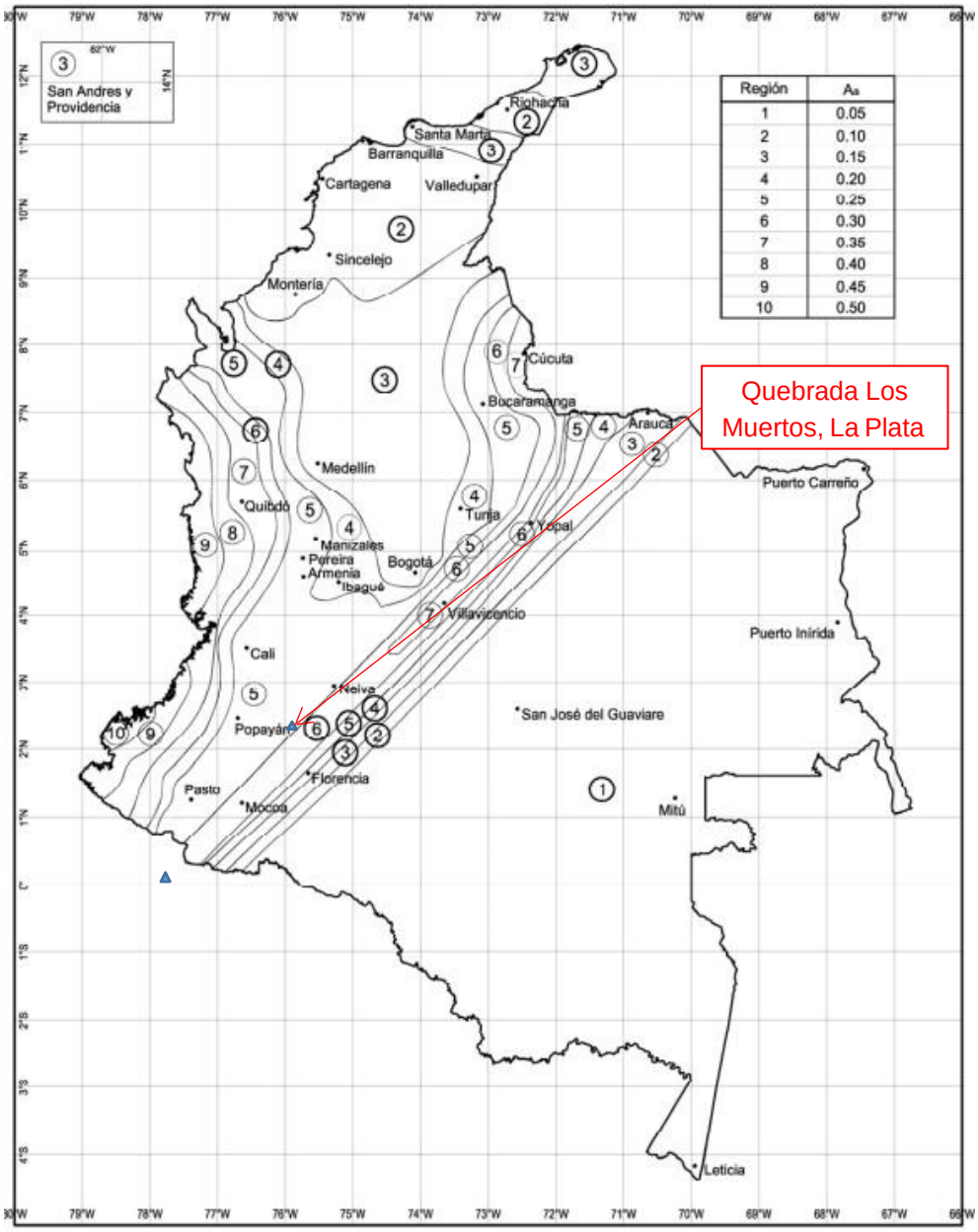


Figura A.2.3-2 — Mapa de valores de A_a

Ilustración 24. Valor de Aa para la zona de estudio.
Fuente: NSR-10 Título A

Con base a Ilustración 25 adoptada por la NSR-10, se ha considerado que el proyecto se encuentra localizado en la región 3, la cual obedece a un valor del coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva igual a 0.15 (Av).

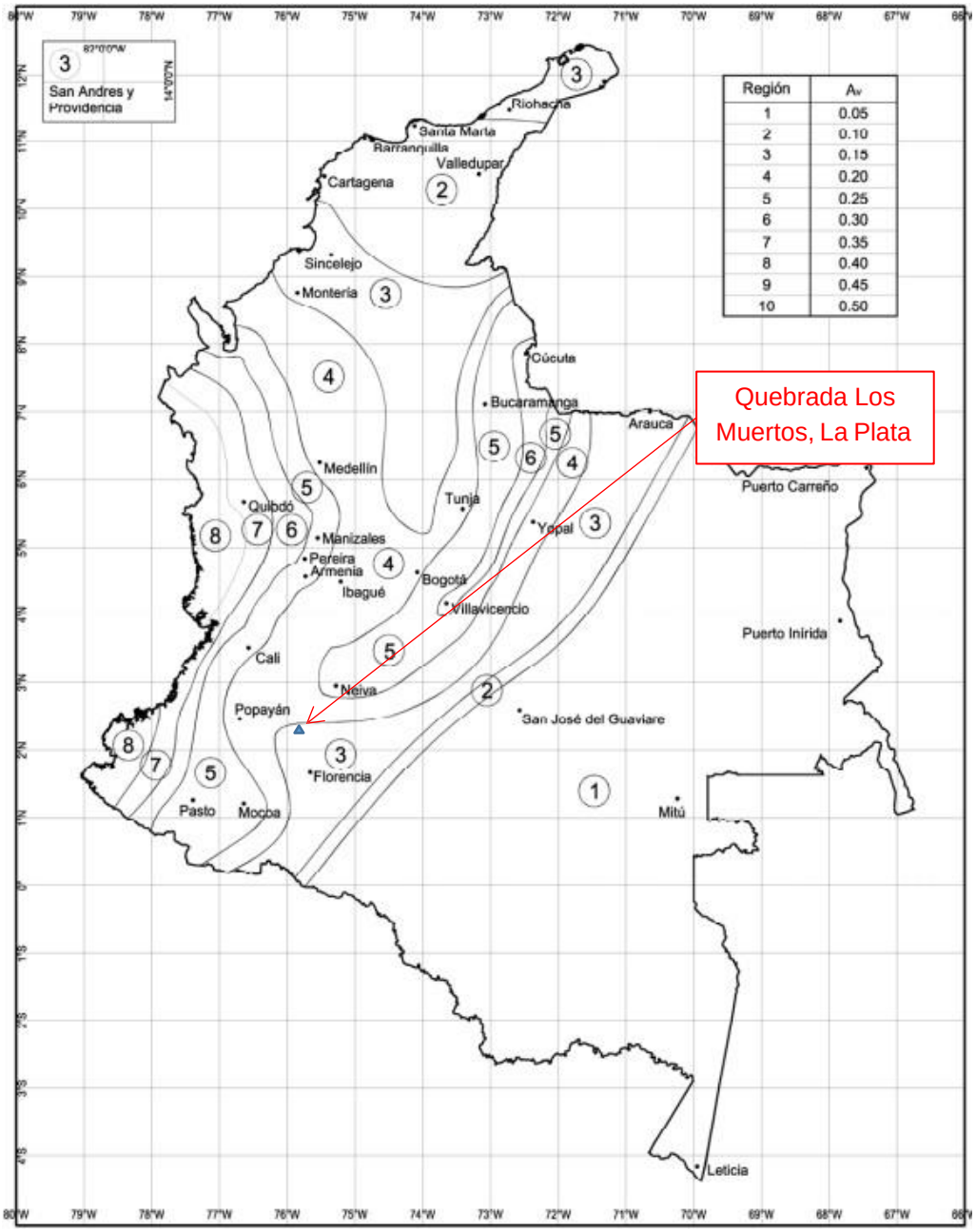


Ilustración 25. Valor de Av para la zona de estudio.
Fuente: NSR-10 Título A

8.3 PARÁMETROS DE ACELERACIÓN PICO EFECTIVO (AA) Y VELOCIDAD PICO EFECTIVA (AV)

El resumen de los parámetros sísmicos se ha extraído del título A de la NSR – 10 y se presenta a continuación:

Municipio	Código Municipio	Aa	Av	Zona de Amenaza Sísmica	Fa	Fv
La Plata	41396	0.25	0.15	Alta	1.15	1.65

Fuente: Girmava, 2022

En donde:

Aa : Coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva, para diseño.
Av : Coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva, para diseño.
Fa : Coeficiente de Amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos.
Fv : Coeficiente de Amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios.
Ao : Aceleración Horizontal Pico efectiva del terreno en superficie (g).
Tc : Período Corto

8.4 FACTORES DE SITIO

Siguiendo los lineamientos establecidos por la normativa sismo resistente (NSR – 10), se ha establecido el coeficiente de amplificación del suelo para el perfil de suelo Tipo C, usando el valor del perfil de suelo más crítico encontrado en campo. El valor para el coeficiente Fa es igual a 1.15, así como el valor del coeficiente Fv es igual a 1.65, estos valores son obtenidos a partir de la Tabla 24 y Tabla 25 respectivamente.

Tabla 24. Valores del coeficiente Fa, para la zona de periodos cortos del espectro

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	Aa ≤ 0.1	Aa = 0.2	Aa = 0.3	Aa = 0.4	Aa ≥ 0.5
A	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C	1.20	1.20	1.10	1.00	1.00
D	1.60	1.40	1.20	1.10	1.00

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	Aa ≤ 0.1	Aa = 0.2	Aa = 0.3	Aa = 0.4	Aa ≥ 0.5
E	2.50	1.70	1.20	0.90	0.90
F	véase nota	véase nota	véase nota	véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo F debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.
Fuente: NSR-10 Tabla A.2.4-4

Tabla 25. Valores del coeficiente Fv, para la zona de periodos intermedios del espectro

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	Av ≤ 0.1	Av = 0.2	Av = 0.3	Av = 0.4	Av ≥ 0.5
A	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C	1.70	1.60	1.50	1.40	1.30
D	2.40	2.00	1.80	1.60	1.50
E	3.50	3.20	2.80	2.40	2.40
F	véase nota	véase nota	véase nota	véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo F debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.
Fuente: NSR-10 Tabla A.2.4-4

8.5 COEFICIENTE DE IMPORTANCIA (I)

En el área de estudio se clasifica como: Grupo I — Estructuras de ocupación normal, por lo tanto, el coeficiente de importancia es igual 1.00.

Tabla 26. Valores de coeficiente de importancia, I

Grupo de Uso	Coeficiente de Importancia
IV	1.50
III	1.25
II	1.10
I	1.00

Fuente: Tabla A.2.5-1, NSR – 10

8.6 COEFICIENTE SÍSMICO DE DISEÑO PARA ANÁLISIS SEUDO ESTÁTICOS PARA TALUDES (KST)

Este valor es menor o igual a la aceleración máxima (amáx) y se admiten valores mínimos de KST/amáx, dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) y del tipo de análisis.

Tabla 27. Valores de KST/amax Mínimos para análisis seudo estáticos de taludes

Material	KST/amax Mínimo	Análisis de Amplificación mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales térreos	0.67	Amplificación de onda Unidimensional en dos columnas promediar
Todos los materiales térreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

Fuente: Tabla H.5.2-1, NSR – 10.

Debido a que no se realizó ningún tipo de análisis de amplificación y el tipo de material aplicado corresponde a los suelos, enrocados y macizos fracturados (RQD < 50%), la relación KST/amáx es igual a 0.80.

8.7 ACELERACIÓN PICO DEL SUELO

La aceleración pico del suelo se ha estimado como:

$$S_a = A_a * F_a * I * K_{ST}$$

$$S_a = 0.25x\ 1.15\ x\ 1.00\ x\ 0.80 = 0.23$$

Para analizar el comportamiento del talud en eventos extremos se considera un valor de coeficiente sísmico horizontal (Kh) de 0.23 y para efectos de la modelación, de acuerdo a la literatura, se emplea un valor de coeficiente sísmico vertical (Kv) que corresponde a 1/2 del valor de (Kh) (Sarma & Scorer, 2009).

$$K_v = \frac{1}{2} * S_a = \frac{1}{2}\ 0.23 = 0.12$$

8.8 ESPECTRO DE ACELERACIONES

Con base en los parámetros sísmicos obtenidos de manera previa, se ha podido construir el espectro de aceleraciones de diseño para un 5% de amortiguamiento según las especificaciones técnicas establecidas NSR-10, el resultado se presenta en la Ilustración 26.

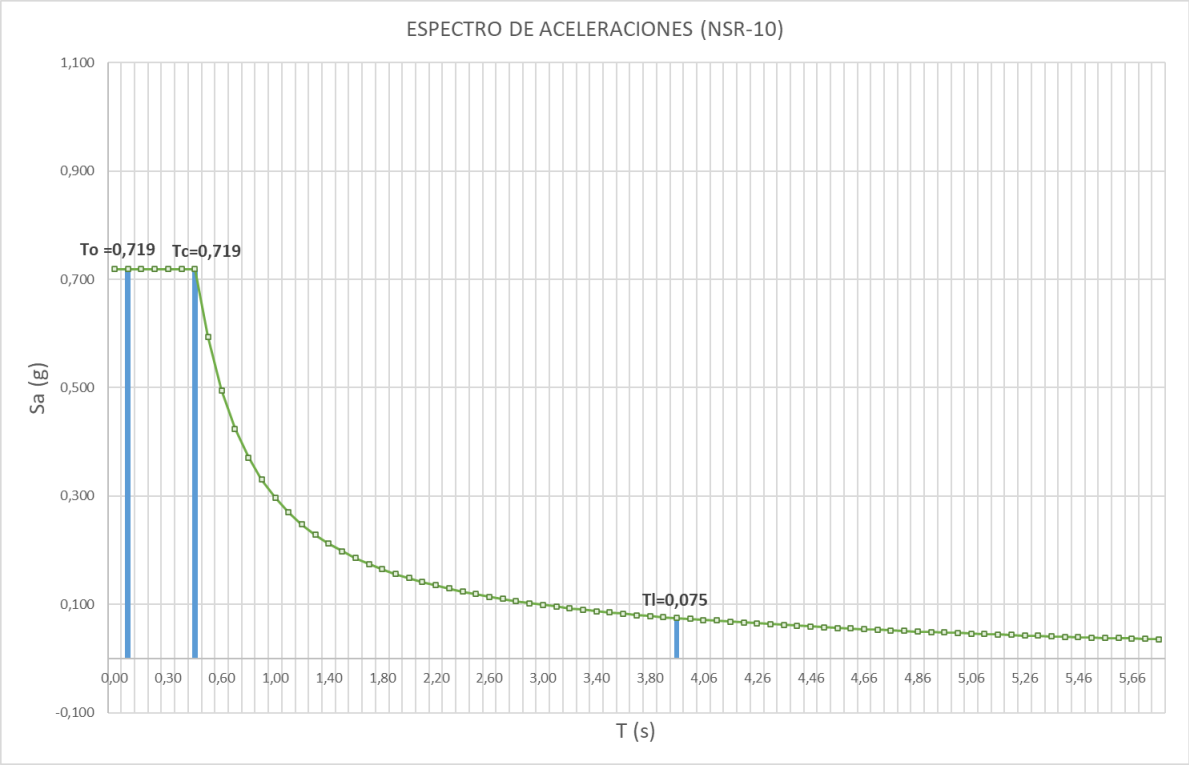


Ilustración 26. Espectro de aceleraciones de diseño para 5% de amortiguamiento en el área de estudio.
Fuente: Girmava, 2022

9 MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

La definición del modelo geológico – geotécnico y caracterización de los materiales, se realiza con base a las observaciones de campo, investigación del subsuelo y los resultados de laboratorio. Se caracteriza el sitio de estudio relacionando los sondeos con los ensayos de laboratorio y las formaciones geológicas identificadas en la zona de estudio. Con base a la exploración de campo suministrada, geología regional y caracterización de los resultados de laboratorio, se han identificado tres potenciales geomateriales, a continuación, se expone su descripción junto con la representación gráfica de las propiedades en función de la profundidad.

Material 1: Arena arcillosa (SC): Corresponde a arenas de color café claro con vetas amarillas con presencia de arcillas de consistencia firme, humedad media y plasticidad baja.

- **Humedad Natural y Límites de Consistencia**

La humedad natural varía entre 19.44% y 21.06% para un promedio de 20.25%, el límite liquido varía entre 28.50% y 30.70% para un promedio 29.60%, por último, el límite plástico varía entre 20.50% y 20.70% para un promedio de 20.60%.

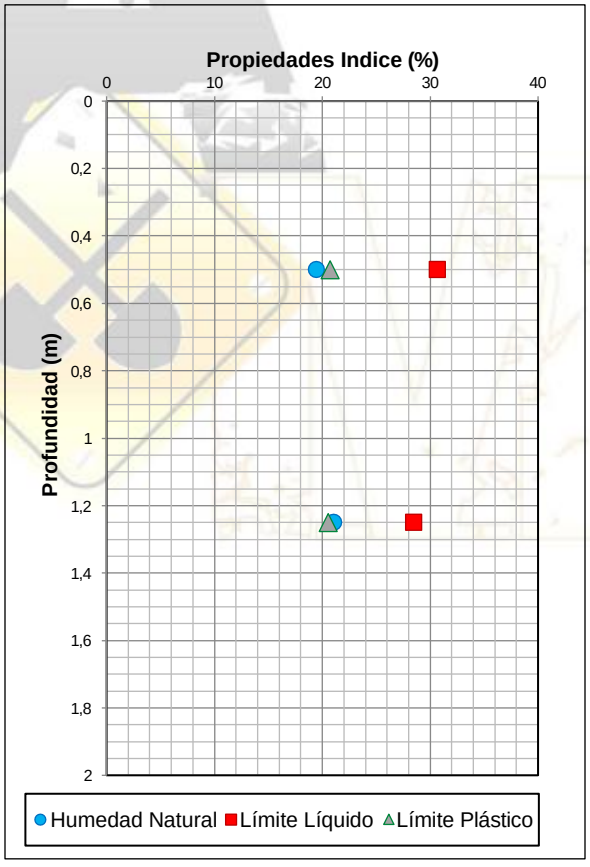


Ilustración 27. Humedad Natural y Límites de consistencia

Fuente: Girmava, 2022

- **Características Granulométricas**

La cantidad de finos varía entre 43.30% y 52.70% para un promedio de 48.00%, la cantidad de arenas varía entre 56.70% y 43.30% para un promedio 50.00%, por último, el contenido de gravas varía entre 0.00% y 4.00% para un promedio de 2.00%.

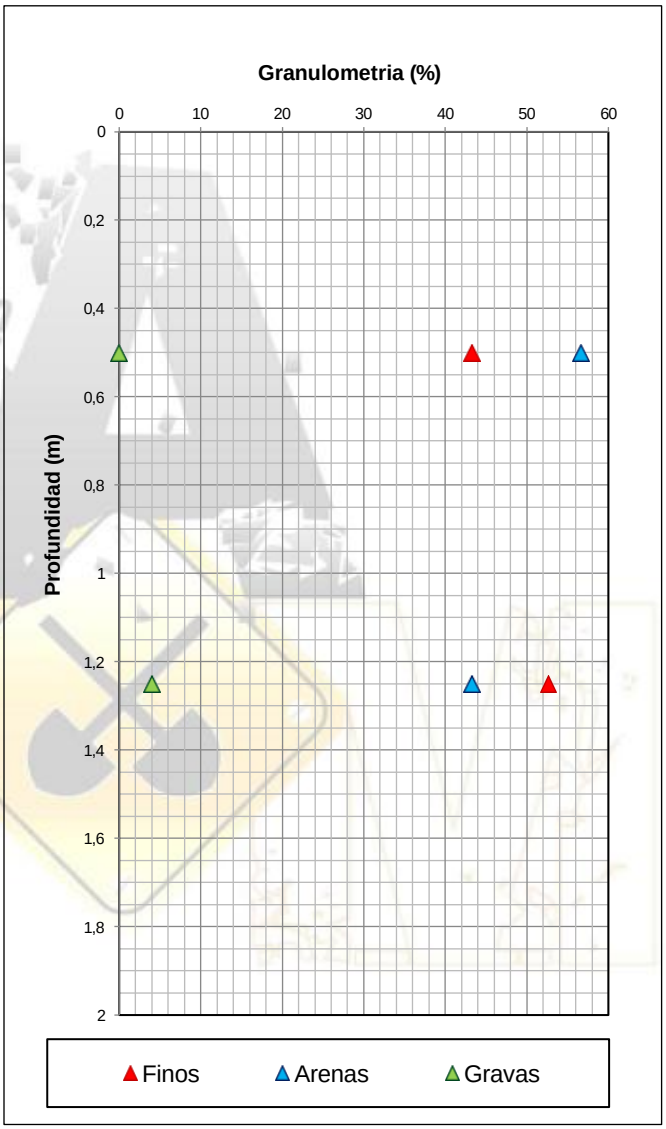


Ilustración 28. Características Granulométricas
Fuente: Girmava, 2022

- **Propiedades físicas**

El peso unitario total se encuentra entre 1.97 T/m³ y 2.00 T/m³ con un promedio de 1.98 T/m³, el peso unitario seco es de 1.65 T/m³.

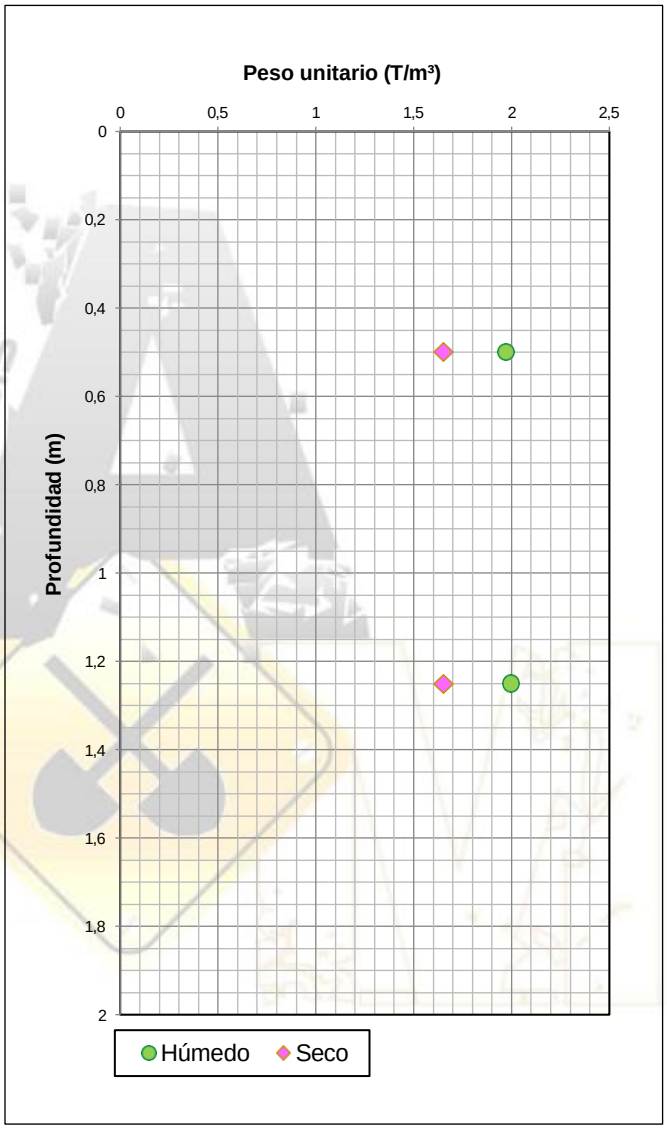


Ilustración 29. Peso específico seco y húmedo
Fuente: Girmava, 2022

- **Ensayo de Penetración Estándar**

Se tomó como referencia, el número de penetración estándar (N45), obtenido en campo durante la etapa de investigación del subsuelo. En la ejecución del ensayo SPT, se utilizó un martillo de 140 Lb y un muestreador de tipo cuchara partida (Split Spoon). El material presenta un N45 que se encuentra entre 11 golpes/pie y 32 golpes/pie.

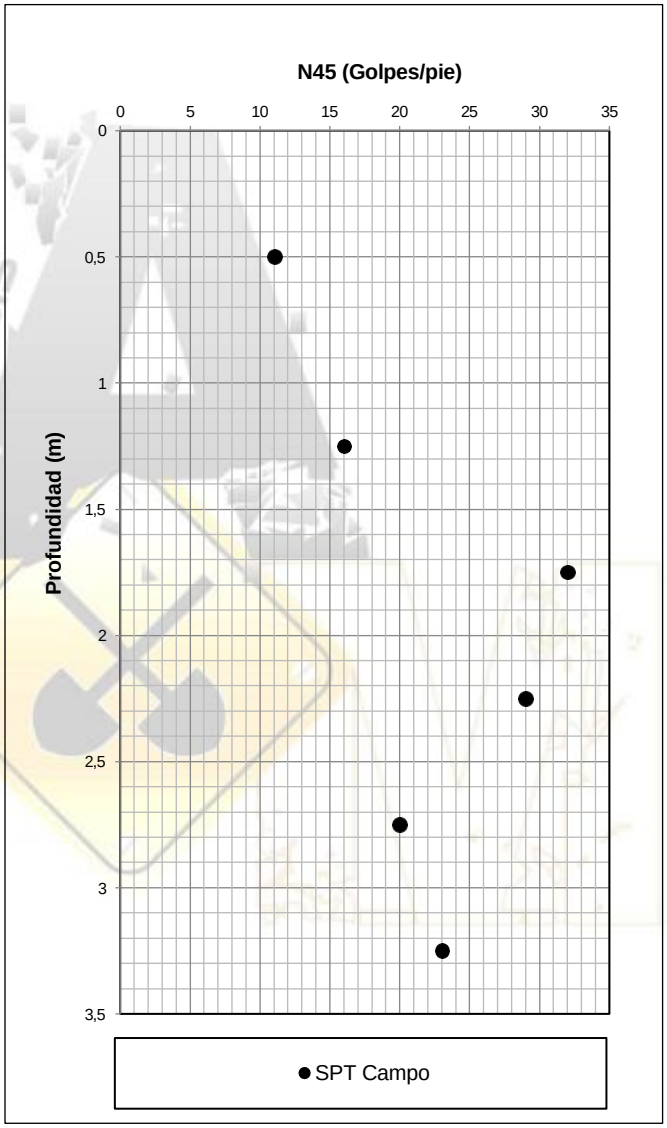


Ilustración 30. Ensayo de Penetración Estándar
Fuente: Girmava, 2022

Material 2: Arena limosa (SM): Estos depósitos corresponden a arenas con presencia de limos de consistencia firme, de humedad baja, sin plasticidad y color café con vetas grises, cuenta con presencia de gravas de tamaño medio y pequeño.

- **Humedad Natural**

La humedad natural varía entre 7.03% y 16.45% para un promedio de 10.14%.

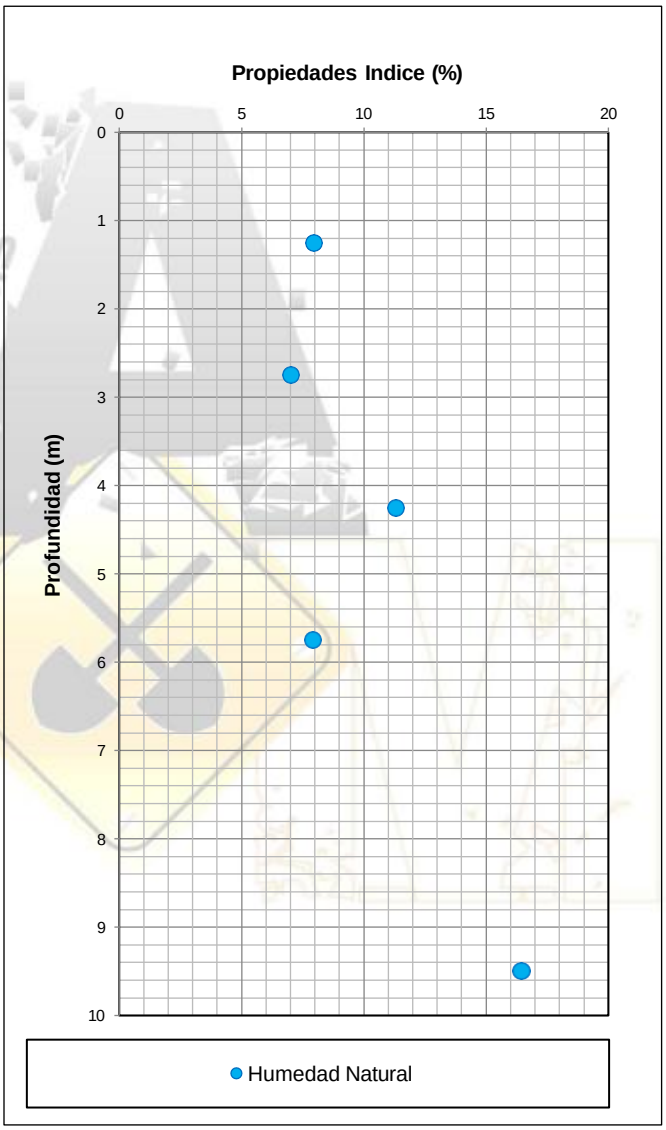


Ilustración 31. Humedad Natural y Límites de consistencia
Fuente: Girmava, 2022

- **Características Granulométricas**

La cantidad de finos varía entre 17.70% y 28.20% para un promedio de 24.34%, la cantidad de arenas varía entre 50.50% y 64.00% para un promedio 56.86%, por último, el contenido de gravas varía entre 11.00% y 24.70% para un promedio de 18.80%.

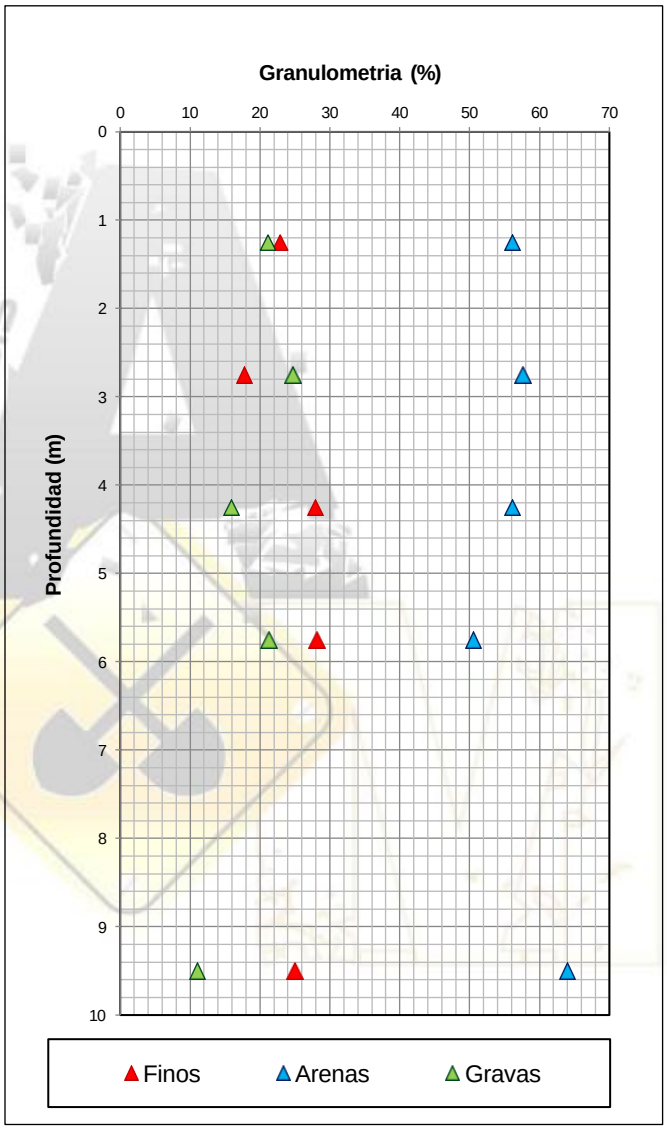


Ilustración 32. Características Granulométricas
Fuente: Girmava, 2022

- **Propiedades físicas**

El peso unitario total se encuentra entre 1.75 T/m³ y 1.93 T/m³ con un promedio de 1.81 T/m³, el peso unitario seco se encuentra entre 1.60 T/m³ y 1.71 T/m³ con un promedio de 1.64 T/m³.

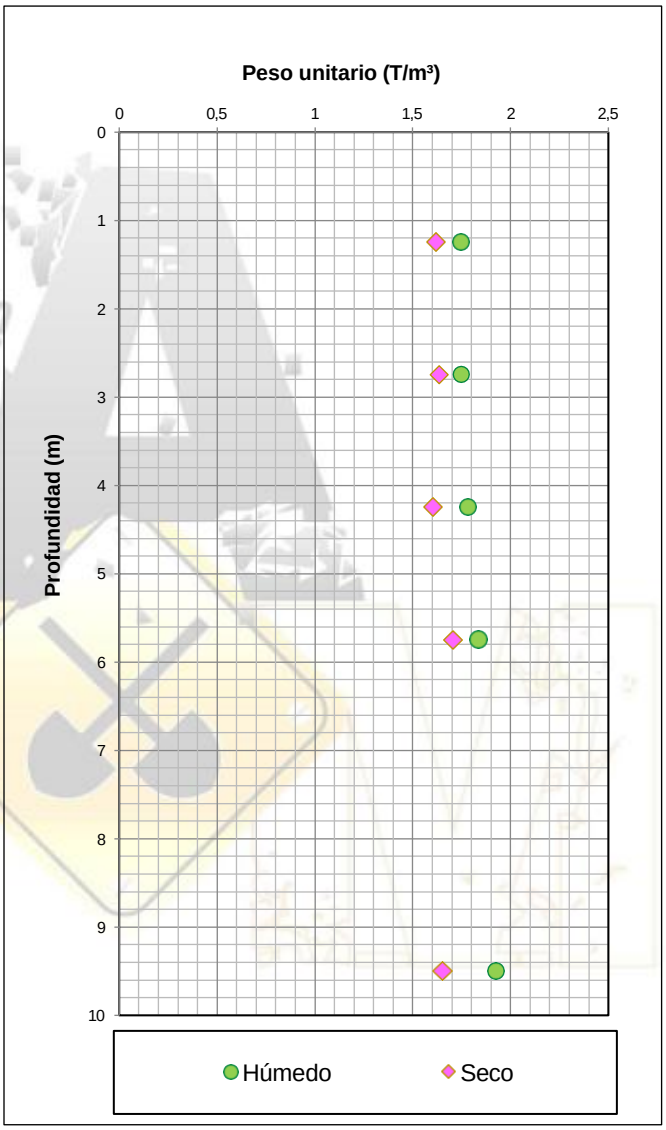


Ilustración 33. Peso específico seco y húmedo
Fuente: Girmava, 2022

- **Ensayo de Penetración Estándar**

Se tomó como referencia, el número de penetración estándar (N45), obtenido en campo durante la etapa de investigación del subsuelo. En la ejecución del ensayo SPT, se utilizó un martillo de 140 Lb y un muestreador de tipo cuchara partida (Split Spoon). El material presenta un N45 que se encuentra entre 22 golpes/pie y 50 golpes/pie.

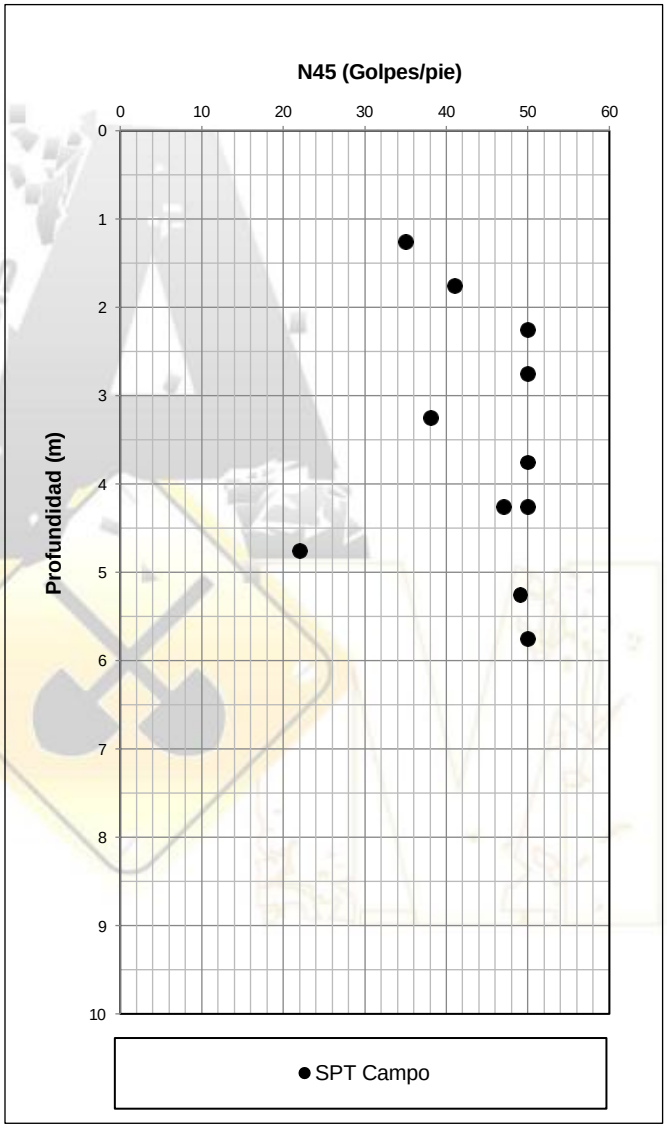


Ilustración 34. Ensayo de Penetración Estándar
Fuente: Girmava, 2022

9.1 PARÁMETROS DE RESISTENCIA

Para la selección de los parámetros de diseño, dentro de lo que refiere al modelo geológico – geotécnico, se optó por emplear toda la información disponible referente a lo que comprende la exploración directa e indirecta, con el fin de agrupar esta información por formación geológica y así estimar los parámetros para cada uno de ellos, en función de la topografía y demás factores propios de la zona.

A continuación, se presentan los parámetros de diseño adoptados bajo las diferentes consideraciones, empleando el criterio de falla de Mohr Coulomb, teniendo en cuenta la estabilidad global del sistema y teoría de equilibrio límite (F.S ≈1.0) y el criterio de falla de Hoek-Brown en función de la resistencia a la compresión inconfinada de la roca, de esta manera, a partir de información secundaria se modela cada escenario.

9.1.1 Material 1: Arena arcillosa (SC)

Para la estimación de parámetros para esta formación se emplearon los ensayos de penetración estándar SPT ejecutados en los materiales propios de esta formación, con el objeto de estimar un ángulo de fricción interna efectivo y una cohesión efectiva por medio de correlaciones, ver Ilustración 35.

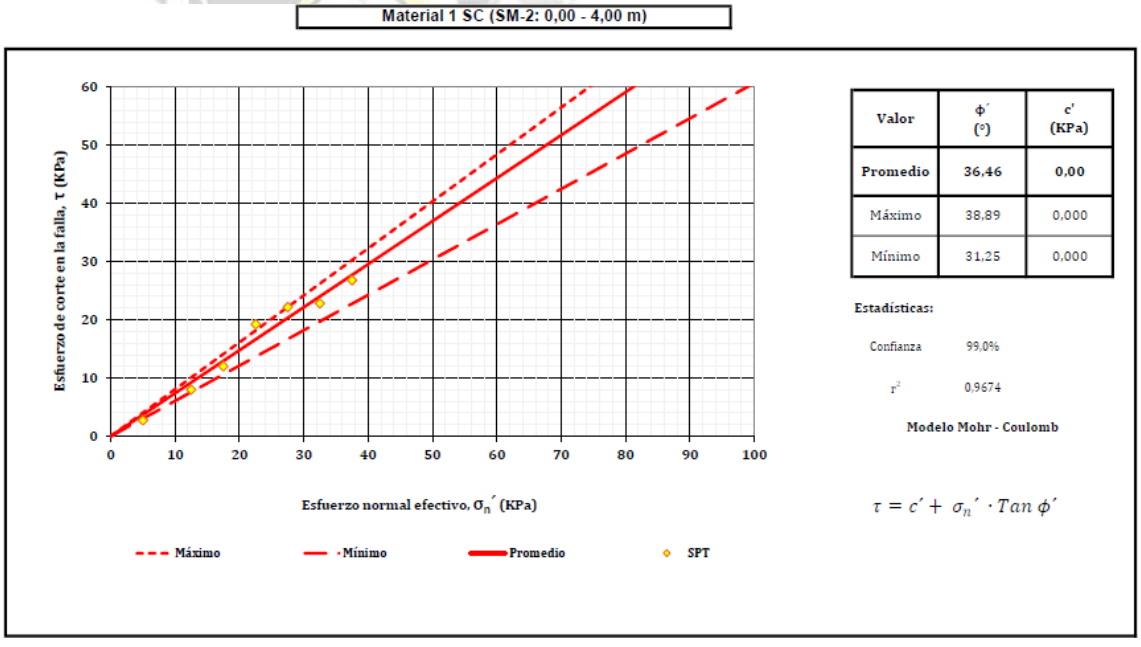


Ilustración 35. Ensayos de SPT
Fuente: Girmava, 2022

9.1.2 Material 2: Arena limosa (SM)

Para la estimación de parámetros para esta formación se emplearon los ensayos de penetración estándar SPT ejecutados en los materiales propios de esta formación, con el objeto de estimar un ángulo de fricción interna efectivo y una cohesión efectiva por medio de correlaciones, ver Ilustración 36.

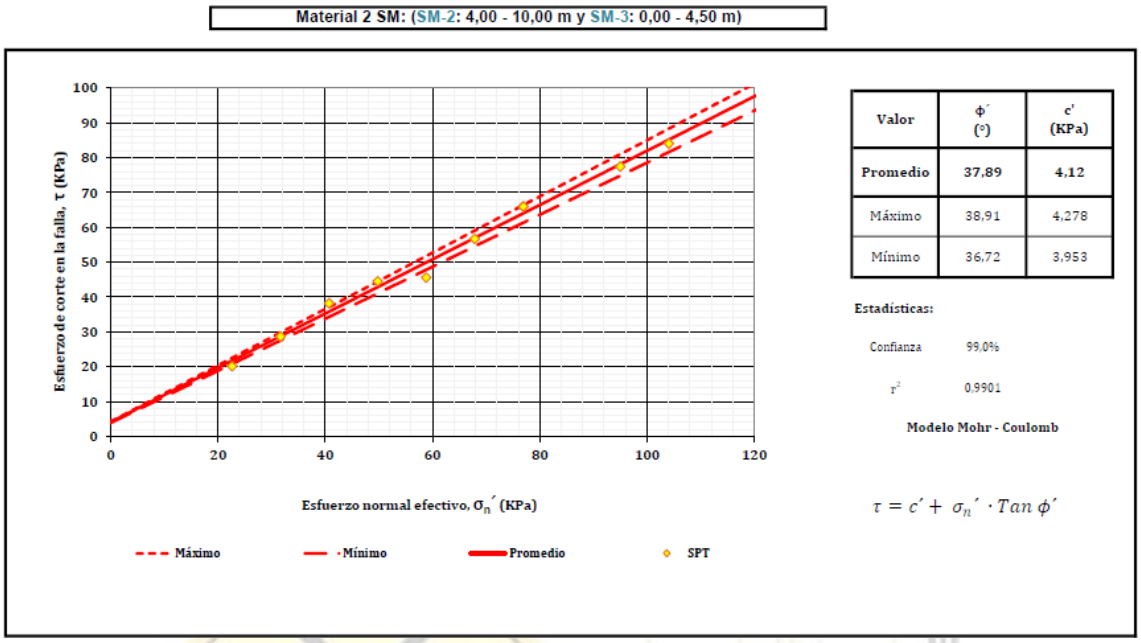


Ilustración 36. Ensayos de SPT
Fuente: Girmava, 2022

9.1.3 Roca blanda Formación seca

Para el cálculo de los parámetros de resistencia de la unidad geológica formación seca correspondiente a la roca que aflora a lo largo del cauce de la Quebrada Los Muertos se empleó el software RocLab, el cual permite estimar las propiedades de los macizos rocosos tomando como criterio de falla la envolvente de rotura de Hoek-Brown.

Los valores de entrada D, GSI, mi y sigci se describen en el numeral 7.2.3 Parámetros de resistencia en roca, a partir de estos, el programa calcula las constantes s, a y mb y se obtienen los parámetros de resistencia equivalentes de Mohr-Coulomb.

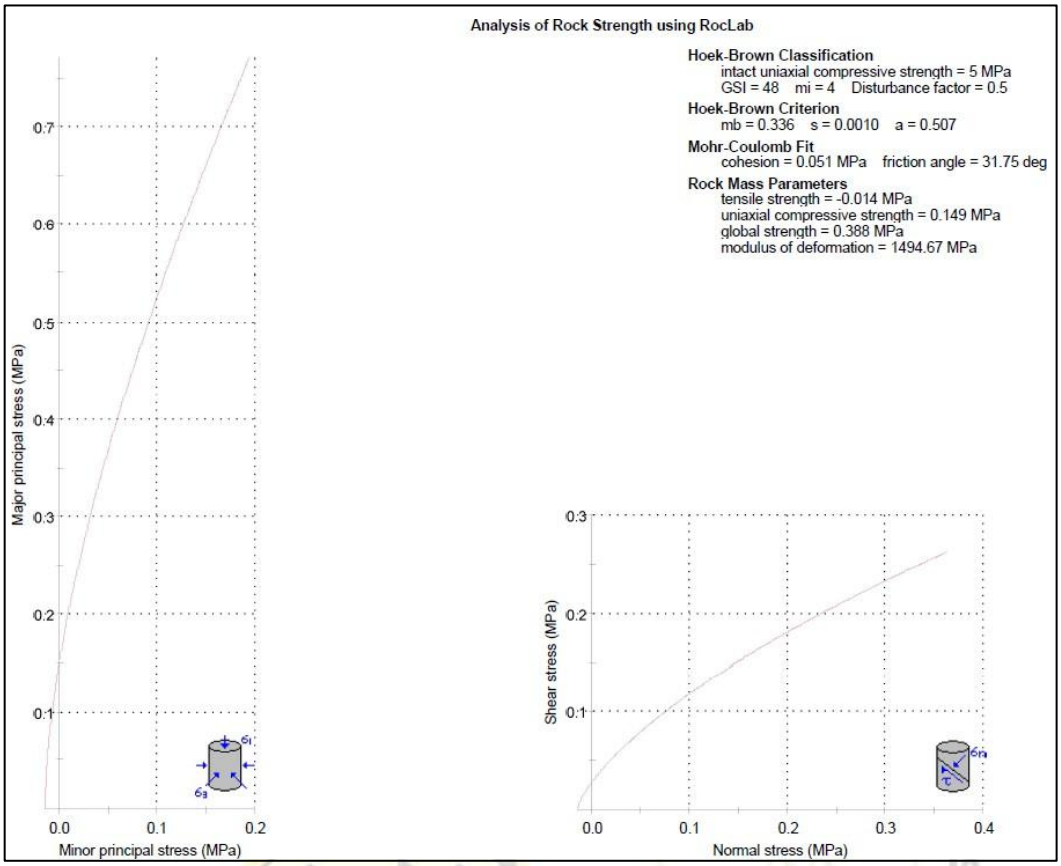


Ilustración 37. Parámetros de resistencia Formación seca Roca blanda
Fuente: Girmava, 2022

9.1.4 Parámetros de diseño adoptados

De acuerdo con la geología local y lo observado en campo, se evidencia que el material que aflora a lo largo del cauce de la Quebrada Los Muertos corresponde a un macizo rocoso, por lo tanto, para caracterizar el material de fundación donde se implantarán las obras se adoptan los parámetros calculados a partir del software RocLab para la Roca blanda de la Formación Seca, Rb-K2E1s.

A continuación, se presenta la tabla resumen de los parámetros obtenidos para el material caracterizado y para el material de relleno seleccionado que se dispondrá en el trasdós de los muros.

Tabla 28. Parámetros de resistencia de diseño

Material	γ(kN/m³)	c’ (kPa)	ϕ°
Rb-K2E1s	26.0	51.0	32.00
Relleno seleccionado	18.0	2.00	30.00

Fuente: Girmava, 2022

10 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Con el fin de estimar las condiciones de equilibrio límite, se ha realizado la evaluación de los perfiles de análisis con la implantación de las obras propuestas para las Alternativas de diseño, efectuando modelos en estado actual (estático) y ante evento extremo (seudo estática), presentándolos de manera detallada a continuación:

10.1 ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

El tipo de análisis implementado para este proyecto considera las fuerzas necesarias para llevar a la falla y generar desequilibrio de la estabilidad del talud, sin considerar la relación esfuerzo – deformación a través de las ecuaciones de equilibrio estático. El procedimiento de análisis se ha realizado para mecanismos de falla no circulares con equilibrio límite propuesto por Morgenstern and Price´s (1965). El modelo de Morgenstern and Price´s asume que la resistencia al corte entre el deslizamiento, se encuentran relacionadas directamente con la fuerza normal como:

$$X = \lambda f_{(x)} E$$

Donde X y E son las fuerzas verticales y horizontales entre el deslizamiento, λ es el factor de escala, y f(x) es una función asumida que ha prescrito valores en cada superficie de deslizamiento. El método de Morgenstern and Price´s presenta asume que:

- La resistencia al corte en las rebanadas se encuentra relacionada con la fuerza normal al interior de la rebanada dada por la ecuación anterior.
- La posición de la fuerza normal (N) sobre la base del deslizamiento es asumida, usualmente en el centro de la base.
- La ecuación de equilibrio satisface sumatoria de momentos con respecto a cualquier punto, la sumatoria de fuerzas en dirección horizontal, sumatoria de fuerzas en sentido vertical, para un total de 3 ecuaciones.
- Las incógnitas resueltas por este método son el factor de seguridad (F), factor de escala de las fuerzas de inclinación dentro de la rebanada (λ), la fuerza normal sobre la base del deslizamiento (N), fuerzas horizontales dentro de la rebanada (E), localización de las fuerzas dentro de la rebanada (resultante del empuje).

Adicionalmente en cuanto al factor de seguridad, se asume que:

- El factor de seguridad es constante a lo largo de la superficie de falla.

10.2 EVENTO EXTREMO

Se considera que, debido a la ocurrencia de un sismo, las aceleraciones traen consigo sobre la ladera movimientos del terreno que inducen fuerzas inerciales dentro del material que conforman el talud lo que proporciona un momento extra por sobrecarga, y posteriormente, la vibración trae consigo un incremento en la presión de poros sobre el talud, causando así la perdida de resistencia friccional. Con el fin de realizar el análisis de la condición dinámica de la ladera, se ha tomado la simplificación del modelo por equilibrio límite como un modelo seudo – estático, en donde las fuerzas inducidas por las aceleraciones de los sismos son tratadas como componentes horizontales (kh = 0.23). En donde la fuerza sísmica va a ser aplicada para cada una de las dovelas como:

$$F_h = KW = k(m \times g) = m\,(k \times g)$$

En donde:

Fh = Fuerza Horizontal

K = Coeficiente de Aceleración Sísmica

m = Masa de la dovela

g = Gravedad

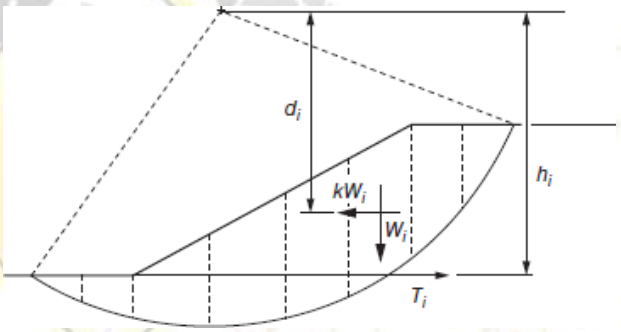


Ilustración 41. Diagrama de cuerpo libre del talud en condición seudo – estática
Fuente: de Duncan, 2014

Los factores de seguridad mínimos admisibles por parte de la normativa sismo resistente NSR – 10, se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos

Condición	FSBM		FSBUM	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00*	No se permite	No se permite

Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

Tomado de: NSR – 10

Para analizar el comportamiento del talud en eventos extremos se considera un valor de coeficiente sísmico horizontal (Kh) de 0.23, según se definió en el numeral 8.7 ACELERACIÓN PICO DEL SUELO, y para efectos de la modelación, de acuerdo a la literatura, se emplea un valor de coeficiente sísmico vertical (Kv) que corresponde a 1/2 del valor de Kh (Sarma & Scorer, 2009).

10.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GLOBAL CON OBRAS

El análisis de estabilidad de las obras se ha realizado a los perfiles de diseño de las abscisas K0+245.00 y una sección típica para la propuesta de Muro canal en caso tal que sea necesario implementar dicha alternativa, correspondientes a las secciones críticas del muro con las dos alturas que se manejan a lo largo de la Quebrada en el sitio de estudio (4.35m y 3.00m respectivamente). A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis realizado mediante el software comercial Slide V 6.0 en condición estática y seudo estática.

10.3.1 Perfil K0+245.00

- Condición estática

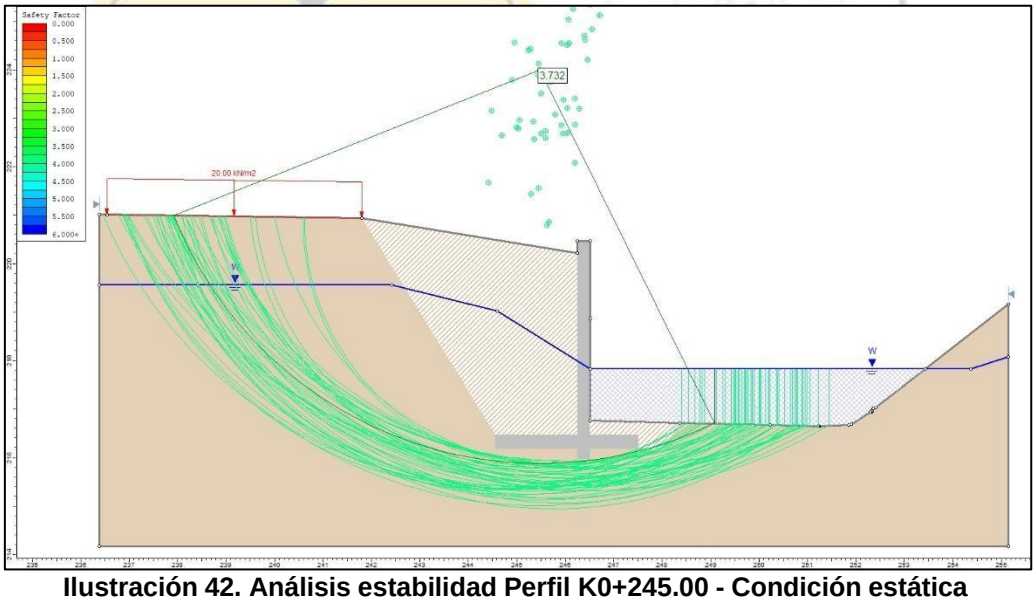


Ilustración 42. Análisis estabilidad Perfil K0+245.00 - Condición estática
Fuente: Girmava, 2022

- Condición seudo estática

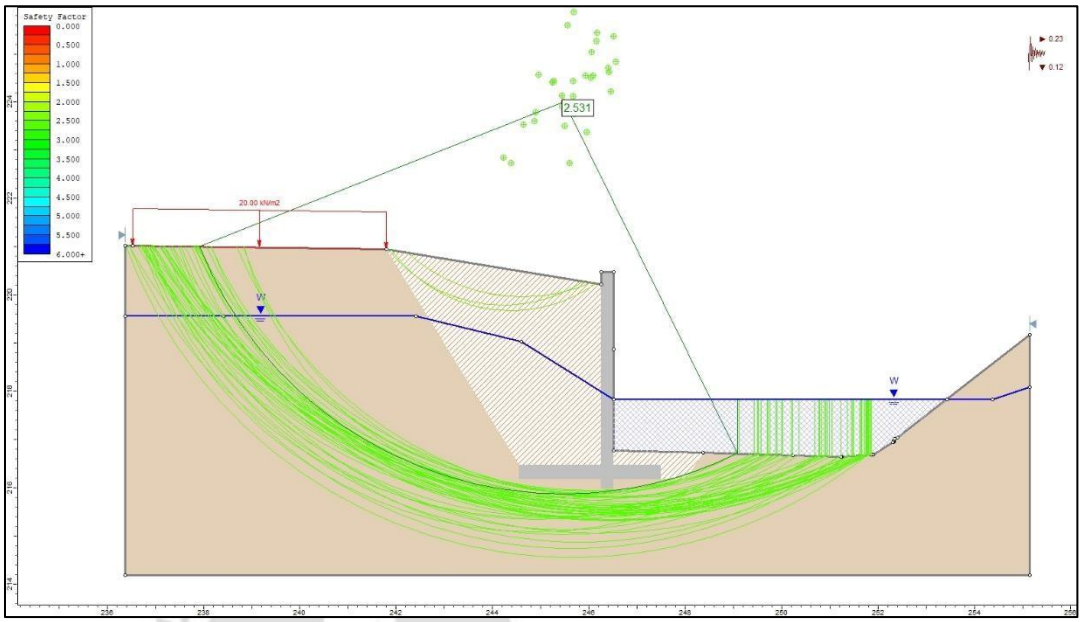


Ilustración 43. Análisis estabilidad Perfil K0+245.00 - Condición seudo estática
Fuente: Girmava, 2022

10.3.2 Perfil Muro Canal

- Condición estática

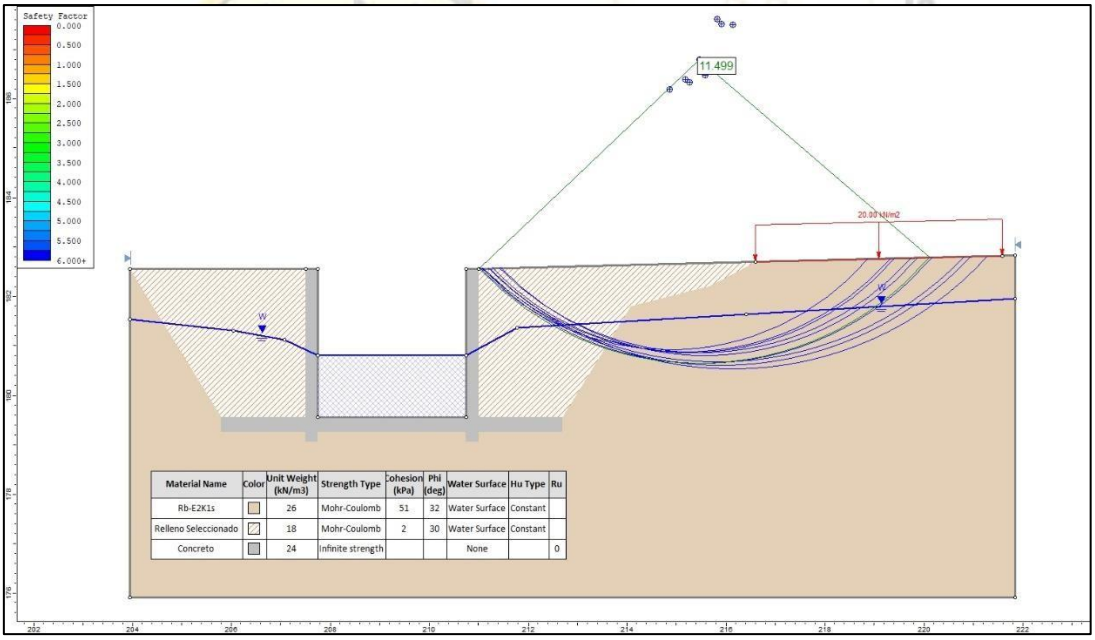


Ilustración 44. Análisis estabilidad Perfil Muro Canal - Condición estática
Fuente: Girmava, 2022

- Condición seudo estática

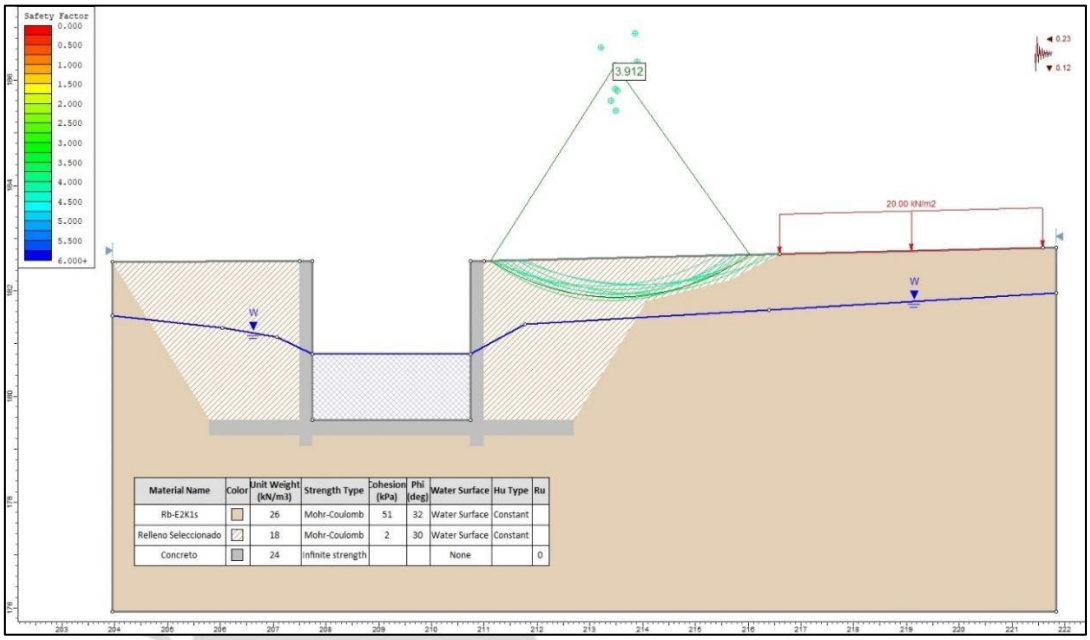


Ilustración 45. Análisis estabilidad Perfil Muro Canal - Condición seudo estática
Fuente: Girmava, 2022

10.3.3 Resultados análisis de estabilidad global

A continuación, se presenta el resultado de los análisis realizados para los perfiles de análisis bajo condición estática. Se evidencia que el factor de seguridad arrojado en el perfil de análisis del Muro Canal es de gran magnitud, sin embargo, esto se debe a que el talud resultante después del relleno de material no maneja una pendiente significativa, dando como resultado un terreno casi llano. De acuerdo con esto, los perfiles de diseño estarían cumpliendo con los factores de seguridad mínimos requeridos para garantizar la integridad del talud.

Tabla 33. Resumen Estado límite de resistencia

Perfil de análisis	FS Obtenido	F.S. Requerido	Check
K0+245.00	3.732	1.50	Cumple
Muro Canal	11.499	1.50	Cumple

Fuente: Girmava, 2022

Igualmente, ante la acción del sismo, con las obras propuestas los perfiles de análisis cumplen con el factor de seguridad requerido como se muestra a continuación.

Tabla 34. Resumen Evento extremo de resistencia

Perfil de análisis	FS Obtenido	F.S. Requerido	Check
K0+245.00	2.531	1.05	Cumple
Muro Canal	3.912	1.05	Cumple

Fuente: Girmava, 2022

10.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GLOBAL PROCESO CONSTRUCTIVO

El análisis de estabilidad de los taludes de excavación se ha realizado a los perfiles de diseño de las abscisas K0+245.00 y una sección típica para la propuesta de Muro canal, los cuales permitirán validar y precisar los taludes temporales de excavación de obra correspondientes a las secciones críticas del muro con las dos alturas que se manejan a lo largo de la Quebrada en el sitio de estudio (4.35m y 3.00m respectivamente).

10.4.1 Perfil K0+245.00

- Condición estática

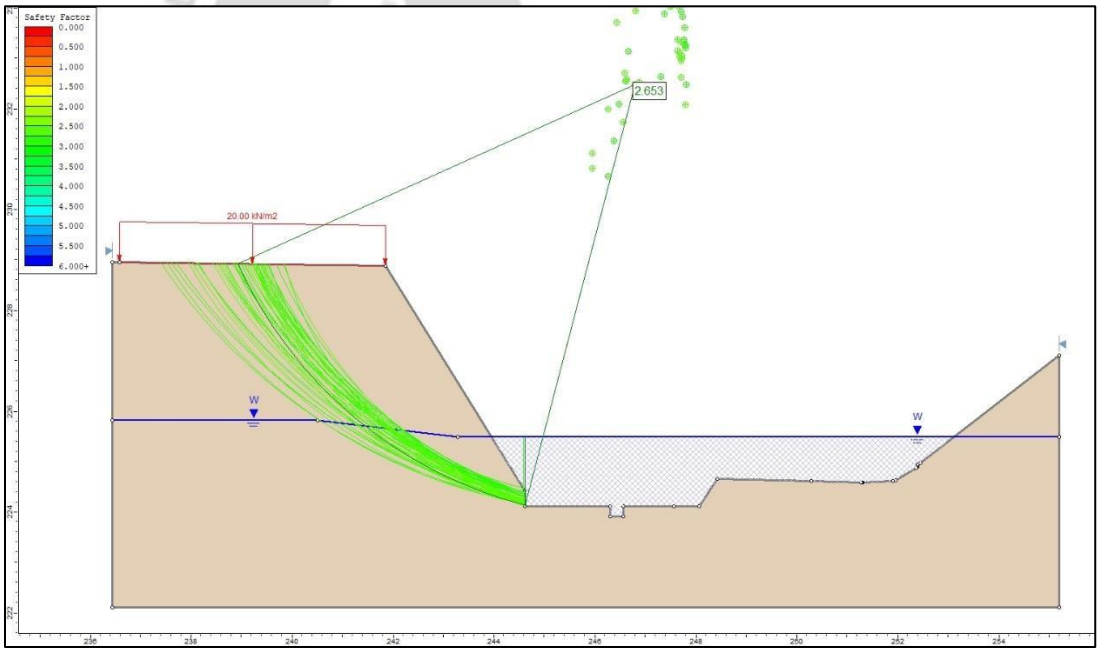


Ilustración 46. Análisis estabilidad Perfil K0+245.00 - Condición estática -Excavación
Fuente: Girmava, 2022

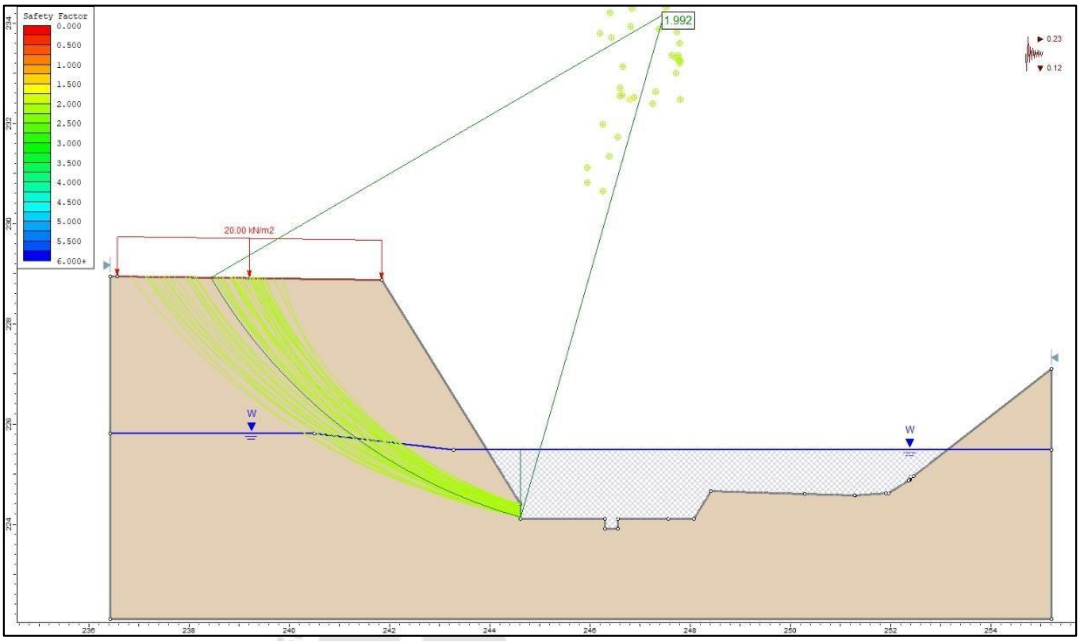


Ilustración 47. Análisis estabilidad Perfil K0+245.00 - Condición seudo estática- Excavación
Fuente: Girmava, 2022

10.4.2 Perfil Muro Canal

- Condición estática

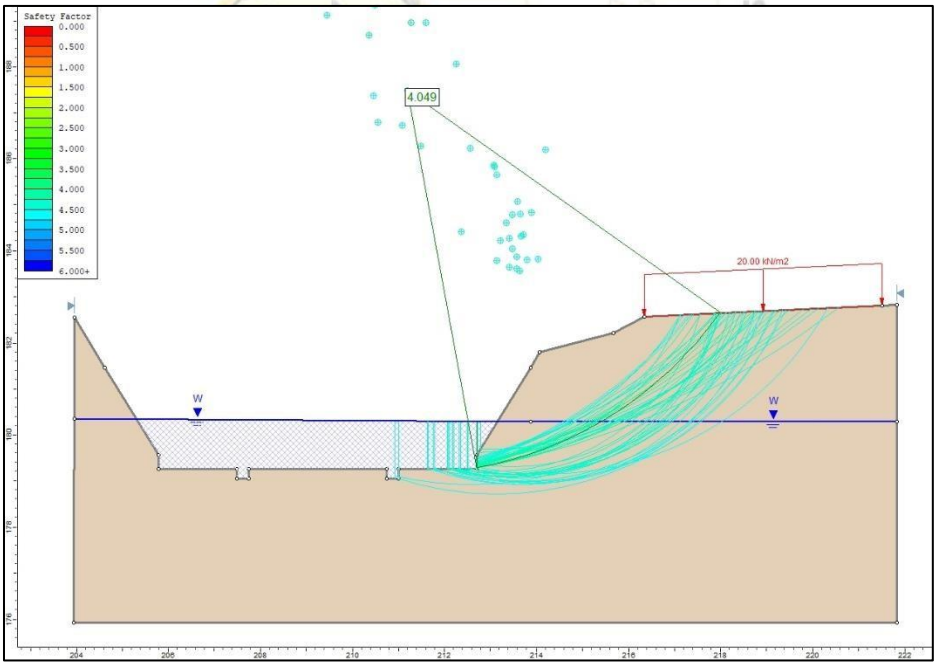


Ilustración 48. Análisis estabilidad Perfil Muro Canal - Condición estática - Excavación
Fuente: Girmava, 2022

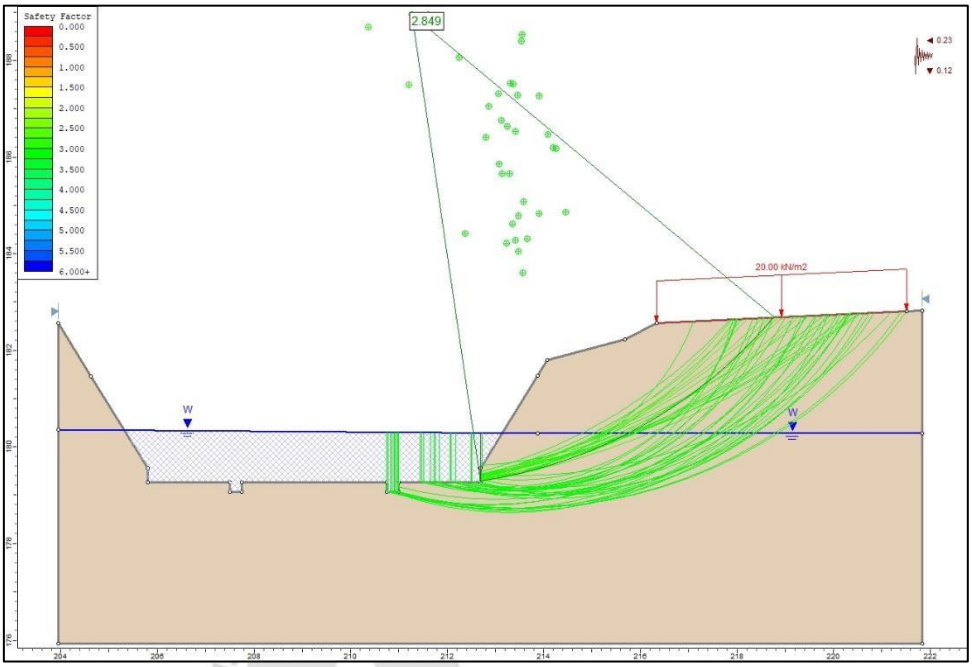


Ilustración 49. Análisis estabilidad Perfil Muro Canal - Condición seudo estática - Excavación
Fuente: Girmava, 2022

10.4.3 Resultados análisis de estabilidad global proceso constructivo

A continuación, se presenta el resultado de los análisis realizados para los perfiles de análisis de excavación bajo condición estática. De acuerdo con esto, los perfiles durante las actividades de excavación estarían cumpliendo con los factores de seguridad mínimos requeridos para garantizar la integridad del talud.

Tabla 35. Resumen Estado límite de resistencia - excavación

Perfil de análisis	FS Obtenido	F.S. Requerido	Check
K0+245.00	2.653	1.30	Cumple
Muro Canal	4.049	1.30	Cumple

Fuente: Girmava, 2022

Igualmente, ante la acción del sismo, durante el proceso constructivo los perfiles de análisis cumplen con el factor de seguridad requerido como se muestra a continuación.

Tabla 36. Resumen Evento extremo de resistencia - excavación

Perfil de análisis	FS Obtenido	F.S. Requerido	Check
K0+245.00	1.992	1.03	Cumple
Muro Canal	2.849	1.03	Cumple

Fuente: Girmava, 2022

11 PLANTEAMIENTO DE OBRAS

En función de lo observado en la visita de campo y las necesidades del proyecto, se establece que el objetivo principal es el diseño y construcción de obras para el control de cauce y mitigación de amenaza por inundación de la Quebrada Los Muertos en la zona urbana del municipio de la Plata, por lo tanto, a continuación, se describe la propuesta de obras

- Excavación, limpieza y corte de material

Movimiento de tierras en volúmenes grandes por medios mecánicos, necesarios para la ejecución de las actividades de construcción de muros y canal. Incluye el corte, carga y retiro de sobrantes. Los sobrantes se depositarán únicamente en los botaderos autorizados por la entidad competente del Municipio. La excavación y perfilado del terreno para implantación del canal y los muros se realizará manejando un talud de corte de 60° en ambos costados del cauce.

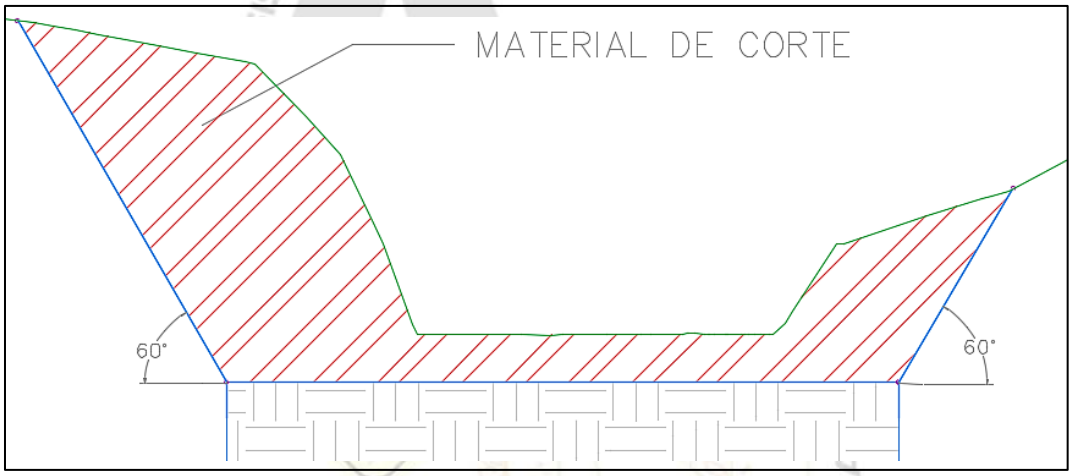


Ilustración 50. Esquema obras - talud de corte
Fuente: Girmava, 2022

- Muros en voladizo

Construcción de muros en voladizo de contención en concreto reforzado de 28 MPa manejando una profundidad de desplante de 0.35 m, el cual brindará apoyo lateral al suelo del talud y su estabilidad está en función de su peso propio y del peso del suelo de la base. Los muros estarán dotados de dos filas de lloraderos de 2” junto con un geodrén planar con tubería drenante de 4” de diámetro separado 0.20 m de la placa base como se muestra en la Ilustración 51. En el trasdós del muro se dispondrá material de relleno. Se proyectan dos muros aguas arriba de la canalización proyectada en la margen izquierda (K0+224 a K0+246) y sobre la margen derecha (K0+229 a K0+240)

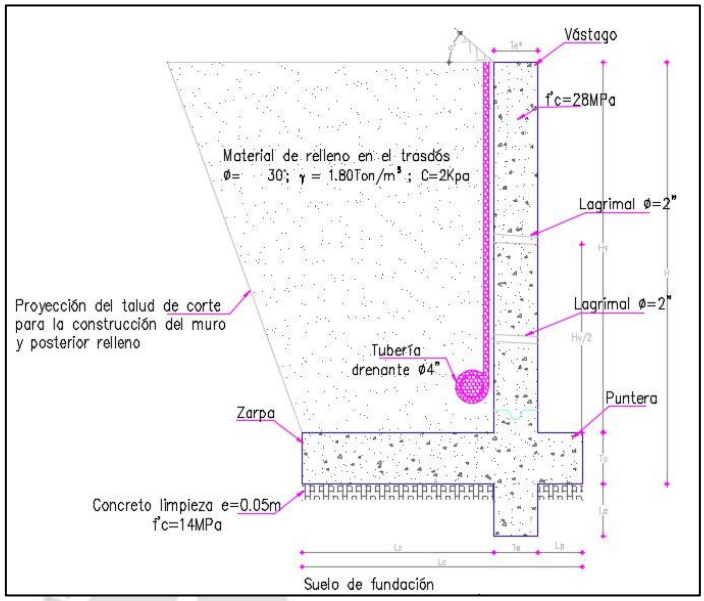


Ilustración 51. Esquema obras muro de contención en concreto
Fuente: Girmava, 2022

- Canal rectangular en concreto con geodrén planar

Entre las abscisas K0+260 – K0+700 se propone la construcción de un canal de sección cuadrada en concreto de 28 MPa de 3.0 m de base x 3.0 m de altura el cual cumplirá la función de direccionar y transportar las aguas lluvias y servidas; adicionalmente, se dispondrá un geodrén planar en el trasdós del muro con tubería de 4” de diámetro.

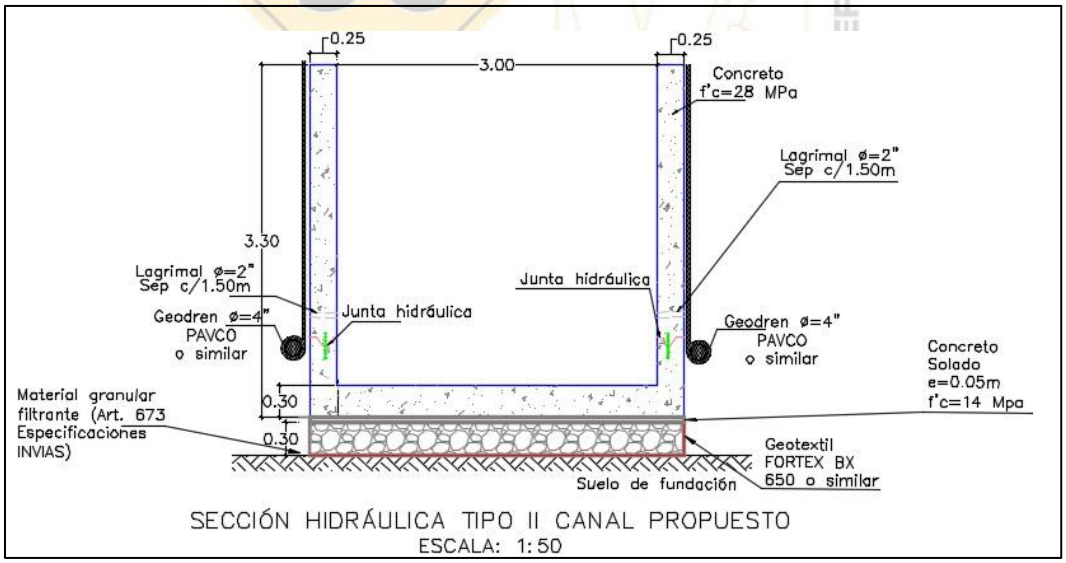


Ilustración 52. Esquema obras Canal rectangular
Fuente: Girmava, 2022

Bajo la sección del canal rectangular se debe disponer de un solado en concreto de resistencia a la compresión de 14MPa y espesor de 0.05m.

- Lloraderos

Teniendo en cuenta las condiciones y localización del proyecto, se emplearán una serie de lloraderos a lo largo de los muros, con el fin de abatir el nivel freático y liberar al muro de la sobrecarga generada hidrostáticamente, de esta manera, se recomiendan dos filas de lloraderos a 1.50 m y 2.50 m de distancia de la base del muro, separados cada 1.50 m.

- Material de relleno - Especificación art 220 INVIAS

Este trabajo consiste en la colocación en capas, humedecimiento o secamiento, conformación y compactación de los materiales adecuados provenientes de la misma excavación, de los cortes o de otras fuentes, para rellenos a lo largo de estructuras. Incluye, la construcción de capas filtrantes por detrás de los muros de contención, en los sitios y con las dimensiones señalados en los planos del proyecto.

- En el trasdós del muro

Entre el talud y el muro de contención se dispondrá de material de relleno seleccionado en el trasdós del muro para generar resistencia a los empujes de suelo, el cual corresponde a material de terraplén según el artículo 220 del INVIAS.

- Lecho filtrante con Geotextil de protección

Entre el contacto del suelo de fundación y el canal en concreto, instalar una capa de material filtrante de 0.30 m de espesor, recubierto con un geotextil tejido FORTEX BX 650 ó similar, que proporcione altas propiedades de filtración, drenaje, protección y resistencia al punzonamiento, conformado por material seleccionado que cumpla las características de los agregados exigidos para este fin según el artículo 673 de las normas y especificaciones del INVIAS.

De acuerdo con la normatividad, el material granular drenante debe estar constituido por fragmentos duros y resistentes a la acción del intemperismo, sin requerir ninguna gradación especial y debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Agregados con partículas angulares y/o redondas de tamaño entre 3” y ¾”.
- Material libre de materia orgánica y de partículas finas

Tabla 37. Requisitos del material granular drenante

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	VALOR
Dureza (O)		
Desgaste en la máquina de los Ángeles (%)	E-219	≤ 40
Durabilidad (O)		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos - Sulfato de sodio (%) - Sulfato de magnesio (%)	E-220	 ≤ 12 ≤ 18
Limpieza (F)		
Terrones de arcilla y partículas deleznables, máximo (%)	E-211	0.25
Partículas livianas, máximo (%)	E-221	1.0
Contenido de materia orgánica (%)	E-121	0

Fuente: Normas y especificaciones INVIAS - Artículo 673, 2012

- Box Culvert

Se realizará la adecuación hidráulica de la intersección entre la quebrada y la calle 11A, entre las abscisas K0+570 – K0+580, por medio de la construcción de un Box Coulvert de sección rectangular de 3.5m de base x 3.0 m de alto, para dar paso a un caudal de 30.64 m3/s de manera que la lámina de agua generada tenga una altura de 1.5 m, la construcción de la base y paredes son en concreto impermeabilizado de 4000 PSI que conforman la estructura de Box Coulvert. Adicionalmente, se realizará la reconformación de la vía por medio de terraplenes de aproximación conformados por muros de tierra armada.

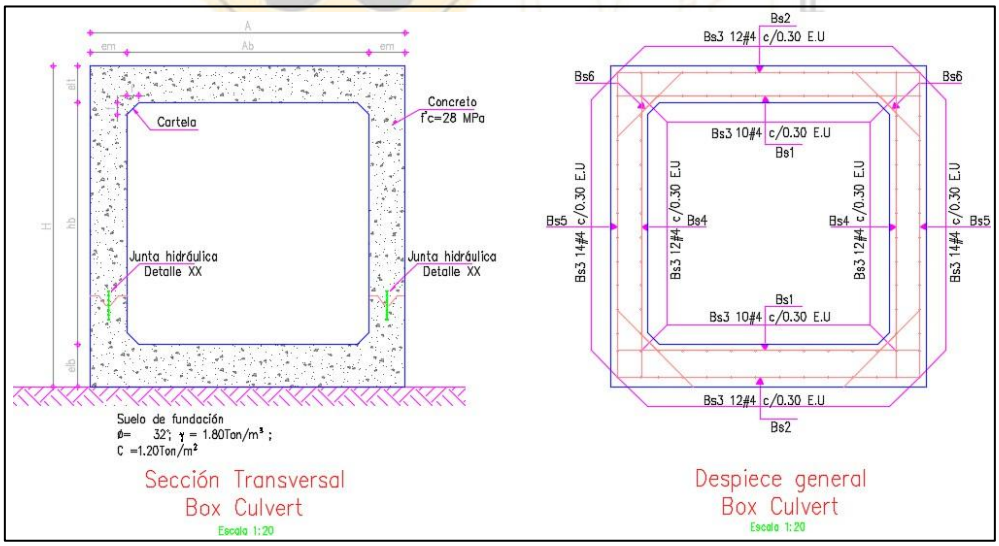


Ilustración 53. Detalle Box Coulvert
Fuente: Girmava, 2022

- Obra de protección hidráulica contra socavación

Se propone una protección contra la socavación compuesta por una capa de 0.50 m de espesor de rajón con piedra de 0.5, sobre la cual se instalará una colchoneta reno de 0.20 como obra hidráulica de mitigación para disipar la energía del flujo de agua en las obras de drenaje, se constituye como un canal cuyo diseño geométrico garantiza la disminución de la velocidad del recorrido de las aguas, para evitar afectaciones a viviendas aledañas.



Ilustración 54. Imagen de referencia colchón reno
Fuente: Zhongdi, 2022

12 CONCLUSIONES

Con base a los análisis realizados, se han establecido las siguientes conclusiones en el presente documento:

- El sitio de estudio se encuentra localizado al norte del municipio de La Plata (departamento del Huila) en el barrio San Rafael y corresponde al tramo K0+220 – K0+700 de la Quebrada Los Muertos.
- El objetivo del documento es presentar el diseño geotécnico de las obras de contención y control de cauce de la Quebrada Los Muertos, que comprenden muros en voladizo de concreto reforzado, canalización y construcción de un Box Coulvert.
- De acuerdo con los registros históricos recopilados mediante el sistema de información de movimientos en masa (SIMMA), se ha establecido que no existen reportes de movimientos en masa en el área de trabajo y de influencia del sitio de estudio.
- La geología ha sido establecida mediante la geología regional correspondiente a la plancha geológica 366 “Garzón”, presentada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Geológicamente se han identificado que el área de estudio se encuentra en inmediaciones del cauce del río La Plata, en medio de la Formación Seca (KPgs) conformada por areniscas, lutitas y arcillolitas.
- Para la caracterización del subsuelo se tomaron como referencia los sondeos más próximos a la zona, ejecutados durante la realización del Estudio del AVR del municipio de La Plata (2017): SM-2 y SM-3 de 10.0 y 15.0m de profundidad respectivamente contó con las siguientes perforaciones:

NOM	COORDENADAS		PROF. (m)
	N	E	
SM-02	756539.986	1131532.352	10.00
SM-03	756813.530	1132376.665	15.00

- Como parámetros sísmicos se ha tomado como referencia la normativa sismorresistente NSR – 10, con la cual se ha logrado establecer los siguientes parámetros:
  - Aa : 0.25
  - Perfil de suelo (más crítico) C
  - Fa : 1 .15
  - Sa (talud) : 0.23

- De acuerdo con las condiciones observadas durante la visita de campo y las cuales se soportan a través del registro fotográfico presentado al interior del informe en la Ilustración 9, se evidenció que a lo largo de la Quebrada Los Muertos aflora material rocoso perteneciente a la Formación seca ubicado sobre el cauce y las márgenes del cuerpo hídrico.
- Para el modelo geológico geotécnico propuesto se relacionaron los sondeos con lo observado en la visita de campo y las formaciones geológicas identificadas en la zona de estudio y se definió que el material que aflora a lo largo del cauce de la Quebrada Los Muertos corresponde a un macizo rocoso denominado como “Roca blanda Formación Seca (Rb-K2E1s)”, para el cual se definieron los parámetros de resistencia equivalentes de Mohr-Coulomb a partir del software RocLab, que se basa en el criterio de rotura de Hoek-Brown. Igualmente, se adoptaron parámetros típicos para el material de relleno seleccionado, a continuación, se presentan los parámetros definidos:

Material	γ(kN/m³)	c’ (kPa)	ϕ°
Rb-K2E1s	26.0	51.0	32.00
Relleno seleccionado	18.0	2.00	30.00

- Se realizó la verificación de la estabilidad local de las obras de contención proyectadas de acuerdo con la metodología propuesta por el Código Colombiano de Puentes CCP-14, para las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

MURO	MURO VOLADIZO	MURO CANAL
FS Deslizamiento estático	2,09	1,99
FS Deslizamiento seudo estático	1,44	1,38
FS Volcamiento estático	14,98	11,52
FS Volcamiento seudo estático	8,13	6,15
Capacidad portante	Cumple	Cumple
Asentamientos	Cumple	Cumple

- La verificación de la estabilidad global se ha realizado mediante el método de Morgernstern & Price (1965), aplicado a los perfiles de diseño considerando la implementación de las obras previstas, con el cual se han estimado los siguientes factores de seguridad:

Perfil de Análisis	Estático	Seudo – Estático
K0+245.00	3.732	2.531
Muro Canal	11.499	3.912

- La verificación de la estabilidad global se ha realizado mediante el método de Morgernstern & Price (1965), aplicado a los perfiles de diseño considerando las excavaciones requeridas para la construcción de las obras proyectadas. Se han estimado los siguientes factores de seguridad:

Perfil de Análisis	Estático	Seudo – Estático
K0+245.00	2.653	1.992
Muro Canal	4.049	2.849

- A partir de los análisis de estabilidad presentados y los criterios adoptados en la revisión, se concluye que los perfiles analizados con las obras de contención y canalización implantadas cumplen con los factores de seguridad mínimos exigidos por la normatividad colombiana NSR – 10 para las condiciones estática y seudo estática.

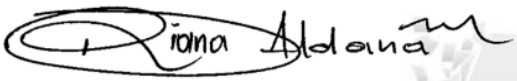
- Como alternativa propuesta para mitigar los efectos negativos por inundación y controlar el cauce de la quebrada Los Muertos, se plantea el corte de sección a lo largo del tramo de intervención, manejando un talud de corte de 60° para la implantación de muros en voladizo de concreto reforzado de 28 MPa con lloraderos de 2" separados cada 1.50m y un geodrén planar en el trasdós del muro.

- Entre las abscisas K0+260 – K0+700 se hará una canalización con sección rectangular en concreto reforzado conformando una sección cuadrada del canal de 3.00 m x 3.00 m y se dispondrá material de relleno seleccionado entre la sección y el material natural. Entre el contacto del suelo de fundación y el canal de concreto se debe instalar una capa de lecho filtrante de 0.30 m de espesor, conformado por material seleccionado que cumpla las características de los agregados exigidos en el artículo 673 de las normas INVIAS, recubierto con un geotextil tejido FORTEX BX 650 o similar.

- En el sector de intersección entre la calle 11A y la quebrada, comprendido entre las abscisas K0+570 – K0+580 se implantará un box Culvert de 3.50 m de base y 3.0 m de altura, para permitir el paso libre del cauce y del tráfico, parta esto se debe hacer una reconformación de la vía por medio de terraplenes de aproximación en tierra armada.

13.1 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un estudio de ronda de cauce bajo adoptando el decreto 2245 de 2017 basado en la “Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia”, considerando que se encuentran muchos predios ubicados dentro de la zona de ronda los cuales deberían ser reubicados para evitar interferencia con el desarrollo de las obras ingenieriles propuestas para controlar el cauce y así disminuir el riesgo de afectación a la población vulnerable.



DIANA ALEJANDRA ALDANA MENDEZ
Especialista en ingeniería de fundaciones