



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Geotécnica

**CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS
PARA LAS CIMENTACIONES ESPECIALES EN LA AVENIDA DEL FERROCARRIL, ENTRE
LAS ZONAS 6 Y 17, CIUDAD DE GUATEMALA, GUATEMALA**

Ing. Ernesto Iván Marroquín Muñoz

Asesorado por el: MSc. Ing. Sergio Antonio Castellanos López

Guatemala, septiembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS
PARA LAS CIMENTACIONES ESPECIALES EN LA AVENIDA DEL FERROCARRIL, ENTRE
LAS ZONAS 6 Y 17, CIUDAD DE GUATEMALA, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. ERNESTO IVÁN MARROQUÍN MUÑOZ

ASESORADO POR EL: MSC. ING. SERGIO ANTONIO CASTELLANOS LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Luzelly Zeledon
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS
PARA LAS CIMENTACIONES ESPECIALES EN LA AVENIDA DEL FERROCARRIL, ENTRE
LAS ZONAS 6 Y 17, CIUDAD DE GUATEMALA, GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 6 de Octubre 2021.



Ing. Ernesto Iván Marroquín Muñoz

LNG.DECANATO.OI.642.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA LAS CIMENTACIONES ESPECIALES EN LA AVENIDA DEL FERROCARRIL, ENTRE LAS ZONAS 6 Y 17, CIUDAD DE GUATEMALA, GUATEMALA**, presentado por: **Ernesto Iván Marroquín Muñoz**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Ingeniería geotécnica después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, septiembre de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, septiembre de 2022

LNG.EEP.OI.642.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA LAS CIMENTACIONES ESPECIALES EN LA AVENIDA DEL FERROCARRIL, ENTRE LAS ZONAS 6 Y 17, CIUDAD DE GUATEMALA, GUATEMALA”

presentado por **Ernesto Iván Marroquín Muñoz** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Ingeniería geotécnica** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**



Guatemala, 12 de mayo 2022

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que se ha revisado y APROBADO la siguiente TESIS DE GRADUACIÓN del alumno:

Carné: 100024573
Alumno: Ernesto Iván Marroquín Muñoz
Maestría: Geotécnica
Título de la
Investigación: CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA LAS CIMENTACIONES ESPECIALES EN LA AVENIDA DEL FERROCARRIL, ENTRE LAS ZONAS 6 Y 17, CIUDAD DE GUATEMALA, GUATEMALA

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sin otro particular

Vo. Bo. Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador Área Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, 12 de mayo de 2022

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado la siguiente **TÉSIS DE GRADUACIÓN** del alumno:

Carné: 100024573
Alumno: Ernesto Ivan Marroquin Muñoz
Maestría: Ingeniería Geotécnica
Título de la Investigación: "CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA LAS CIMENTACIONES ESPECIALES EN LA AVENIDA DEL FERROCARRIL, ENTRE LAS ZONAS 6 Y 17, CIUDAD DE GUATEMALA, GUATEMALA".

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Asimismo, se hace constar que el asesor colaboró *ad honorem* con el estudiante para la elaboración de dicho trabajo.

Sin otro particular



SERGIO A. CASTELLANOS LÓPEZ
Msc. Geotécnica / Ingeniero Civil
CoL CIG No. 11959

MSc. Ing. Sergio Antonio Castellanos López
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por la vida, salud, amor, sabiduría y fortaleza.
Mis padres	Rómulo Francisco Marroquín Fino y María Marcela Muñoz García, por su amor y apoyo incondicional.
Mi hermano	Francisco Marroquín Muñoz, por inspirar a través de su talento y brindar una visión diferente por medio de su arte. Siempre entendimos que para todos la luz, para todos todo, para nosotros la alegre rebeldía, para nosotros nada.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrir sus puertas y brindar las bases al conocimiento con excelencia.
Facultad de Ingeniería	Por ser el medio y proveedor de conocimientos en este proceso.
Mi asesor	MSc. Ing. Sergio Antonio Castellanos López por la orientación y ayuda que me brindó en el estudio de investigación.
Catedráticos	Por compartir sus conocimientos e instrucción profesional.
Ing. Armando Fuentes Roca	Por su apoyo y consejos para impulsarme a seguir adelante.
Ing. Geol. Carlos Leonel Pérez Arias	Por su contribución a este estudio de investigación.
Amigos	Lcda. Deris Velásquez y Geol. Luca Bertoldi por la dedicación y apoyo incondicional en la formación de este estudio de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXIII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXV
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Bases teóricas	3
1.2.1. Geología.....	3
1.2.2. Formación geológica.....	3
1.2.3. Taludes	3
1.2.4. Geomorfología	4
1.2.5. Geotecnia.....	5
1.2.6. El suelo y su origen.....	5
1.2.6.1. Clasificación de los suelos	7

1.2.7.	Rocas.....	8
1.2.7.1.	Clasificación de las rocas.....	8
1.2.8.	Cimentaciones	9
1.2.8.1.	Tipos de cimentaciones	10
2.	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	13
2.1.	Geología regional	13
2.1.1.	Altiplano volcánico	14
2.1.2.	Unidades geológicas.....	15
2.1.2.1.	Unidad de calizas.....	15
2.1.2.2.	Unidad de rocas volcánicas	16
2.1.2.3.	Unidad de piroclastos.....	18
2.2.	Geología estructural	19
2.3.	Geología local	22
2.3.1.	Geomorfología.....	22
2.3.1.1.	Hidrografía	23
2.3.2.	Sustrato del área de estudio	24
3.	MARCO METODOLÓGICO	25
3.1.	Reconocimiento geológico-geotécnico.....	25
3.2.	Ortofotogrametría	25
3.3.	Exploración de campo	26
3.3.1.	Calicatas a cielo abierto.....	27
3.3.2.	Sondeos geotécnicos.....	31

3.3.2.1.	Perforaciones rotativas con intervalos de ensayo de penetración dinámico (SPT).....	32
3.4.	Ensayos de laboratorio	35
3.4.1.	Clasificación de los suelos	35
3.4.1.1.	Análisis granulométrico por el método mecánico (ASTM D421, D422 y AASHTO T87, T88).....	36
3.4.1.2.	Límites de consistencia (ASTM D4318)	37
3.4.2.	Ensayos de corte de laboratorio.....	39
3.4.2.1.	Corte directo (ASTM D3080, AASHTO T236)	39
3.4.2.2.	Triaxial (AASHTO T234, ASTM D2850)	42
3.4.3.	Ensayos índice complementarios.....	44
3.4.3.1.	Contenido de Humedad (ASTM D2216, AASHTO T265).....	44
3.4.3.2.	Gravedad específica (ASTM D854, AASHTO T100)	45
4.	RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	47
4.1.	Resultados del reconocimiento geológico.....	47
4.1.1.	Fotointerpretación	47
4.1.2.	Perfil del sustrato	48
4.2.	Resultados de exploración geotécnica	49
4.2.1.	Registro de exploración en la aproximación de zona 6...	51
4.2.2.	Registro de exploración en la aproximación de zona 17.	53
4.3.	Resultados de ensayos de laboratorio.....	55
4.3.1.	Resultados de ensayos de clasificación e índice	55

4.3.2.	Resultados de ensayos de resistencia al corte	58
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
5.1.	Análisis del reconocimiento geológico.....	59
5.1.1.	Análisis de la incidencia de la actividad antrópica	62
5.2.	Análisis de los parámetros geotécnicos	63
5.3.	Análisis de los parámetros físicos	66
5.3.1.	Análisis de los parámetros complementarios indicativos	69
5.4.	Análisis de parámetros de resistencia al corte	69
5.5.	Análisis de cimentaciones especiales	70
	CONCLUSIONES.....	71
	RECOMENDACIONES	73
	REFERENCIAS.....	75
	APÉNDICE.....	83
	ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Procesos de meteorización	6
2.	Mapa fisiográfico de Guatemala.....	14
3.	Geología del área de estudio (1:250,000)	15
4.	Vista del alto estructural de calizas que afloran al norte de la zona de estudio.....	16
5.	Vista del afloramiento de basaltos.....	17
6.	Vista del relleno de piroclastos en el entorno de la Calzada la Paz ...	18
7.	Tectónica Regional de Guatemala	19
8.	Geología estructural del área de estudio (1:250,000)	21
9.	Vista panorámica en donde se delinearán las unidades geomorfológicas	22
10.	Ortofotogrametría de la zona de estudio (1:1,500).....	23
11.	Columna estratigráfica del área de investigación	24
12.	Ortofotomosaico del área de estudio.....	26
13.	Método directo con calicata a cielo abierto.....	27
14.	Recuperación de muestra inalterada.....	28
15.	Calicata o pozo a cielo abierto con excavadora	29
16.	Muestra inalterada cubierta con parafina	30
17.	Recuperación de muestra alterada	30
18.	Equipo de perforación rotativa con recuperación continua.....	34
19.	Tubería para ensayo dinámico de penetración estándar	34
20.	Testigo o muestra recuperada.....	35
21.	Serie de tamices para análisis granulométrico	36

22.	Equipo de Casagrande para ensayo de límite líquido.....	38
23.	Ensayo para el límite plástico	39
24.	Equipo para ensayo de corte directo	40
25.	Medición de espécimen de ensayo de corte directo	41
26.	Equipo para ensayo Triaxial.....	43
27.	Equipo para ensayo de gravedad específica	45
28.	Fotointerpretación del área de estudio (1:1,500)	48
29.	Sustrato del área de estudio (1:10,000).....	49
30.	Ubicación de las exploraciones de zonas 6 y 17	50
31.	Registro de exploraciones de zona 6.....	52
32.	Registro de exploraciones de zona 17.....	54
33.	Mapa morfológico y pendientes de las zonas 6 y 17 (1:1,500)	61
34.	Carta de plasticidad de Casagrande para resultados de zona 6.....	67
35.	Carta de plasticidad de Casagrande para resultados de zona 17.....	68

TABLAS

I.	Sistema de clasificación del perfil de meteorización de los suelos	7
II.	Clasificación de suelos utilizados en el estudio	37
III.	Distribución de exploraciones de zonas 6 y 17	50
IV.	Perfil general de textura y color, aproximación de zona 6.....	52
V.	Perfil general de textura y color, aproximación de zona 17.....	54
VI.	Resultados de ensayos para clasificación de suelos, aproximación zona 6	55
VII.	Resultados de ensayos, aproximación zona 6.....	56
VIII.	Resultados de ensayos para clasificación de suelos, aproximación zona 17.....	57
IX.	Resultados de ensayos, aproximación zona 17.....	57
X.	Resultados de ensayos de resistencia al corte	58

XI. Clases de pendiente, procesos esperados y la condición del terreno	62
.....	
XII. Registros de SPT para aproximación de zona 6	64
XIII. Registros para aproximación de zona 17	65
XIV. Número de golpes para estimar la cohesión y fricción de los suelos	66
.....	

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Φ	Ángulo de fricción interna
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro al cuadrado
C	Compactación
H	Contenido de humedad
C	Cohesión
T	Esfuerzo de corte
σ	Esfuerzo normal
E	Exploración
F.S	Factor de seguridad
°C	Grados Celsius
kg	Kilogramo
km	Kilómetros
km ²	Kilómetros cuadrados
kN	Kilonewton
lb	Libra
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
m	Metro
m s.n.m.	Metro sobre el nivel del mar
mm	Milímetro
M	Muestra
γ	Peso específico

px

Píxel

%

Porcentaje

s

Segundo

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
Actividad antrópica	Acción o intervención realizada por el ser humano.
AGIES NSE	Normas de seguridad estructural por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
Aluvión	Sedimentos arrastrados por una corriente de agua, que quedan depositados en un terreno.
Ángulo de rozamiento interno	El ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento, a lo largo de un plano, y la fuerza normal "P" aplicada a dicho plano. Es un ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un conjunto de material granular.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
Caliza	Roca sedimentaria formada principalmente por carbonato de calcio y que se caracteriza por presentar efervescencia por acción de ácidos diluidos en frío.

Cohesión	Cualidad por la cual las partículas de suelo se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas.
Denudacionales	Corresponde a rocas volcánicas extrusivas tipo balsaltos, generando geoformas alomadas.
Escarpe	Pendiente o inclinación pronunciada de un terreno.
Falla geológica	Son roturas en las rocas a lo largo de la cual ha tenido lugar a desplazamiento por un movimiento. Origen de estos movimientos son fuerzas tectónicas en la corteza terrestre, cuales provocan roturas en la litosfera.
Fricción interna	Resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad. Los suelos granulares tienen fricciones internas altas por tener superficies de contacto mayores, los suelos finos las fricciones internas bajas.
Granulometría	Es la relación de porcentajes, en peso, de los distintos tamaños de grano que se encuentra en un suelo, determinados por tamizado, sedimentación, u otros medios.
<i>In situ</i>	Designa un método o técnica que se utiliza o tiene lugar en el mismo emplazamiento de la obra.

Límites de consistencia	Son las fronteras entre los diferentes estados de los suelos, como estado seco, semilíquido y líquido.
Límite líquido	Es el estado de frontera entre el estado semisólido y líquido del suelo.
Límite plástico	Es el estado entre el estado seco y semilíquido del suelo.
Ortofotomosaico	Mosaico de fotografías aéreas ortogonales georeferenciadas correspondiente a una superficie.
Piroclásticos	Fragmento sólido de material volcánico que a partir de la erupción de un volcán llega a la atmosfera y luego cae sobre la superficie.
Tenacidad	Capacidad que tiene un suelo para resistir elongaciones.
PRA	Sistema de clasificación AASHTO.
SUCS	Sistema unificado de clasificación de suelos.
SPT	Ensayo de penetración estándar.

RESUMEN

Entre el barranco de la zona 6 y 17 de la ciudad de Guatemala se construyó el Puente de Las Vacas, nombrándose así por la vertiente Norte de la cuenca del río Las Vacas desembocando hacia el río Motagua. El propósito del puente fue la conexión del paso del ferrocarril desde la ciudad de Guatemala hacia Puerto Barrios, Izabal, construyéndose en el gobierno del presidente Manuel Estrada Cabrera entre los años 1906 y 1908.

Debido al crecimiento demográfico poblacional y en conjunto con los cambios económicos, la necesidad de vivienda como también enlazar los barrancos con obras civiles es cada vez más frecuente en la ciudad, por lo que el objetivo de este estudio fue determinar la caracterización de las unidades geológicas y parámetros geotécnicos para las cimentaciones especiales en la avenida del ferrocarril, entre las zonas 6 y 17, ciudad de Guatemala.

El valle de la ciudad está formado por una depresión tectónica, caracterizado por tres unidades geológicas que son calizas, rocas volcánicas y piroclastos, en donde se han determinado localmente cuatro niveles de tefras diferenciadas por letras H, T, C y L, aunque los eventos de mayor magnitud son las tefras L y T que cubrieron extensas áreas del valle de la ciudad, por lo que presentan grandes espesores productos de actividades volcánicas explosivas. Con lo anterior y en base a los parámetros geotécnicos determinados y de acuerdo a la clasificación del tipo de suelo de la tabla A-1, sección de anexo A de las Normas de Seguridad Estructural para Guatemala, publicadas por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica NSE 2.1 (AGIES

NSE 2.1, 2018) el sustrato en el área de estudio se clasifica como tipo D, con un perfil de suelo firme.

El perfil estratigráfico de la zona de estudio se determinó a través de parámetros geotécnicos, realizado con metodología de exploración en campo por medio de calicatas a cielo abierto y sondeos rotativos continuos, en conjunto con la interpretación de análisis de ensayos de laboratorio. En base a lo anterior se pueden definir los tipos de cimentaciones especiales.

Para excavaciones futuras para el emplazamiento de las cimentaciones deberán estar en función a los análisis de estabilidad del talud, para evitar deslizamientos o desprendimientos, con la mitigación o soluciones permanentes.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

Contexto general

En la ciudad de Guatemala, la urbanización ha incrementado de manera que las personas están construyendo en zonas de riesgos como barrancos y laderas, cada vez es más común la tendencia de viviendas populares y marginales escaseando el uso de suelo para futuras proyecciones de infraestructura. Las mismas se cimientan en formaciones de geometrías y formaciones dispersas en estratos variables de las estructuras geológicas.

Descripción del problema

La falta de una ejecución e información de la caracterización geológica para la cimentación de la infraestructura vial, específicamente en la avenida del ferrocarril, entre las zonas 6 y 17, ciudad de Guatemala, pueden dar como resultado; riesgos geológicos como erosión, manejo de escorrentías y desprendimientos de laderas, al momento de diseñar un proyecto de emplazamiento. Por lo que, la investigación geológica y geotécnica juegan una parte fundamental para una correcta funcionabilidad y seguridad estructural de la obra.

Formulación del problema

El desarrollo de la geología y geotecnia proporcionan herramientas aplicables a diferentes realidades físicas de los problemas de ingeniería e

interpretar sus causas, que pueden ser naturales, pero también pueden ser el resultado de las acciones del ser humano. Esto encamina a la formulación de una pregunta principal:

¿Cuáles son las características geológicas y geotécnicas para el emplazamiento de la cimentación en la avenida del ferrocarril, entre las zonas 6 y 17, ciudad de Guatemala?

Al profundizar en la investigación, surgirán preguntas secundarias que requerirán ser contestadas:

- ¿Qué tipo de unidades geológicas son las que afloran en la zona de estudio?
- ¿Cuál es la incidencia de la actividad antrópica en la zona de estudio y de qué manera afecta?
- ¿Qué tipo de cimentación se podría recomendar según los tipos de esfuerzo cortante encontrados?

La falta de respuestas concretas a las interrogantes planteadas, sumado a la falta de información de la mecánica de suelos de la zona de estudio es necesario determinar los tipos de unidades geológicas para el correcto emplazamiento de la infraestructura en términos de seguridad, economía y la determinación de los parámetros geotécnicos para utilizarse en los análisis de estabilidad, excavaciones o cortes, estructuras de suelos y cimentaciones, partes fundamentales en todo análisis de la presente investigación.

Delimitación del problema

El área de estudio se ubica en la avenida del ferrocarril, entre las zonas 6 y 17, ciudad de Guatemala, Guatemala. Se realizará cuatro exploraciones de campo extrayendo muestras alteradas e inalteradas y se enviarán a un laboratorio aplicando los estándares de calidad.

La extracción de las muestras no se incluye en profundidades relevantes como lo son mayores a 20 metros, ya que los estudios de infraestructura regularmente no alcanzan estas dimensiones. Las unidades geológicas serán analizadas puntualmente sobre el modelo geológico del área de estudio.

Alcances y limitaciones del tema

El alcance de la investigación es exploratorio, por el interés de la caracterización geotécnica y exploraciones directas e indirectas para conocer las condiciones del terreno y del subsuelo para proporcionar parámetros geotécnicos. Es descriptivo, debido a que se evaluará variables de los resultados de los ensayos de laboratorio y correlacional ya que se medirán variables que se investigarán y comprobarán la relación de las mismas.

Durante el avance se plantea que con el reconocimiento de la geometría del terreno y en base a la unidad geológica identificada se caracterizará las propiedades geotécnicas.

La limitante del estudio de investigación es que abarca específicamente las aproximaciones de la zona 6 y 17, además en la ladera a media pendiente se deberán hacer exploraciones para determinar parámetros geotécnicos y realizar un análisis de estabilidad de talud para condiciones estáticas y sísmicas.

OBJETIVOS

General

Caracterizar geológica y geotécnicamente la avenida del ferrocarril, entre las zonas 6 y 17, ciudad de Guatemala, para el adecuado emplazamiento de la cimentación de las estructuras a construir.

Específicos

1. Determinar el tipo de unidades geológicas por medio de un mapa geológico estableciendo las zonas de riesgo.
2. Evaluar la incidencia de la actividad antrópica en la zona.
3. Analizar los esfuerzos cortantes a cada tipo de suelo.

HIPÓTESIS

La caracterización de las unidades geológicas y geotécnicas proporcionará parámetros de diseño de las cimentaciones a construir en la avenida del ferrocarril, entre las zonas 6 y 17, de la ciudad de Guatemala. El resultado de la caracterización y la variabilidad de los parámetros mecánicos influirán en la toma de decisiones para el diseño de cimentaciones de infraestructuras existentes y para futuros emplazamientos.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Tipos de estudio

La investigación presenta el siguiente alcance:

- Retrospectivo: Se procedió a recopilar y evaluar, seleccionando información bibliográfica, investigación científica y revisión de principales conceptos existentes, relacionado con la caracterización geológica y parámetros geotécnicos de la zona de estudio. Para la búsqueda y revisión bibliográfica se recurrió a la consulta de tesis, libros, revistas científicas, congresos y base bibliográfica buscada en internet y la consulta de especificaciones de las normas para efectuar los ensayos de laboratorio (Castellanos, 2015).
- Experimental: La variable dependiente evalúa la caracterización de las unidades geológicas. Extrayendo las muestras de los perfiles del suelo, por medio de exploraciones de campo (calicatas y sondeos) y la variable independiente evalúa las propiedades de los parámetros geotécnicos, mediante ensayos físicos y mecánicos de laboratorio.

“Una vez caracterizados los perfiles del suelo se trasladarán al laboratorio de mecánica de suelos para realizar los ensayos” (AGIES 2.1, 2018, p. 25) siguientes:

- Granulometría
- Límites de consistencia

- Corte directo
- Gravedad específica

El diseño de la investigación tiene un enfoque mixto, debido a que se analizarán las unidades geológicas para su respectiva caracterización, a través de una exploración en campo de las diferentes estructuras que afloran en la superficie; se evaluarán aspectos cualitativos como las características físicas, fracturas, geometría y orientación, así como, aspectos cuantitativos como las unidades geológicas en el área. Así mismo, se realizará una evaluación geotécnica para el muestreo de los materiales que conforman la zona de estudio, en el aspecto cualitativo se evaluará textura y color, en el cuantitativo como la resistencia de corte, cohesión, tenacidad, humedad y límites de consistencia.

Variables del estudio

Caracterización geológica (variable dependiente, cualitativa y cuantitativa)

Los indicadores cualitativos son:

- Características físicas
- Geometría
- Orientación

Los indicadores cuantitativos son:

- Número de unidades geológicas en el área

Propiedades de los parámetros geotécnicos (variable independiente, cualitativa y cuantitativa)

- Los indicadores de parámetros cualitativos son:
 - Textura
 - Color

- Los indicadores de parámetros cuantitativos son:
 - Resistencia al corte
 - Cohesión
 - Tenacidad
 - Humedad
 - Límites de consistencia

Fases de desarrollo de la investigación

- Primera fase (pre-campo): Se empezó analizando la compilación documental de temas relacionados con la evaluación geológica, geotécnica, geomorfológica y estratigrafía. Así como de estudios realizados en zonas aledañas anteriormente o de tipo similar. Y se procederá a la delimitación del área de estudio de investigación.

- Segunda fase (pre-campo): Se realizó un reconocimiento del tramo en estudio mediante recorridos para observar, describir e interpretar el relieve, afloramientos e información de obras de exploración actuales de la zona. Delimitando las unidades geológicas y geomorfológicas con el software ArcGIS, mediante el análisis de fotografías emitidas por satélite creando un ortofotomosaico con el uso de drone.

- Tercera fase (campo): Generación de la cartografía geológica y geomorfológica, levantamiento de perfiles de suelos por medio de

exploraciones con calicatas a cielo abierto y Ensayo de penetración estándar (SPT) de campo.

- Cuarta fase (post-campo): En la fase experimental se realizó el análisis cualitativo basado en los resultados de las pruebas de laboratorio, como la humedad, densidad, ángulo de fricción interna, cohesión, límite líquido, límite plástico, granulometría y clasificación según ASTM y AASHTO. Elaboración de perfiles de la estratigrafía del subsuelo con el análisis de la mecánica de suelos e información de campo (Muñoz y Corredor, 2018).
- Quinta fase (post-campo): Análisis cuantitativo y comparativo de los resultados de laboratorio y campo para determinar, evaluar e interpretar la geología, geomorfología del suelo de la zona de estudio. Se concluirá y recomendará con el fin de cumplir con las especificaciones del proyecto y necesidades de acuerdo a su importancia. Cumpliendo con las expectativas y objetivos planteados que sirvan de apoyo para futuras investigaciones y problemas similares.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala se ha observado que hay un crecimiento poblacional y el poco espacio geográfico se hace más recurrente al uso de áreas naturales como barrancos y bosques urbanos. En estas zonas consideradas de riesgo, se han construido proyectos habitacionales y segmentos de infraestructura vial. Desde el punto de vista geológico, es importante caracterizar geológica y geotécnicamente la avenida del ferrocarril, entre las zonas 6 y 17, ciudad de Guatemala, que pueda ayudar a tomar decisiones técnicas en futuros proyectos que se deseen desarrollar en esta área.

El sustrato de la ciudad de Guatemala tiene una consistencia firme y compacta, donde geológicamente las unidades volcánicas y los rellenos piroclásticos son competentes para el emplazamiento de obras de infraestructura, por lo que el estudio aporta conocimiento a través del comportamiento de la mecánica de suelos con base a la exploración, pruebas de campo de sondeo dinámico SPT y resultados de ensayos de laboratorio obtenidos de las muestras alteradas e inalteradas.

Los resultados de las unidades geológicas y parámetros geotécnicos en la zona de estudio pueden aplicarse a nuevas estructuras de obras civiles y ser utilizadas por entidades como la Municipalidad de Guatemala y entidades privadas. Siendo factibles y viables para tener un criterio de mitigación a los problemas geológicos para el correcto emplazamiento de la infraestructura en términos de seguridad y economía.

La determinación de los parámetros podrá utilizarse en los análisis de estabilidad, excavaciones o cortes, estructuras de suelos y cimentaciones. Se pondrán a disposición las conclusiones y recomendaciones del estudio de investigación.

La síntesis de la investigación se presenta a continuación:

- Capítulo 1: Se describen los antecedentes generales y bases teóricas de geología, geotecnia, geomorfología, talud, el suelo y su origen, principales tipos de suelos, rocas y tipos de cimentaciones.
- Capítulo 2: Se describe la zona de estudio, como la ubicación, entorno geológico regional, geología estructural y entorno geológico local.
- Capítulo 3: Descripción de la metodología de exploración de campo y laboratorio.
- Capítulo 4: Presentación de resultados de los ensayos realizados en la zona de estudio como las mediciones y pruebas de laboratorio.
- Capítulo 5: Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones geológicas y geotécnicas en base a lo obtenido del estudio de investigación.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes generales

La zona de estudio de investigación para la caracterización de las unidades geológicas y parámetros geotécnicos de las cimentaciones especiales, se ubica en la avenida del ferrocarril, entre las zonas 6 y 17, en el territorio geológico del Altiplano Norte de la ciudad de Guatemala.

La región del altiplano volcánico tiene un basamento de rocas de un arco volcánico, que se originó por la convergencia entre las placas de Norte América y la recién formada placa de Coco, en la época del Mioceno; está limitado al Norte por la falla Motagua, un alto estructural de rocas sedimentarias del Cretácico y una franja de rocas intrusivas y metamórficas y al Sur con la cordillera volcánica del cuaternario (Pérez, 2009).

El arco volcánico mantuvo actividad en el período Neógeno (épocas del Mioceno al Plioceno), pero en la época del Pleistoceno se inició un nuevo arco volcánico que mantiene su actividad hasta el presente y retribuye a la actual cordillera volcánica que corre paralela a la actual costa del Océano Pacífico (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, [INSIVUMEH], 2019).

En el nuevo arco ocurrieron varios eventos de actividad volcánica explosiva, que produjeron grandes volúmenes de materiales piroclásticos que cubrieron y en algunos casos sepultaron parcialmente el relieve del vulcanismo; las depresiones y zonas de bajo relieve fueron rellenadas por los materiales

piroclásticos y en las zonas de alto relieve se conserva la forma de las estructuras volcánicas, aunque existe una cubierta que puede tener hasta 25 metros de espesor, el cual disminuye hasta desaparecer, estimado en la cota 1600, generalmente en el techo de cada uno de los eventos de piroclastos existe un paleo suelo que es un limo café amarillento (Pérez, 2009).

Derivado de las condicionantes geológicas anteriormente expuestas, la ingeniería civil debe enfrentarse con diferentes e importantes problemas de la naturaleza del terreno y de su comportamiento.

Lambe y Whitman (2004) plantean que el terreno le sirve de cimentación para soportar estructuras y terraplenes; emplea al suelo como material de construcción; debe proyectar estructuras para la retención o sostenimiento del terreno en excavaciones y cavidades subterráneas y el suelo interviene en gran número de problemas particulares. (p. 15)

Para esto se debe emplear ensayos de laboratorio para determinar la caracterización del suelo.

La mecánica del suelo y la mecánica de rocas configuraron los principios de la moderna geotecnia, dentro del cual la ingeniería geológica representa la visión más geológica a la solución de los problemas constructivos. En la geotecnia se integran las técnicas de ingeniería del terreno aplicadas a las cimentaciones, refuerzo, sostenimiento, mejora y excavación del terreno y las citadas disciplinas de la mecánica del suelo, mecánica de rocas e ingeniería geológica. (González, Ferrer, Ortoño y Oteo, 2004, p. 2)

El proceso de ordenamiento territorial de la investigación se basa en la clasificación de unidades geotécnicamente homogéneas, que pueden abarcar diferentes edades geológicas (González, 2001).

1.2. Bases teóricas

Para la interpretación del estudio de investigación es importante conocer las siguientes definiciones y conceptos.

1.2.1. Geología

Se considera que “La geología se percibe como una ciencia que se realiza en el exterior y se basa en observaciones y experimentos llevados a cabo en el campo y luego al laboratorio” (Tarbuck y Lutgens, 2005, p. 1).

1.2.2. Formación geológica

Es una “Unidad fundamental en la clasificación estratigráfica para la delimitación y jerarquización de las rocas. Se designa su nombre dependiendo del tipo de roca dominante y de la localidad geográfica” (Red Sismológica Nacional [RSN UCR-ICE], 2015, p. 21).

1.2.3. Taludes

A “una superficie de suelo expuesto que se sitúa en un ángulo con la horizontal se le llama talud sin restricciones. La pendiente puede ser natural o construida” (Braja, 2006, p. 334).

Para determinar propiedades y características de taludes. Según (Pérez, 2014):

El análisis y estudio de las características de los taludes (ubicación, altura, tipo de suelo, pendiente, nivel freático, etc.), para identificar el nivel de amenaza de cada talud en la zona de estudio y, a su vez, aportar información del área como: uso de la tierra y vegetación, hidrología, fallas geológicas, factores antrópicos y urbanos. (Sección de introducción, p. XIX)

En la aplicación del modelo geológico y geotécnico es muy importante en la zona detectar los accidentes principales, como el control de la estabilidad, las formas en las cuales se produce rotura, el cual no soporta los esfuerzos a los que se encuentra sometidos, debido inicialmente a su propia debilidad por la filtración de aguas, intensa fracturación por efecto del peso y la voladura realizada en la zona de estudio y lo que se asocia a deslizamientos menores y luego generalizándose en el fallamiento a favor de superficies curvas atendiendo a la mecánica de modelo discontinuo o estado elástico del material. (Quea, 2016, pp. 5-6)

1.2.4. Geomorfología

Estudia la formación superficial terrestre, descubre su origen y su comportamiento. Un modelo geomorfológico es el resultado de un balance dinámico que cambia en el tiempo (Lugo, 2018).

1.2.5. Geotecnia

Dentro de la ramas de la ingeniería “La geotecnia investiga características naturales del sitio incorporando técnicas de ingeniería, para reforzar, sostener un emplazamiento de una cimentación” (González et al., 2004, p. 2).

Otros autores han afirmado lo siguiente:

La Geotecnia es parte de la geología aplicada, investiga propiedades naturales de materiales rocosos pertenecientes a la corteza terrestre, siendo parte en el diseño de construcciones (de autopistas, presas, unidades habitacionales, edificios, puentes, vías férreas, etc.). (Servicio Geológico Mexicano, 2017, párrafo 1)

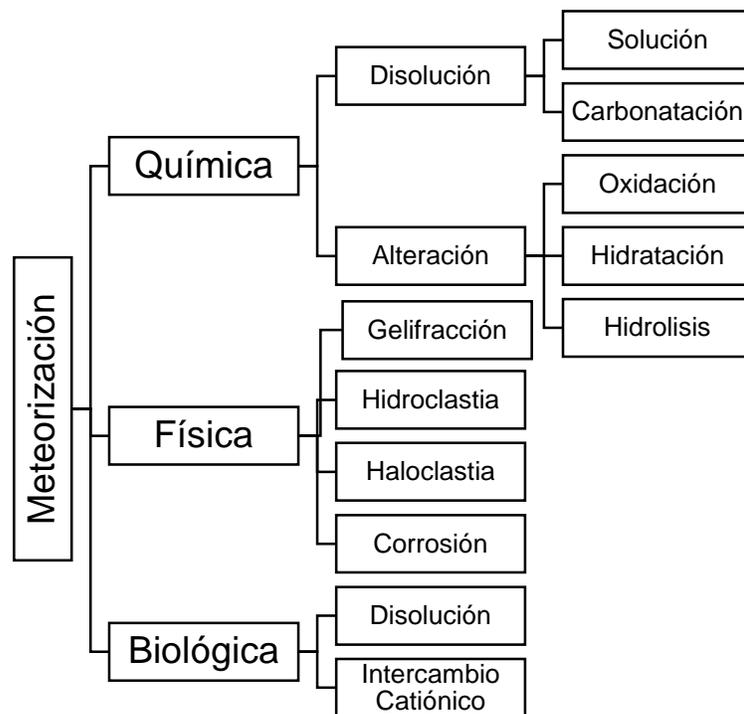
Es importante tener presente que en el país los suelos y la geología pueden cambiar muy rápidamente de un área a otra, por tal razón, siempre deben realizarse los estudios de suelos. No se puede suponer que un suelo es similar a otro, si se hiciera esto, se corre el riesgo de construir sobre un material que no es adecuado, teniendo como consecuencia el daño o colapso de la estructura. (Acevedo, 2016, Sección de resumen, p. XIV)

1.2.6. El suelo y su origen

Los “suelos cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de las rocas, o sea los suelos inorgánicos, y suelos cuyo origen es principalmente orgánico” (Crespo, 2004, p. 21).

Gil (2018) aporta que dentro del campo de la geotecnia es común hablar de la mecánica de suelos y su importancia en las diversas aplicaciones que esta tiene dentro de la ingeniería civil. Es importante tener presente que los suelos son depósitos de los productos secundarios de la meteorización de la corteza rocosa (p. 18). El resultado de este proceso se observan en la figura 1.

Figura 1. **Procesos de meteorización**



Fuente: Agudelo. (2012). *Influencia de los procesos de meteorización en la estructura del suelo y la estabilidad de taludes.*

Se representan en la Tabla I, un sistema de clasificación de los “fenómenos de disgregación (alteración o meteorización) y transformación de la roca” (González et al., 2004, p.18), utilizados en Hong Kong.

Tabla I. **Sistema de clasificación del perfil de meteorización de los suelos**

Grado	Descomposición	Detalles del diagnóstico en las muestras
VI	Suelo	No aparece textura reconocible de roca. Las capas superficiales pueden contener materia orgánica y raíces
V	Completamente descompuesta	Roca Completamente descompuesta pero aun aparece la textura de la roca ligeramente reconocible
IV	Muy descompuesta	Pedazos grandes que pueden ser destruidos con las manos
III	Moderadamente descompuesta	Pedazos grandes que no pueden ser destruidos con las manos
II	Algo descompuesta	Aparece como roca sana, pero tiene manchas con muestras de descomposición
I	Roca sana	Roca inalterada

Fuente: Suárez. (2009). *Deslizamientos, Análisis Geotécnico*.

1.2.6.1. Clasificación de los suelos

Los tipos de suelos que se encuentran en los estudios de ingeniería civil, pueden presentar tamaños de granos o partículas diferentes. Según González et al. (2004) son los siguientes:

- **Gravas:** tienen un tamaño de 8 a 10 cm y de 2 mm; se pueden observar directamente, por la inactividad de la superficie y su gran tamaño de poros entre partículas, no retienen el agua.
- **Arenas:** tienen un tamaño de 2 y 0,60 mm, se pueden observar sin dificultad, y tienen la característica que si en su superficie se aplica una

carga, se comprime inmediatamente; se originan del material rocoso al ser triturados artificialmente.

Y según Crespo (2004) también pueden ser:

- Limos: tienen un tamaño de 0.05 mm y 0.005 mm, son finos con poca o ninguna plasticidad, cuando son sueltos y saturados no es permisible cargas por zapatas y cuando no se encuentran en su estado denso no se puede cimentar.
- Arcillas: con tamaños menores a 0.005 mm son sólidas cristalinas en forma laminar, tiene la característica que cuando se unen con el agua pueden ser plásticas, tienen propiedades químicas como silicato de alúmina hidratado, silicatos de hierro y magnesio hidratados.

1.2.7. Rocas

Para nuevas infraestructuras es necesario evaluar físicamente las propiedades de las rocas para soportar adecuadamente una cimentación (Acevedo, 2016).

Tarbuck y Lutgens (2005) indican que los materiales rocosos abundan en el planeta al que pertenecemos. Al examinarlos con atención se observan cristales más pequeños denominados minerales.

1.2.7.1. Clasificación de las rocas

Guatemala tiene tres tipos de afloramientos, según Tarbuck y Lutgens (2005) pueden ser:

- Rocas ígneas: cuando son fundidas se les denominan magma y cuando se enfrían pueden pasar a su estado sólido, adentro de la corteza pueden formarse niveles de profundidad. Cuando las propiedades de la ceniza permanecen calientes pueden fundirse y convertirse en una toba soldada.
- Rocas sedimentarias: se forman a partir de material rocoso preexistente por el método de meteorización.
- Rocas metamórficas: se transforman física y químicamente por el ambiente en que se encuentren, cuando hay altas presiones y temperaturas, se forman a partir de uniones de los afloramientos anteriormente expuestos incluso con ellas mismas.

1.2.8. Cimentaciones

En Guatemala para caracterizar una cimentación de infraestructura, es necesario hacer un análisis en el área de estudio. Según Hernández y Santamarta (2015) “el estudio geotécnico es el encargado de aportar las características físico mecánicas del terreno. Su realización se hace imprescindible a la hora de diseñar la cimentación que más se adecue a sus características” (p. 115).

Las dimensiones de los soportes son en función de la carga permisible y de la naturaleza del sitio. Una cimentación genera y transmite a un sitio diferentes presiones que coincidan con su resistencia y deformación (González et al., 2004).

1.2.8.1. Tipos de cimentaciones

Se realiza una cimentación para el emplazamiento de la estructura de acuerdo a sus características y propiedades, estas pueden ser superficiales o directas y profundas o indirectas (AGIES NSE 2.1, 2018).

- Cimentaciones superficiales: “Reparten las cargas de un plano de apoyo horizontal. Habitualmente, este tipo de cimentación se construye a poca profundidad bajo la superficie” (González et al., 2004, p. 395).

Las cimentaciones superficiales pueden ser de dos tipos:

- Zapatas: “Se utilizan en suelos homogéneos y de media a alta resistencia a la comprensión. Para su construcción se utiliza concreto armado. Su función principal es transmitir al terreno las cargas que le provoca la estructura” (Acevedo, 2016, p. 14).

Existen diferentes tipos de zapatas en donde las “columnas separadas se utilizan las aisladas; para dos columnas cercanas, zapatas combinadas; para hileras de columnas o muros, zapatas corridas” (Acevedo, 2016, p. 14).

- Losas: “Es una placa flotante apoyada directamente sobre el terreno. Como losa está sometida principalmente a esfuerzos de flexión. El espesor de la losa será proporcional a los momentos flectores actuantes sobre la misma” (Rivera, s.f., p. 7).
- Cimentaciones profundas: Según Barba et al. (2017) una cimentación profunda puede ser:

Cuando la superficie del suelo muestra poca capacidad de carga y la compresibilidad del suelo es alta para las cargas requeridas de una estructura. Pueden soportar cargas de tensión en estructuras altas, esbeltas o sujetas a momentos de volteo producto del viento o sismos. (p. 1)

Las cimentaciones profundas pueden ser de dos tipos según Barba et al. (2017):

- Pilotes: “son los elementos que se fabrican en el exterior del suelo. Los pilotes pueden ser de madera, o bien de acero o concreto reforzado o presforzado u otras” (p. 1).
- Pilas: “se construyen directamente en el suelo, agregando acero de refuerzo y concreto” (p. 1).

Generalmente las cimentaciones profundas incrementan el costo de una construcción ya que las capas superficiales del subsuelo no son capaces de soportar el peso de la estructura, por ejemplo los sitios desfavorables (AGIES NSE 2.1, 2018).

2. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

2.1. Geología regional

La Unidad de Políticas e Información Estratégica y Programa de Emergencia por Desastres Naturales (UPIE-MAGA y MAGA-BID, 2001) señala que Guatemala, tiene una superficie geográfica de 108,889 kilómetros cuadrados y su ubicación es entre los paralelos de 13° 49' a los 18° 30' de latitud Norte y entre los meridianos 87° 30' a 92° 13', al Oeste de Greenwich. Limita al Oeste y al Norte con México, al Este con el Océano Atlántico y las Repúblicas de Honduras y el Salvador y al Sur con el Océano Pacífico.

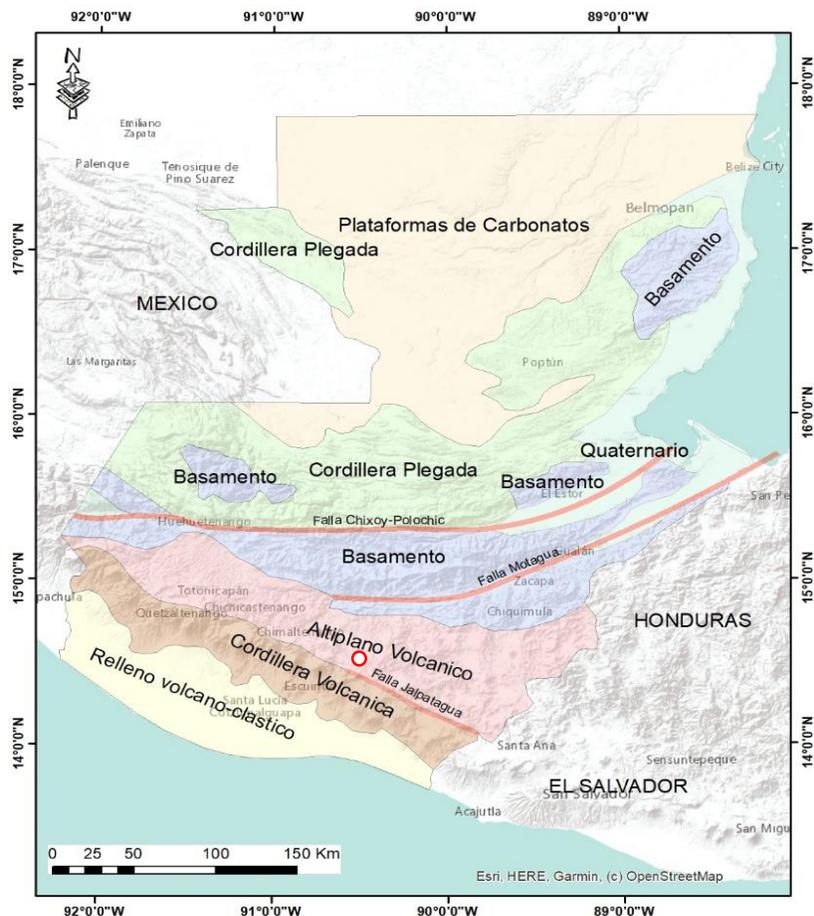
La UPIE-MAGA y MAGA-BID (2001) indican que su superficie está ubicada en el extremo sur del Sistema Montañoso del Oeste de América del Norte, es geológicamente compleja. Las diferentes regiones de formas de la tierra que corresponden a Guatemala están, por lo tanto, íntimamente relacionados a los procesos y desarrollo geológico, propios del complejo montañoso. (p. 1)

Según el Instituto Geográfico Nacional (IGN, 1974) “en el país se distinguen cuatro Provincias Geológicas, que, desde el sur del país hacia el norte, se denominan como: Planicie Costera del Pacífico; Tierras Volcánicas; Cordillera Central y Tierras Bajas de Petén” (UPIE-MAGA y MAGA-BID, 2001, p. 1).

2.1.1. Altiplano volcánico

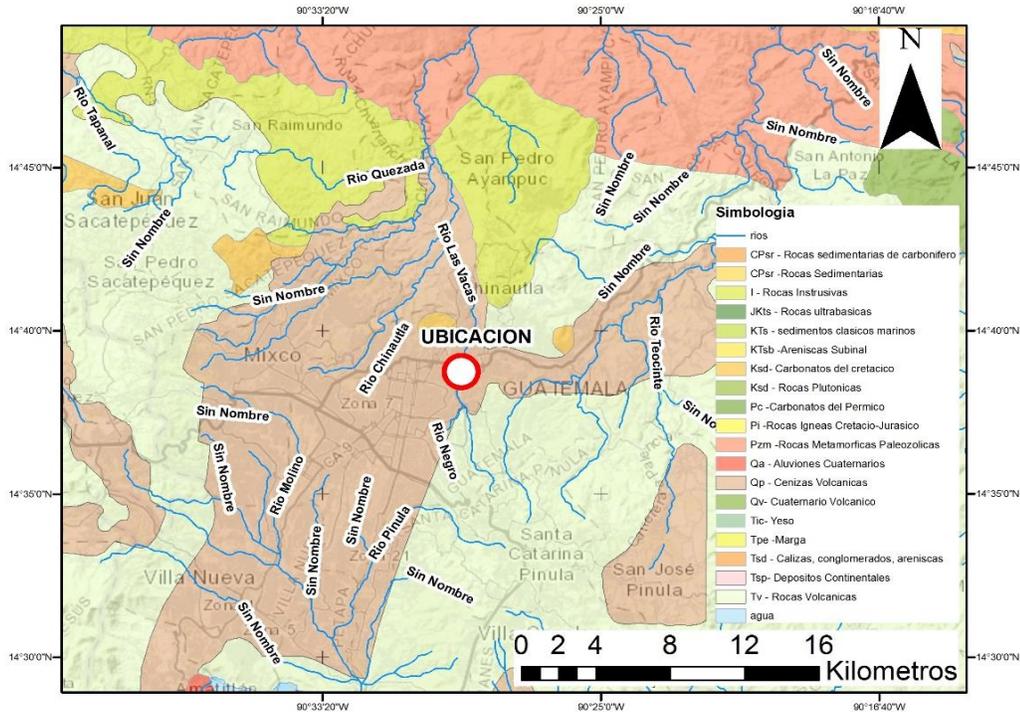
La región del altiplano volcánico tiene un basamento de rocas de un arco volcánico de edad Neógeno. Está limitado al Norte por la falla del Motagua, un alto estructural de rocas sedimentarias del Cretácico y una franja de rocas intrusivas y metamórficas y al Sur con la cordillera volcánica del cuaternario (Pérez, 2009) como lo representa el mapa fisiográfico de la figura 2 y en la figura 3 se observa el entorno fisiográfico del área de estudio.

Figura 2. Mapa fisiográfico de Guatemala



Fuente: elaboración propia, realizado con software ArcGis 10.3.

Figura 3. Geología del área de estudio (1:250,000)



Fuente: elaboración propia, realizado con software ArcGis 10.3.

2.1.2. Unidades geológicas

Las unidades que afloran en el entorno del área de estudio se describen a continuación.

2.1.2.1. Unidad de calizas

Es una secuencia de calizas compactas, que fue levantada e intensamente fracturada debido a la convergencia del Paleógeno-Neógeno que la llevó a su posición actual (INSIVUMEH, 2019). Las calizas son rocas con textura fina, color amarillas a grisáceas, generalmente calcáreas (Móran, Chiquín y Requena, 2001) como se observa en la figura 4.

Figura 4. **Vista del alto estructural de calizas que afloran al norte de la zona de estudio**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (A la altura del km 42 CA-09 Norte. 2021).
Colección particular. Guatemala.

La unidad de calizas se encuentra fuera del área de estudio como se observa en el mapa geológico de la figura 3 y en contacto con la unidad de piroclastos bajo un espesor mayor de 100 m.

2.1.2.2. Unidad de rocas volcánicas

Son estructuras volcánicas pequeñas y afloran en contacto con las unidades de calizas, probablemente de carácter monogenético con orientación de 45 grados al Nor-Este (N45E) (Móran et al., 2001).

Cada estructura está formada por una colada que corrió a lo largo de una depresión o discontinuidad; a veces las estructuras se encuentran aflorando en

superficie y otras cubiertas por piroclastos. Las coladas son de composición basáltica y conservan fracturas como resultado de su emplazamiento como fracturas de flujo y enfriamiento (Móran et al., 2001). Las unidades volcánicas tienen afloramiento en el trazo de la carretera CA-9 Norte a la altura del km 9.

En la figura 5, se muestra el afloramiento de basaltos que se encuentra en el corte de la carretera, que corresponde a una de las estructuras de carácter monogénético.

Figura 5. Vista del afloramiento de basaltos



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (A la altura del km 9 CA-09 Norte. 2021).
Colección particular. Guatemala.

2.1.2.3. Unidad de piroclastos

El sustrato del área de estudio está formado por la superposición de varios cuerpos de materiales piroclásticos que han sepultado el relieve original, bajo más de 100 m de relleno creando una planicie. En el entorno del valle se han identificado 26 materiales de piroclastos que sucedieron en diferentes eventos y lapsos de tiempo dando como resultado en su mayoría una capa de paleosuelo en el techo (Pérez, 2009).

Una característica del entorno del área de estudio es que el espesor de paleosuelos no está muy desarrollada, lo que denota condiciones especiales de emplazamiento. En la figura 6 se presenta una vista del relleno de piroclastos.

Figura 6. **Vista del relleno de piroclastos en el entorno de la Calzada la Paz**

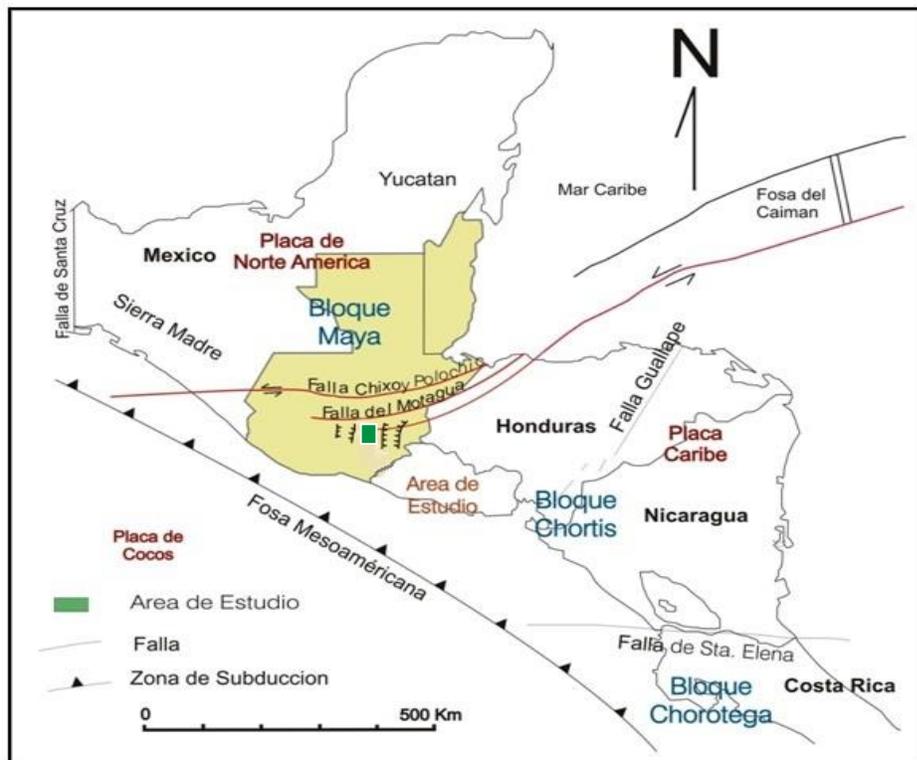


Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (A la altura del km 6 CA-09 Norte. 2021). Colección particular. Guatemala.

2.2. Geología estructural

La corteza terrestre está formada por placas tectónicas, las cuales al desplazarse generan estructuras que reflejan movimiento en la superficie. Las estructuras que se relacionan al movimiento pueden ser fallas, fracturas y pliegues. Guatemala está controlada por tres placas tectónicas que convergen y se relacionan entre sí, siendo la placa de Norte América hacia el Norte, la placa del Caribe hacia el Este y la placa de Cocos hacia el sur (Móran et al., 2001; Schwartz , Cluff y Donnelly, 1979; Schwartz, 1985). Como se observa en la figura 7.

Figura 7. Tectónica Regional de Guatemala



Fuente: Dengo y Bohnenberger. (1969). *Desarrollo estructural del norte de Centroamérica y el Caribe Occidental.*

La zona de sutura del Motagua, se caracteriza por formar un juego de fallas de rumbo, que se encuentran sísmicamente activas, llamadas Cuilco-Chixoy-Polochic y Motagua, con dirección Este-Oeste y Este-Noreste (Beccaluva et al., 1995; Schwartz et al., 1979), que divide a las rocas del basamento en dos bloques llamadas Maya y Chortís (Dengo y Bohnenberger, 1969) y se extiende desde el océano Pacífico hasta el mar Caribe; se caracteriza por una geometría de zona de cizalla, combinada con un tipo colisional de estructura en flor (Beccaluva et al., 1995). Estas estructuras son una combinación de fallas transformantes y pliegues, donde el movimiento que predomina es tipo strike slip (Móran et al., 2001). “El límite sur de la zona de falla de Motagua está definido por una gran falla activa de deslizamiento a la izquierda que se rompió durante el terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976” (Schwartz et al., 1979, p. 431).

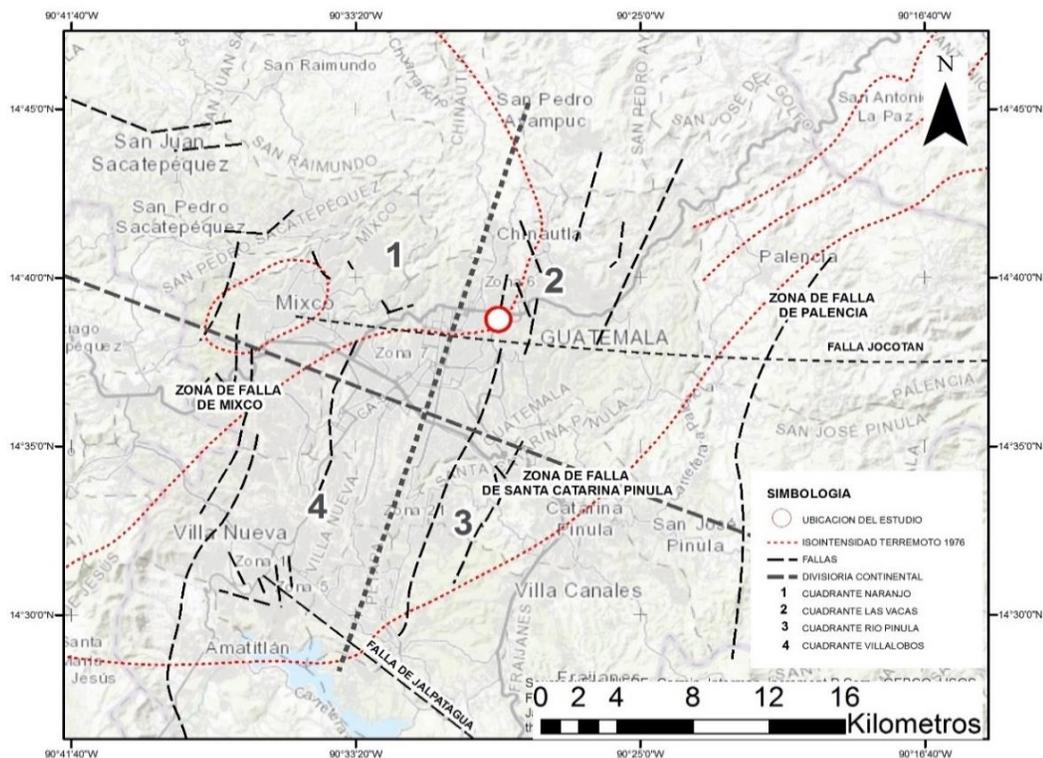
Una serie de grabens activos Norte-Sur se localizan al Sur de la falla del Motagua y al Norte del arco volcánico asociados con la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe, no a lo largo de un frente uniforme, sino en segmentos, debido a que ambas placas están rotas por fallas transversales que separan los segmentos individuales entre sí. Los sistemas de graben y fallas Norte-Sur, se refieren a sistemas de fallas normales y a grabens tales como el graben de la ciudad de Guatemala y el graben de Ipala. Estas fallas Norte-Sur se consideran estructuras de tensión provenientes de movimientos horizontales (Dengo, 1978).

Uno de los principales rasgos naturales según Pérez (2009) es que “el valle de la ciudad está formado por una depresión tectónica que fue rellenada por materiales piroclásticos sobrepuestos mediante cuerpos de forma lobular producto de múltiples eventos de una actividad volcánica explosiva, que produjeron un relleno de más de 100 metros de espesor” (pp. 72-77).

Siendo el valle de la ciudad una depresión de origen tectónico, formado por la subsidencia a través de fallas y en el sitio de estudio, hubo una falla que estuvo activa en el inicio de su formación, sin embargo, actualmente las fallas más activas en la vertiente Norte se encuentran al W del mismo (zona de falla de Mixco) y en la vertiente Sur son las fallas de Santa Catarina Pínula y San Cristóbal, ambas se encuentran fuera del área del proyecto, a una distancia promedio de 8 kilómetros. (Pérez, 2009, pp. 72-77)

La figura 8 representa la geología estructural y el aporte hidrológico formando cuatro cuadrantes principales en el valle de la ciudad de Guatemala.

Figura 8. **Geología estructural del área de estudio (1:250,000)**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ArcGis 10.3.

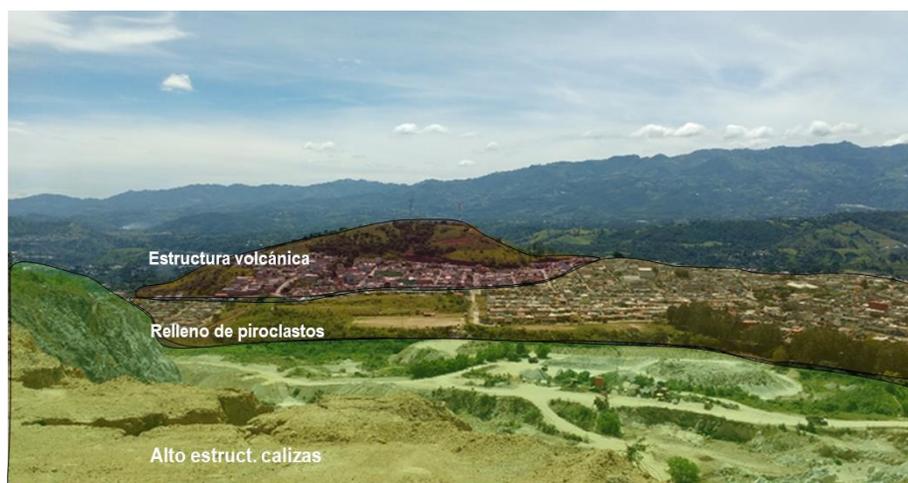
2.3. Geología local

Para caracterizar el área de investigación se utilizaron las técnicas y procedimientos que se describen a continuación.

2.3.1. Geomorfología

El área de estudio se ubica cercano al límite Norte del valle, donde el espesor de piroclastos disminuye hasta desaparecer y afloran rocas sedimentarias del Cretácico. A gran escala, la forma del terreno es plana, sin embargo cuando se observa con detalle la superficie, se encuentran cuerpos de forma lobular de laderas redondeadas, que rellenaron el valle (Pérez, 2009). “En la parte central es una planicie, actualmente cortada por profundas incisiones; en ambos flancos está delimitada por sendos complejos de estructuras volcánicas” (Pérez, 2021, p. 2) como se observa en la figura 9.

Figura 9. **Vista panorámica en donde se delinean las unidades geomorfológicas**

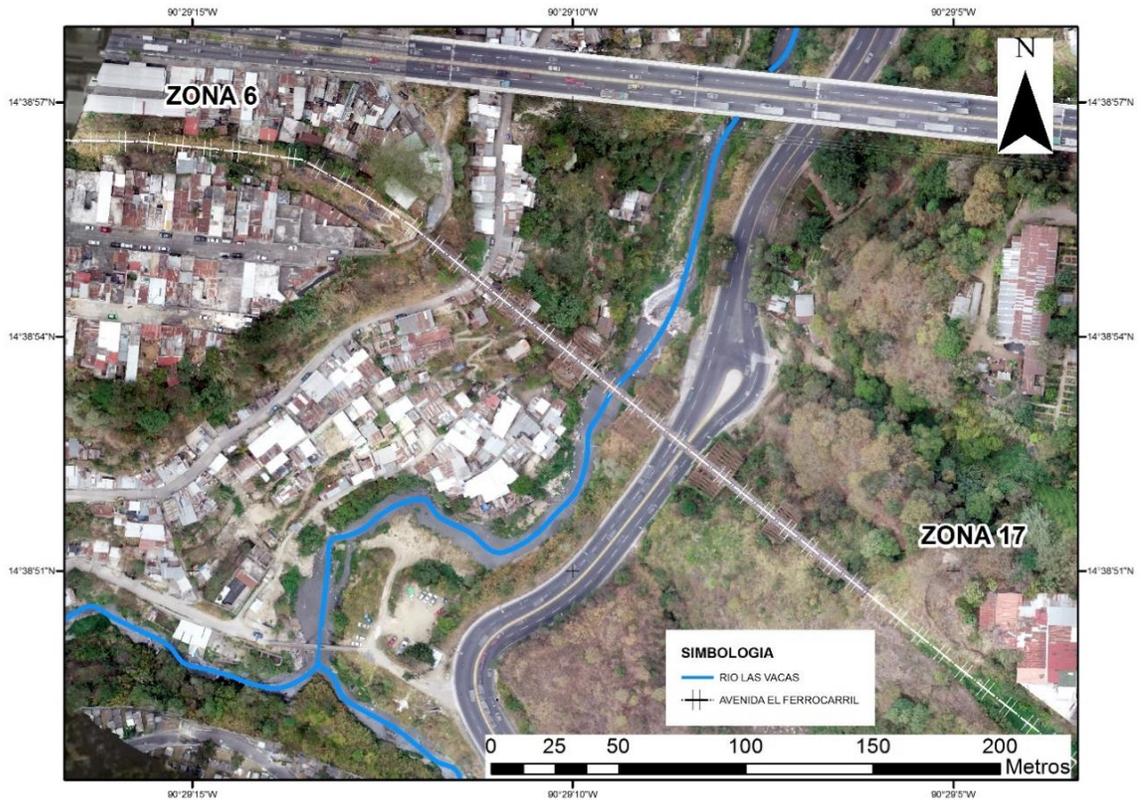


Fuente: elaboración propia, realizado con software ArcGis 10.3.

2.3.1.1. Hidrografía

Se identifica un barranco que es atravesado por el afluente del río Las Vacas, cuyo origen es la unión del río Negro y el riachuelo Santa Rosita en dirección al Nor-Este de Guatemala, que desemboca en el río Motagua. En la figura 10 se representa la ortofotogrametría del area de estudio de investigación.

Figura 10. Ortofotogrametría de la zona de estudio (1:1,500)



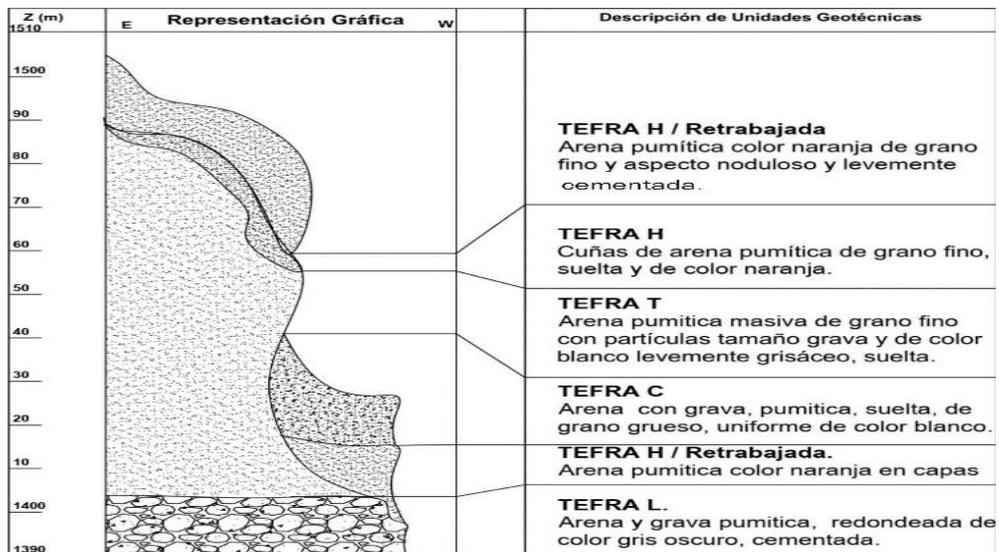
Fuente: elaboración propia, realizado con software ArcGis 10.3.

2.3.2. Sustrato del área de estudio

Está formado por varias capas de materiales piroclásticos sobrepuestos mediante cuerpos de forma lobular, levantada en el entorno del área de estudio, donde el espesor es de aproximadamente de 100 m. Para diferenciar las tefras se han identificado mediante letras H/retrabajada, H, T, C y L, como se muestra en la columna estratigráfica de la figura 11. Los piroclastos se depositaron rellenando depresiones y cubriendo barrancas en todo el entorno, los eventos corresponden a flujos de grandes dimensiones como las tefras L y T (Pérez, 2009).

Los flujos están formados por arenas pumíticas y paleosuelos dispuestos en forma alterna; el espesor del paleosuelo se relaciona con el tiempo de exposición que tuvieron las capas en superficie. Las arenas pumíticas con materiales livianos, pero consolidados y de condición compacta (Lazcano, 2018).

Figura 11. Columna estratigráfica del área de investigación



Fuente: elaboración propia, realizado con software Strater 3.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Reconocimiento geológico-geotécnico

Se realizó una visita preliminar de campo para plantear la investigación del área de estudio y el reconocimiento geológico-geotécnico, se utilizaron productos derivados de fotogrametría mediante el uso de un vuelo no tripulado (drone).

A través de la fotointerpretación se reconoció la superficie y características de la zona de estudio, identificando el uso de suelo, geometría del terreno y rasgos geológicos e hidrográficos.

Posteriormente se realizaron exploraciones con el fin de conocer la estratigrafía o niveles del subsuelo, extrayendo muestras alteradas e inalteradas que se obtienen a través de calicatas o excavaciones, para la realización de ensayos de laboratorio y determinar las características físicas y parámetros geotécnicos.

3.2. Ortofotogrametría

Es una fase para el reconocimiento y representación artística de las características de la superficie del terreno, uniendo fotos georeferenciadas con escalas y precisión a través de los píxeles de las imágenes obteniendo una forma definida y precisa del área de estudio (Bonneval, 1972; Quirós, 2015).

“El principio básico de la fotogrametría es el desplazamiento radial que sufre un punto en el fotograma debido a su altitud” (Quirós, 2015, p. 49).

En la figura 12 se observa el área de estudio a través de un mosaico de 224 imágenes georeferenciadas y rectificadas. Por un vuelo no tripulado (drone) a una altura de 75 m con una resolución de 2.2 cm / px.

Figura 12. **Ortofotomosaico del área de estudio**



Fuente: elaboración propia, realizado con software Pix4Dmapper Pro.

3.3. Exploración de campo

Las metodologías de investigación de campo para este estudio cuentan con los sistemas de exploración siguientes:

- Método directo con pozos o calicatas a cielo abierto (PCA).
- Método semi-indirecto con perforaciones rotativas con recuperación continua e intervalos de ensayo de penetración dinámico (SPT).

3.3.1. Calicatas a cielo abierto

Las calicatas o pozos a cielo abierto se realizaron de forma artesanal para recuperación de muestras alteradas e inalteradas como se observan en las figuras 13 y 14.

Figura 13. Método directo con calicata a cielo abierto



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Zona 17, ciudad de Guatemala). Colección particular. Guatemala.

Figura 14. **Recuperación de muestra inalterada**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Zona 2, ciudad de Guatemala. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Para un muestreo superficial se puede utilizar maquinaria pesada como una excavadora, como se observa en la figura 15.

Según González et al. (2004) las calicatas, zanjas, rozas, pozos, etc., consisten en excavaciones realizadas mediante medios mecánicos convencionales, que permiten la observación directa del terreno a cierta profundidad, así como la toma de muestras y la realización de ensayos *in situ*. Tienen la ventaja que permiten acceder directamente al terreno, pudiéndose observar las variaciones litológicas, estructura, discontinuidades, etc., así como tomar muestras de gran tamaño para la realización de ensayos y análisis. (p. 322)

Figura 15. **Calicata o pozo a cielo abierto con excavadora**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Zona 2, ciudad de Guatemala. 2021).
Colección particular. Guatemala.

González et al. (2004) clasifican las muestras geotécnicas como:

- Muestras inalteradas: “Son las que no sufren alteraciones en sus estructura ni en su contenido en humedad” (p. 322). Se observa en la figura 16 una muestra cubriéndose con parafina para su conservación.
- Muestras alteradas: “Son muestras que sufren modificaciones en su estructura y en su contenido de humedad, pero conservan su composición mineralógica” (p. 322). Como se observa en la figura 17.

Figura 16. **Muestra inalterada cubierta con parafina**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Zona 6, ciudad de Guatemala. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Figura 17. **Recuperación de muestra alterada**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Zona 6, ciudad de Guatemala. 2021).
Colección particular. Guatemala.

En la práctica de este estudio las ventajas de las calicatas o pozos a cielo abierto de forma artesanal son:

- Se puede observar directamente los niveles del subsuelo.
- Se pueden extraer mayor cantidad y porción de muestras inalteradas.

Dependiendo de la geología de la zona de estudio este método puede tener limitantes de ejecución que afectan la profundidad de exploración y el cronograma de trabajo, como se describe a continuación:

- Al existir roca o agua no se puede continuar con la exploración.
- Un material muy suelto o con un relleno antrópico no controlado se convierte en un trabajo de alto riesgo por los derrumbes en las paredes.
- Dificultad de visión y falta de oxígeno conforme el avance de la exploración.

3.3.2. Sondeos geotécnicos

“Se caracterizan por su pequeño diámetro y por la ligereza, versatilidad y fácil desplazamiento de las máquinas. Estas pruebas pueden alcanzar una profundidad de unos 150 m, a partir de la cual los equipos son más pesados” (González et al., 2004, p. 316).

Los sondeos geotécnicos comparados con la realización de exploraciones a cielo abierto, tienen las siguientes ventajas:

- No son invasivos.
- Son rápidos.
- Atraviesan material duro o rocoso.

- Se pueden realizar en condiciones de suelos totalmente saturados, o debajo del nivel freático.
- Extracciones de muestras inalteradas con tubos tipo Shelby para suelos arcillosos, cohesivos y sedimentos marinos.
- Se pueden realizar pruebas alternas como presiometría, piezometría, inclinometría, permeabilidad, CPTU y SPT.

Las limitaciones de los sondeos geotécnicos comparados con exploraciones a cielo abierto pueden ser:

- El porcentaje o cantidad de muestra obtenida en la recuperación es baja.
- Debido a la utilización de fluidos y agua en el proceso de perforación las muestras obtenidas son alteradas.
- El costo elevado de las máquinas y mantenimiento.
- Se requiere personal capacitado y con experiencia.

3.3.2.1. Perforaciones rotativas con intervalos de ensayo de penetración dinámico (SPT)

Las perforaciones rotativas con recuperación continua se pueden utilizar para suelos o material rocoso, barrenando por medio de una broca con punta de diamante, generalmente en geotecnia el diámetro más utilizado es la tubería con medida HQ equivalente a 63.5 mm de interior y 96 mm de exterior, el procedimiento se basa en la norma ASTM D2113. En la figura 18 se observa el equipo de perforación rotativa con recuperación continua en el área de estudio.

El ensayo de penetración estándar (SPT) se realizó con intervalos de 1.50 m de profundidad según la norma ASTM D1586 y AAHSTO T206 por medio de tubería AW con diámetro de 0.45 m y diámetro interior de 28 mm, como se

observa en la figura 19. El equipo es guiado a través de una columna cilíndrica para elevar el martillo o martinete con una masa de 140 libras y una caída de 760 mm hincando un muestreador. El muestreador consiste en un tubo ranurado longitudinalmente para la recuperación de la muestra en intervalos de 150 mm hasta penetrar de 450 mm a 600 mm dependiendo del fabricante. El objetivo de este parámetro geotécnico de campo es correlacionar los golpes obtenidos con fórmulas empíricas para medir la resistencia relativa del suelo, lo que lo hace una metodología sencilla de utilizar.

El testigo o muestra recuperada del área de estudio, es colocada en caja para ser trasladada al laboratorio, como se observa en la figura 20.

En la práctica los métodos semi-indirectos con perforaciones rotativas con recuperación continua y SPT tienen la siguiente ventaja:

- La rentabilidad, aunque no es aplicable para suelos completamente cohesivos, muy compactos o duros, ni rocas.

Las limitaciones de estos métodos son:

- La cantidad de muestra obtenida, sobre todo en la arena si no se dispone de una canasta especial.
- Las recuperaciones de muestras son alteradas.
- Resultados de resistencia variables si no existe conocimiento apropiado.
- Barras o tuberías que no cumplen con las masas y medidas adecuadas.

En Guatemala se han identificado empresas que no cuentan con tuberías estandarizadas para la realización del ensayo, fabricadas empíricamente por herreros ambulantes. Esto altera completamente los resultados de los ensayos.

Figura 18. **Equipo de perforación rotativa con recuperación continua**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Zona 17, ciudad de Guatemala. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Figura 19. **Tubería para ensayo dinámico de penetración estándar**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Zona 17, ciudad de Guatemala. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Figura 20. **Testigo o muestra recuperada**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Zona 17, ciudad de Guatemala. 2021).
Colección particular. Guatemala.

3.4. Ensayos de laboratorio

Para una investigación adecuada se deben complementar los estudios con ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, determinando las propiedades índice y mecánicas. En Guatemala para garantizar la calidad de los ensayos se utilizan generalmente los estándares de las normativas internacionales ASTM y AASHTO. En este estudio las metodologías fundamentales para caracterizar física y mecánicamente el suelo se describen a continuación.

3.4.1. Clasificación de los suelos

Para determinar las características del suelo es primordial conocer los sistemas de clasificación, que resultan a través de indicativos de plasticidad y tamaño de grano, utilizando los ensayos de límites de consistencia y análisis granulométrico.

3.4.1.1. Análisis granulométrico por el método mecánico (ASTM D421, D422 y AASHTO T87, T88)

“Una parte importante de los criterios de aceptabilidad de suelos para carreteras, aeropistas, presas de tierra, diques, y otro tipo de terraplenes es el análisis granulométrico” (Bowles, 1980, p. 35).

El análisis granulométrico por el método mecánico se determina por medio del cribado de mallas con aberturas rectangulares que varían desde el tamaño de grano más grueso a una abertura más pequeña, con el fin de conseguir una curva para representar gráficamente la distribución de los tamaños de grano. En la figura 21 se observa la realización del ensayo.

Figura 21. **Serie de tamices para análisis granulométrico**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Laboratorio de suelos MAYATEST, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

El análisis granulométrico por el método mecánico, utiliza una distribución para el análisis de clasificación a través de tamices con abertura y numeración específica, en la práctica los tamices utilizados se muestran en la tabla II.

Tabla II. **Clasificación de suelos utilizados en el estudio**

Tamiz	Abertura real (mm)	Tipología
2"	50.8	Gravas
1 1/2"	38.1	
1"	25.4	
3/4"	19.0	
No. 4	4.76	Arenas
No. 10	2.0	
No. 20	0.84	
No. 40	0.42	
No. 200	0.075	Limos y arcillas

Fuente: elaboracion propia.

3.4.1.2. Límites de consistencia (ASTM D4318)

De manera artesanal en laboratorio y a través de los diferentes contenidos de humedad en donde el suelo hace su transición de un estado sólido a un estado plástico, hasta convertirse en un estado líquido, estas fases o fronteras del suelo se denominan límite líquido y limite plástico de un material plástico o arcilloso. Según Bowles (1980) estas fases se definen como:

- Límite líquido (AASHTO T89, ASTM D423): "Es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su

comportamiento al de un fluido viscoso” (p. 16). La figura 22 representa el equipo para el ensayo de límite líquido en suelo de una muestra.

- Límite plástico (AASHTO T90, ASTM D424): “Es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico” (p.16). La figura 23 representa el ensayo de límite plástico en suelo de una muestra.

Figura 22. **Equipo de Casagrande para ensayo de límite líquido**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Laboratorio de suelos MAYATEST, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 23. **Ensayo para el límite plástico**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Laboratorio de suelos MAYATEST, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

3.4.2. Ensayos de corte de laboratorio

Se realizaron los siguientes ensayos para obtener los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante.

3.4.2.1. Corte directo (ASTM D3080, AASHTO T236)

“El ensayo de corte directo impone sobre un suelo las condiciones idealizadas, es decir, induce la ocurrencia de una falla a través de un plano de localización predeterminado” (Bowles, 1980, p. 175).

Según Bowles (1980) sobre este plano actúan dos fuerzas:

- Un esfuerzo normal debido a una carga vertical P_v aplicada externamente.
- Un esfuerzo cortante debido a la aplicación de una carga horizontal P_h

“Este ensayo tiene como objeto la determinación de los parámetros resistentes de cohesión, C , y del ángulo de rozamiento interno, Φ , de una muestra de suelo sometida a un esfuerzo normal y otro cortante” (González, 2001, p. 115).

El ensayo de corte directo es de uso obligatorio cuando se trabaja a niveles bajos de esfuerzos o si se desea obtener la resistencia a lo largo de las discontinuidades. En este ensayo la resistencia al cortante puede medirse en un plano predeterminado, cortando la muestra con una determinada orientación. (Suárez Díaz, 1998, p. 93), como se observa en la figura 24.

Figura 24. **Equipo para ensayo de corte directo**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Zona 12, Laboratorio de suelos CII/USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Con el fin de obtener resultados adecuados al momento del desplazamiento cortante, los deformímetros deben ser con intervalos de 0.01 mm/división, midiendo las cargas horizontales y verticales, con una velocidad de ensayo de 0.50 mm/min.

De la muestra de suelo para cada sobrecarga previamente se realiza una medición de masa y volumen, esto con el fin de conocer la densidad del suelo natural, como se observa en la figura 25.

Figura 25. **Medición de espécimen de ensayo de corte directo**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Laboratorio de suelos MAYATEST, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

3.4.2.2. Triaxial (AASHTO T234, ASTM D2850)

“El equipo de ensayo triaxial es muy versátil y permite realizar ensayos en una variedad de procedimientos para determinar la resistencia al cortante, la rigidez y características de deformación de las muestras” (Suárez Díaz, 1998, p. 89).

“Se ensayan muestras cilíndricas dentro de una membrana delgada de caucho, colocándolas dentro de una celda triaxial con dos tapas rígidas y pistones arriba y debajo de la muestra” (Suárez Díaz, 1998, p. 89).

Suárez Díaz (1998) indica que en la interpretación de resultados de ensayos Triaxiales debe tenerse en cuenta las siguientes fuentes de error:

- a. Las muestras tienden a deformarse como un barril, lo cual conduce a sobreestimación de la resistencia al cortante.
- b. En el proceso de saturación, la muestra tiende a alterarse por cambio de volumen, lo cual puede determinar una pérdida de resistencia. (p. 92)

Del ensayo también se determinan parámetros resistentes de cohesión y de ángulo de fricción interno, a diferencia del ensayo de corte directo en el triaxial la porción del tamaño de muestra es que la altura es dos veces igual al diámetro, además que la muestra es sometida a presión en una cámara completamente confinada de agua, como lo representa la figura 26.

Para el procedimiento del ensayo el pistón que aplica la fuerza axial debe estar montado sobre una esfera y la prueba deberá ser realizada a una velocidad de 0.50 a 1.25 mm/min.

Figura 26. **Equipo para ensayo Triaxial**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Zona 12, Laboratorio de suelos CII/USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Según Bowles (1980) los ensayos de corte directo y triaxial pueden clasificarse en:

- Ensayos no consolidados – no drenados: “El corte se inicia antes de consolidar la muestra bajo la carga normal P_v . Si el suelo es cohesivo, y saturado, se desarrollará exceso de presión de poros” (p. 178).
- Ensayo consolidado – no drenado: “Se aplica la fuerza normal, y se observa el movimiento vertical del deformímetro hasta que pare el asentamiento antes de aplicar fuerza cortante” (p.178).

- Ensayo consolidado – drenado: “La fuerza normal se aplica, y se demora la aplicación del corte hasta que se haya desarrollado todo el asentamiento; se aplica a continuación la fuerza cortante tan lento como sea posible para evitar el desarrollo de presiones de poros en la muestra” (p. 178).

Para suelos no cohesivos los tres tipos de ensayo de corte dan el mismo resultado; pero, para los cohesivos, dan diferentes valores, según el tipo de ensayo y el grado de saturación del suelo arcilloso y según sea el suelo arcilloso normalmente consolidado o sobreconsolidado. (González, 2001, p. 115)

En Guatemala se realizan únicamente las pruebas rápidas no consolidadas y no drenadas, porque en este ensayo no es necesario controlar la medición de presión de poros y el tiempo prolongado de consolidación; de lo contrario para las pruebas consolidadas no drenadas y consolidadas drenadas requieren la validación de sistemas especializados y equipos adecuados.

3.4.3. Ensayos índice complementarios

Son pruebas indicadoras que aportan criterios en los datos geotécnicos.

3.4.3.1. Contenido de Humedad (ASTM D2216, AASHTO T265)

Para determinar la cantidad de agua en una porción de suelo en términos de porcentaje se debe conocer la diferencia del peso de suelo húmedo y el peso del suelo seco dividiendo el resultado sobre el peso de suelo húmedo. En laboratorio para conocer el peso seco de un material se realiza por medio de una

porción de muestra, secándola en un horno a temperatura promedio de 110 grados Celsius.

3.4.3.2. Gravedad específica (ASTM D854, AASHTO T100)

La gravedad específica se utiliza para calcular la relación de vacíos de un suelo y en ensayos de consolidación, expansión y análisis granulométrico por sedimentación mediante el método de hidrómetro. El ensayo es adimensional determinando la relación entre la densidad del suelo y la densidad del agua. En la figura 27 se observa un balón aforado utilizado para determinar la gravedad específica de la muestra de suelo.

Figura 27. **Equipo para ensayo de gravedad específica**



Fuente: [Fotografía de Ernesto Marroquín]. (Laboratorio de suelos MAYATEST, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Para caracterizar las unidades geológicas y parámetros geotécnicos en la avenida del ferrocarril, entre las zonas 6 y 17, ciudad de Guatemala, se tienen los siguientes resultados.

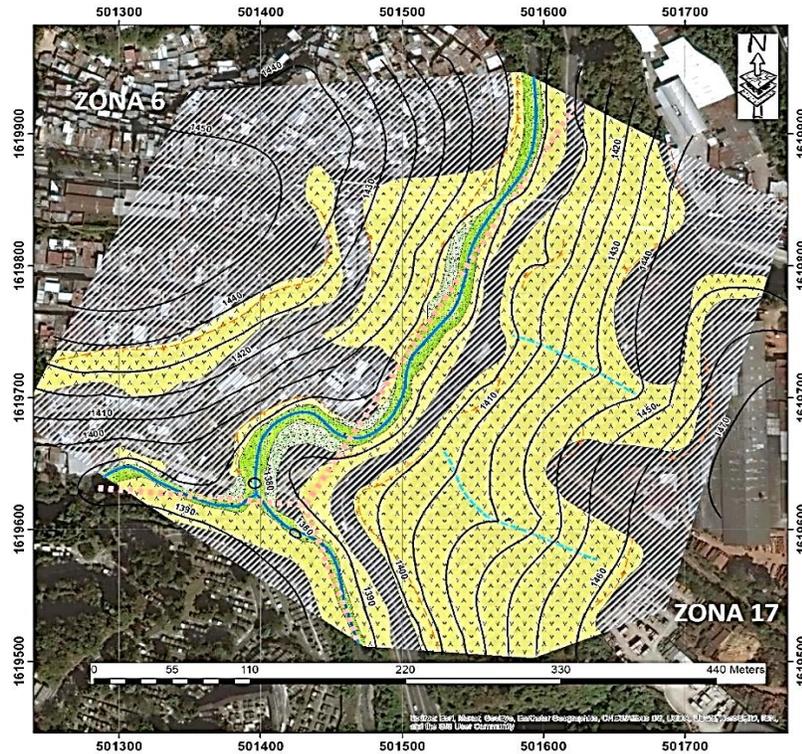
4.1. Resultados del reconocimiento geológico

El área de estudio tiene una estructura geológica de origen volcánico, que son suelos transportados y depositados por actividades eruptivas, estos productos son llamados piroclastos o tefras. Se encuentran cuerpos de forma lobular de laderas redondeadas que rellenaron el valle con estructuras volcánicas. Los tamaños de los fragmentos o granos del suelo determinados son llamados tobas lapilli, estos materiales son ideales para utilizarlos como materiales de rellenos controlados.

4.1.1. Fotointerpretación

El reconocimiento a través de la ortofotogrametría en las aproximaciones de las zonas 6 y 17, se observa que el uso del suelo está influenciado por áreas urbanas; en la geomorfología se encuentra una ladera con orientación Este-Oeste formando una depresión, en el cual se evidencia un riesgo geológico delimitado con los bordes de escarpe, así mismo no se determinaron fracturas o discontinuidades. El río Las Vacas comprende una falla geológica al inicio de la formación del valle en dirección Nor-Este desembocando en el río Motagua, como se observa en la figura 28.

Figura 28. Fotointerpretación del área de estudio (1:1,500)



Leyenda

- | | |
|---|--|
|  RELLENO ARTIFICIAL - URBANIZACIONES |  VERTIENTE |
|  DEPOSITO ALUVIONAL ACTUAL |  RIO |
|  DEPOSITO ALUVIONAL ANTIGUO |  BORDE DE ESCARPE |
|  TOBA LAPILLI - SELECTO |  FALLAS |

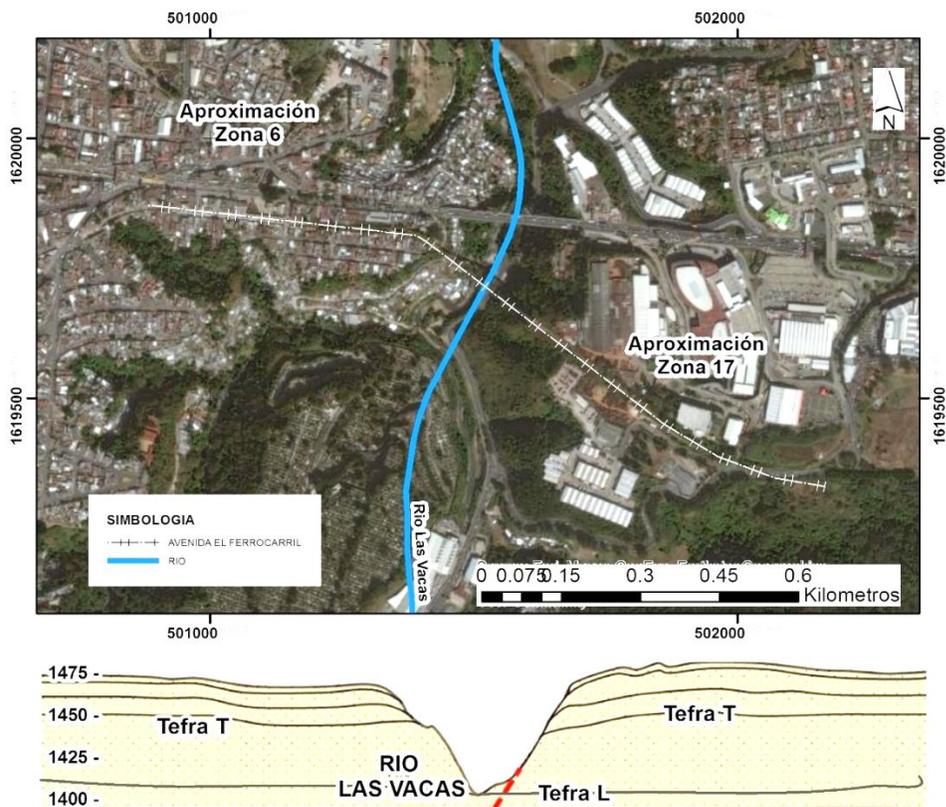
Fuente: elaboración propia, realizado con software ArcGis 10.3.

4.1.2. Perfil del sustrato

El reconocimiento de campo en el estudio de las zonas 6 y 17 se reconoció a una altura promedio de 1 475 m s.n.m., encontrándose la unidad de piroclastos clasificada como tefra T compuesta de una toba lapilli de arena pumítica masiva de grano fino con partículas de grava y una gama de color café, amarillo, beige a

rosa con una consistencia suelta, levemente cementadas y una tefra L a una elevación próxima de 1 400 m s.n.m. compuesta de arena y grava pumítica, redondeada de color gris oscuro, cementada. La figura 29 representa el corte de Este a Oeste del sustrato entre zona 6 y 17.

Figura 29. **Sustrato del área de estudio (1:10,000)**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ArcGis 10.3.

4.2. Resultados de exploración geotécnica

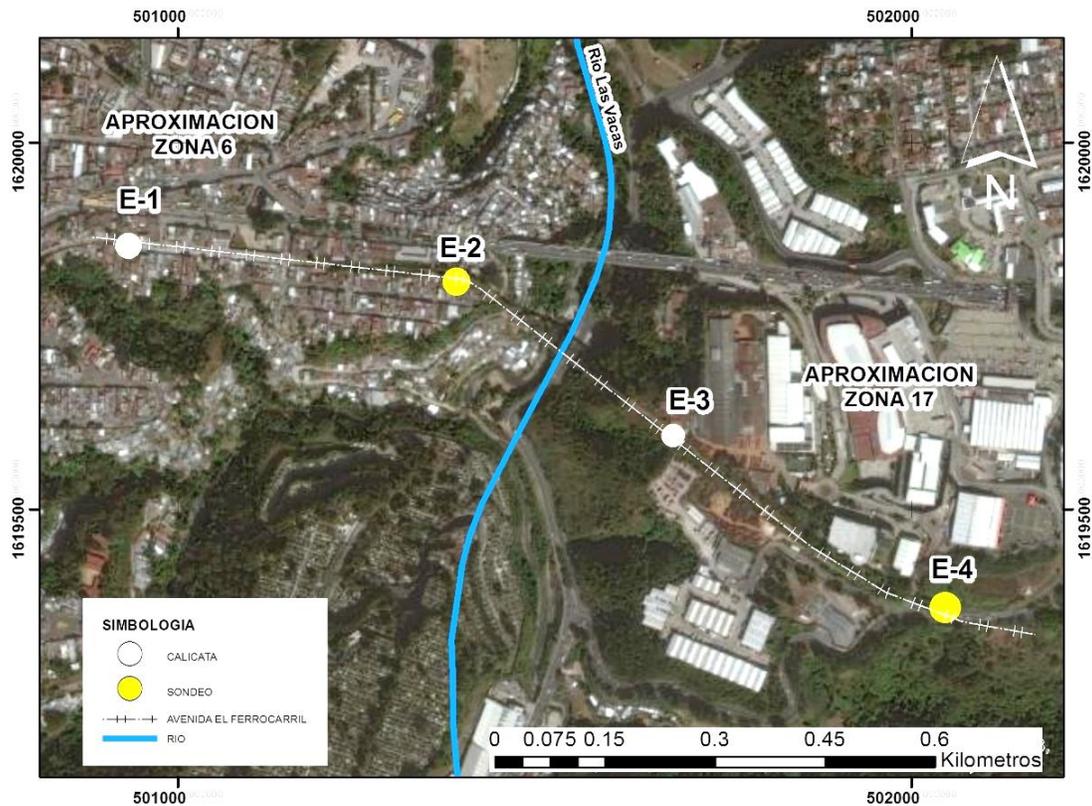
Para determinar las condiciones del subsuelo del área de estudio se realizaron 4 exploraciones por medio de pozos a cielo abierto y sondeos rotativos, distribuidos y ubicadas en la tabla III y figura 30.

Tabla III. Distribución de exploraciones de zonas 6 y 17

Exploración	Coordenadas		Elevación m s.n.m.	Profundidad (m)	Observaciones
	Norte	Este			
E-1/Calicata	1619870	500931	1474	15.0	Aproximaciones zona 6
E-2/Sondeo	1619811	501384	1473	10.0	Aproximaciones zona 17
E-3/Calicata	1619594	501676	1477	10.0	Aproximaciones zona 6
E-4/Sondeo	1619349	502044	1477	10.0	Aproximaciones zona 17

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Ubicación de las exploraciones de zonas 6 y 17



Fuente: elaboración propia, realizado con software ArcGis 10.3.

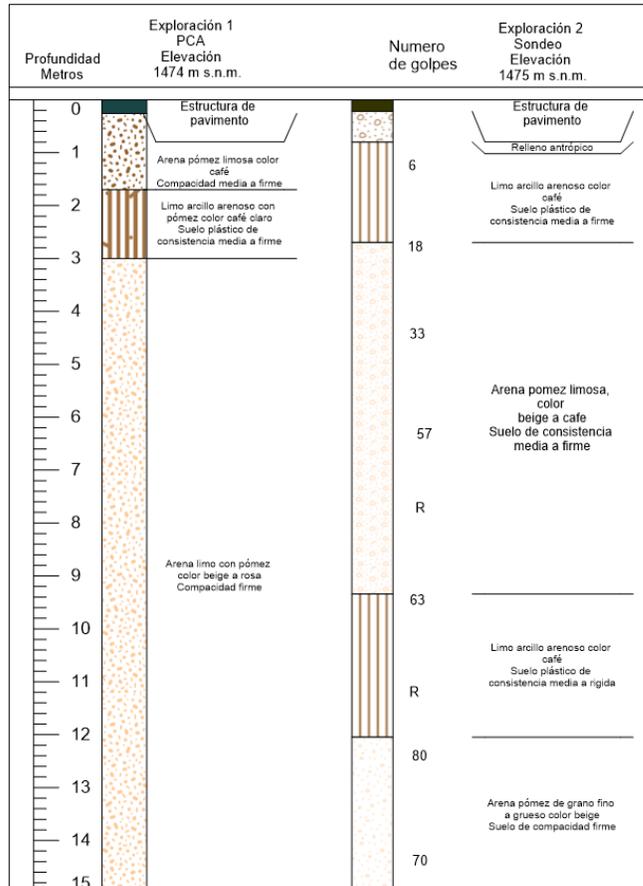
4.2.1. Registro de exploración en la aproximación de zona 6

En la aproximación de zona 6 se realizaron exploraciones 1 y 2:

En el registro del perfil de la exploración 1 por la metodología de pozo a cielo abierto se evidenció desde una elevación inicial de 1 474 m s.n.m., una estructura de pavimento con un espesor de 0,26 m, seguidamente un suelo de arena pómez de grano fino, limosa color café de consistencia media con espesor de 1,44 m, seguido de un limo arcillo-arenoso con pómez, color café de consistencia media con un espesor de 1,30 m y finalmente un suelo de arena de grano fino a grueso, limosa con pómez de color beige a rosa de compacidad media a firme, con un espesor de 12,0 m, como se observa en el registro de la figura 31 y la tabla IV representa la textura predominante y color del suelo en base al registro de la gama de colores de Munsell.

En el registro de la exploración 2 por la metodología de sondeo de recuperación continua se evidenció desde una elevación inicial de 1 475 m s.n.m. una estructura de pavimento con un espesor de 0,80 m, seguido de un suelo limo arcilloso arenoso color café de consistencia media con un espesor de 2,48 m, seguido de un suelo con arena de grano fino a medio, con pómez limosa color beige a café, de compacidad media a firme con un espesor de 6,64 m, seguido de un suelo de limo arcillo arenoso color café de consistencia media a rígida y finalmente un suelo de arena pómez de grano fino a grueso color beige de compacidad firme con un espesor de 3,3 m. En el registro los niveles del subsuelo y resultados de SPT se observa en la figura 31 y la tabla IV representa la textura predominante y color del suelo en base al registro de la gama de colores de Munsell.

Figura 31. Registro de exploraciones de zona 6



Fuente: elaboración propia, realizado con software Strater 3.

Tabla IV. Perfil general de textura y color, aproximación de zona 6

Profundidad (m)	Textura (Predominante)	Color / Munsell
1.70	Finos: Limos y arcillas	Café / 10YR 4/6
3.00	Arena: Grano fino	Café claro / 10YR 5/6
15.0	Arena: Grano fino a grueso	Beige a rosa / 10YR 8/3

Fuente: elaboración propia.

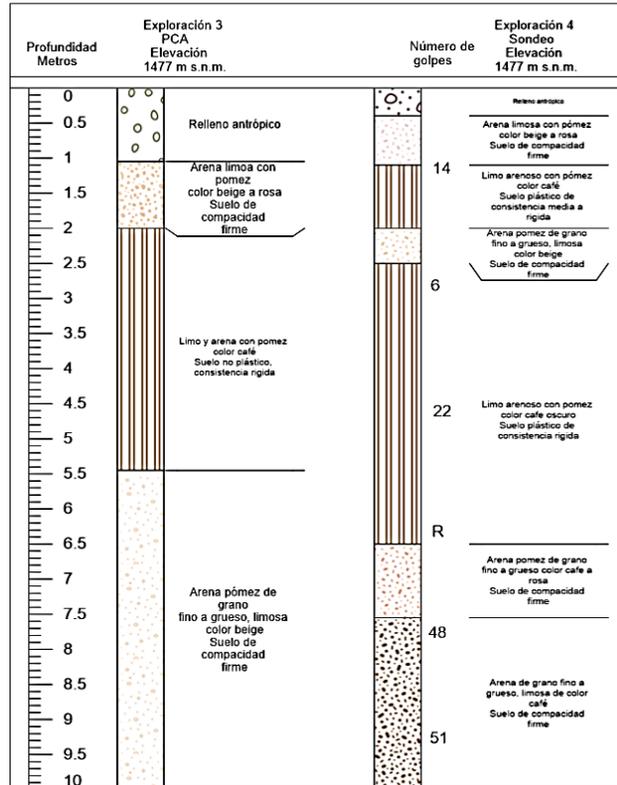
4.2.2. Registro de exploración en la aproximación de zona 17

En la aproximación de zona 17 se realizaron exploraciones 3 y 4:

En el registro de la exploración 3 por el método de pozo a cielo abierto desde una elevación inicial de 1 477 m s.n.m., se determinó un relleno antrópico con espesor de 1,0 m, continuo de un suelo de arena pómez de grano fino a grueso, limosa color beige a rosa, de consistencia firme de espesor de 1,0 m, seguido de un suelo limo y arena con pómez color café, de consistencia media a rígida con un espesor de 2,0 m y finalmente de un suelo de arena de grano fino a grueso, pómez limosa color beige, de consistencia firme, con un espesor de 5,0 m, como se observa en la figura 32 y la tabla V representa la textura predominante y color del suelo en base al registro de la gama de colores de Munsell.

En el registro de la exploración 4 mediante el sondeo de recuperación continua desde una elevación inicial de 1 477 m s.n.m. se determinó un relleno antrópico de espesor de 0,50 m, continuo de un suelo de arena pómez de grano fino a grueso, limosa color beige a rosa de compactación media a firme con un espesor de 0,60 m, seguido de un suelo limo y arena con pómez color café de consistencia media a firme con un espesor de 0,90 m, seguido de una arena pómez de grano fino a grueso, color beige de compactación media a firme con un espesor de 0,50 m, seguido de un limo arenoso con pómez café oscuro, de consistencia firme con espesor de 4,00 m y finalmente un suelo de arena pómez de grano fino a grueso, limosa color café a rosa de consistencia firme, con espesor de 3,50 m. El registro los niveles del subsuelo y resultados de SPT se observa en la figura 32 y la tabla V representa la textura predominante y color del suelo en base al registro de la gama de colores de Munsell.

Figura 32. Registro de exploraciones de zona 17



Fuente: elaboración propia, realizado con software Strater 3.

Tabla V. Perfil general de textura y color, aproximación de zona 17

Profundidad (m)	Textura (Predominante)	Color / Munsell
1.10	Arena: grano fino a grueso	Café / 10YR 5/8
2.0	Finos: limos y arcillas	Café / 10YR 4/6
3.00	Arena: grano fino a grueso	Café claro / 7.5YR 5/3
6.50	Finos: limos y arcillas	Café oscuro / 7.5YR 3/3
15.0	Arena: grano fino a grueso	Beige a rosa / 10YR 8/3

Fuente: elaboración propia.

4.3. Resultados de ensayos de laboratorio

Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar la clasificación de suelos respecto al tamaño de grano, plasticidad y tenacidad en función del límite plástico y propiedades mecánicas en base a la resistencia al corte, ver anexos.

4.3.1. Resultados de ensayos de clasificación e índice

El resumen de los ensayos de análisis granulométrico, límites de consistencia, clasificación de suelos, gravedad específica y humedad se determinan en la tabla VI y VII para aproximación de zona 6.

Tabla VI. **Resultados de ensayos para clasificación de suelos, aproximación zona 6**

Tipo de muestra	Profundidad (m)	Granulometría			Plasticidad		Clasificación	
		AASHTO T87, T88			AASHTO T89, T90		SUCS	AASHTO M 145
		% Finos	% Arena	% Grava	LL	IP		
Exploración 1	0.26 - 1.70	41.66	58.34	0.00	36.70	13.77	SM	A-4
	1.70 - 3.00	51.34	48.56	0.10	51.30	11.52	MH	A-7-5
	4.00 - 6.50	30.06	62.83	7.11	NP	NP	SM	A-2-4
	6.50 - 7.00	39.38	57.20	3.42	NP	NP	SM	A-4
	7.50 - 15.00	37.55	59.22	3.23	NP	NP	SM	A-4
Exploración 2	0.22 - 0.80	36.61	38.98	24.41	NP	NP	SM	A-4
	0.80 - 2.70	72.08	27.35	0.57	40.70	15.93	ML	A-7-6
	2.70 - 9.34	44.27	44.47	11.26	NP	NP	SM	A-4
	9.34 - 12.05	61.70	33.21	5.09	50.30	23.13	MH	A-7-6
	12.05 - 15.35	47.60	48.41	3.99	NP	NP	SM	A-4

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resultados complementarios, aproximación zona 6**

Tipo de muestra	Profundidad (m)	Gravedad específica AASHTO T 100	Humedad natural (%) AASHTO T 265
Exploración 1	0.26 - 1.70	2.31	28.23
	1.70 - 3.00	2.49	40.27
	4.00 - 6.50	2.25	22.93
	6.50 - 7.00	2.31	23.49
	7.50 - 15.00	2.36	25.37
Exploración 2	0.22 - 0.80	2.40	30.40
	0.80 - 2.70	2.61	31.06
	2.70 - 9.34	2.39	46.87
	9.34 - 12.05	2.59	47.24
	12.05 - 15.35	2.34	36.49

Fuente: elaboración propia.

El resumen de los ensayos de análisis granulométrico, límites de consistencia, clasificación de suelos, gravedad específica y humedad se determinan en la tabla VIII y IX para aproximación de zona 17.

Tabla VIII. **Resultados de ensayos para clasificación de suelos, aproximación zona 17**

Tipo de muestra	Profundidad (m)	Granulometría			Plasticidad		Clasificación	
		AASHTO T87, T88			AASHTO T89, T90		SUCS	AASHTO
		% Finos	% Arena	% Grava	LL	IP		
Exploración 3	1.00 - 2.00	30.35	47.60	22.05	NP	NP	SM	A-1-b
	2.00 - 3.00	30.97	58.61	10.42	NP	NP	SM	A-2-4
	3.00 - 5.00	43.55	52.46	3.99	NP	NP	SM	A-4
	5.00 - 10.00	34.80	61.73	3.47	NP	NP	SM	A-2-4
Exploración 4	0.50 - 1.10	40.45	53.87	5.68	NP	NP	SM	A-4
	1.10 - 2.00	49.07	43.81	7.12	46.87	21.52	ML	A-7-6
	2.00 - 2.50	43.28	52.13	4.59	NP	NP	SM	A-4
	2.50 - 6.50	63.02	34.22	2.76	48.66	20.29	ML	A-7-6
	6.50 - 10.00	33.43	61.59	4.98	NP	NP	SM	A-2-4

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Resultados complementarios, aproximación zona 17**

Tipo de muestra	Profundidad (m)	Gravedad específica AASHTO T100	Humedad natural (%) AASHTO T265
Exploración 3	1.00 - 2.00	2.29	10.07
	2.00 - 3.00	2.30	37.77
	3.00 - 5.00	2.32	44.55
	5.00 - 10.00	2.34	44.65
Exploración 4	0.50 - 1.10	2.27	40.74
	1.10 - 2.00	2.32	35.79
	2.00 - 2.50	2.29	43.31
	2.50 - 6.50	2.30	42.45
	6.50 - 10.00	2.20	34.68

Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Resultados de ensayos de esfuerzo cortante

Para la realización de ensayos de corte directo y triaxial, se extrajeron muestras inalteradas por medio de pozos a cielo abierto, conservando las propiedades físicas *in situ*, los resultados se detallan en la tabla X.

Tabla X. Resultados de ensayos de resistencia al corte

Exploración	Profundidad (m)	Corte directo AASHTO T236		Triaxial AASHTO T234		Densidad (g/cm ³)	
		Ángulo de fricción (°)	Cohesión (t/m ²)	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (t/m ²)	Húmeda	Seca
E1/Calicata	1.70	25.30	4.70	-	-	1.47	1.06
	6.05	-	-	37.60	1.30	1.41	1.14
E3/Calicata	1.50	36.20	1.60	-	-	1.45	1.32
	4.50	-	-	38.90	0.95	1.50	1.03

Fuente: elaboración propia.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A través del reconocimiento geológico y en base a los resultados de los parámetros geotécnicos de los ensayos de laboratorio mediante las exploraciones *in situ* se presentan los siguientes aspectos.

5.1. Análisis del reconocimiento geológico

La caracterización de la geología en la avenida el ferrocarril entre las zonas 6 y 17, ciudad de Guatemala, se estableció a partir del recorrido de campo, interpretación de imágenes digitales, fotogrametría como se observa en la figura 28 y los parámetros geotécnicos mediante la exploración directa *in situ*.

En el entorno del área de investigación se caracterizaron tres unidades geológicas las cuales son calizas, rocas volcánicas y piroclastos de la era del cuaternario, siendo esta última la unidad que forma con mayor depósito el sustrato de la investigación. El valle de la ciudad de Guatemala se caracteriza por ser una planicie, donde geomorfológicamente entre las zonas 6 y 17 se encuentra un barranco o depresión que es atravesado por el afluente del río Las Vacas, formando laderas con orientación este a oeste como se representa en la figura 29 de la sección de resultados.

El río Las Vacas es una falla que estuvo activa en el inicio de la formación del valle, sin embargo, actualmente las fallas más activas están en la vertiente Norte, también se encuentra al Oeste del valle la zona de falla de Mixco y en la vertiente Sur, las fallas de Santa Catarina Pinula y San Cristóbal, ambas se

encuentran fuera del área del de estudio, a una distancia promedio de 8 km, como se observa en la figura 8 de la sección de la caracterización geológica.

Por la influencia geológica en la textura y color del suelo del área de investigación se determinó que está compuesta por la unidad de piroclastos clasificada como tefra T formada por una toba lapilli homogénea por un material de arena pómez de grano fino a grueso de color amarillento a rosa evidenciándose el proceso de meteorización, este material es inoloro, inorgánico, de comportamiento cementado y firme. El sustrato presenta en los niveles superficiales suelos residuales homogéneos con textura fina compuestos de limos y arcillas inorgánicas como se observa en las tablas IV y V. Así mismo, se determinaron depósitos aluvionales antiguos y actuales productos de la actividad del río Las Vacas, como se observa en la figura 28.

Del modelo digital del terreno (DTM) obtenido por la fotogrametría, se realizó un mapa morfológico para determinar las curvas topográficas en intervalos de 10 unidades, definiendo las elevaciones referenciadas sobre el nivel del mar y pendientes de las zonas 6 y 17, demostrando los bordes de escarpe o ladera y la influencia de las vertientes naturales derivados de la escorrentía superficial como se observa en la figura 33.

Tabla XI. **Clases de pendiente, procesos esperados y la condición del terreno**

Clase de pendiente		Procesos característicos y condiciones del terreno
Grados	%	
0-2	0-2	Plano a casi plano. Denudación no apreciable. Tráfico y laboreo sin dificultad bajo condiciones secas. Alta capacidad de almacenamiento.
2-4	3-7	Suavemente inclinado. Movimientos en masa de flujo lento de diferentes clases, erosión hídrica (laminar e inicio de surcos). Laboreo aun con maquinaria pasada es posible. Peligro de erosión moderado. Alta capacidad de almacenamiento.
4-8	8-15	Relieve inclinado. Condiciones similares al anterior, pero menos facilidad de laboreo. Peligro de erosión severo. Moderada capacidad de almacenamiento.
8-16	16-30	Moderadamente escarpado. Movimientos en masa (reptación), erosión laminar y en surcos, ocasionalmente deslizamientos. No es posible el laboreo mecanizado sin terraceo. Peligro muy severo de erosión y deslizamientos. Altos valores de escorrentía. Baja capacidad de almacenamiento.
16-35	31-70	Escarpado. Procesos denudacionales intenso de intensos de diferente clase. Posibilidades limitadas de laboreo. Peligro de erosión severo. Valores de escorrentía muy altos.
> 35	> 70	Muy escarpado. Derrumbes de rocas, procesos denudacionales intensos. Valores de escorrentía muy altos.

Fuente: Van Zuidam. (1986). *Fotointerpretación aérea en análisis de terreno y mapeo geomorfológico*.

5.1.1. Análisis de la incidencia de la actividad antrópica

El factor de crecimiento demográfico incide en el entorno de las zonas de estudio provocando un desarrollo urbanístico no planificado. Se determinó que el

uso de suelo predomina la alteración antrópica provocada por las urbanizaciones conformadas por viviendas populares sin planificación, asentadas en las pendientes de la ladera en la aproximación de la zona 6. Sin embargo, en la aproximación en la zona 17 cercano a la ladera el uso de suelo aún es conformado por el depósito de toba lapilli, con vertientes o canales naturales originadas por la escorrentía superficial drenándose y evacuándose hacia el pie del talud. El río Las Vacas presenta cambios en los meandros derivados de los depósitos de material heterogéneo producto de la actividad antrópica del entorno del estudio, como se observa en la figura 28 de la sección de resultados.

La alteración del uso de suelo descontrolado por los cambios de origen antrópico, impermeabilizan las zonas de recarga hídrica, acelerando el desequilibrio geológico natural. Estas viviendas asentadas generan aguas servidas que regularmente no son captadas y evacuadas correctamente contribuyendo a los procesos de erosión, desencadenando posibles desestabilizaciones de laderas.

5.2. Análisis de los parámetros geotécnicos

Las metodologías de exploración directa para pozos a cielo abierto para la correcta extracción de muestras inalteradas contribuyeron a la preservación de las condiciones físicas y mecánicas del suelo, para el control de calidad de los parámetros que corresponden a humedad, densidad natural y esfuerzos de corte. De la obtención de muestras inalteradas y con el adecuado cuarteado en laboratorio se determinaron los resultados de granulometría, límites de consistencia y gravedad específica.

La metodología de exploración indirecta mediante sondeos rotativos y ensayos SPT registraron valores típicos de suelos firmes y rígidos, según se

observa en la tabla XII y XIII, los parámetros con niveles de resistencia mayores a 50 golpes en un tramo de 30 cm es un rechazo R indicando un suelo rígido para los finos y para las arenas un material de compacidad firme y denso.

Las exploraciones *in situ* no presentaron saturación, ni evidenciaron nivel freático aparente, la investigación se realizó en temporada seca o verano.

Tabla XII. **Registros de SPT para aproximación de zona 6**

Exploración	Profundidad (m)	SPT AASHTO T206 (N golpes)	Comportamiento
E-2	1.55	6	Consistencia media
	3.55	18	Compacidad media
	5.50	33	Compacidad densa
	6.20	57	Compacidad muy densa
	7.45	R	Compacidad muy densa
	9.40	63	Compacidad muy densa
	11.35	R	Compacidad muy densa
	13.30	80	Compacidad muy densa
	14.55	70	Compacidad muy densa

Fuente: elaboración propia

Tabla XIII. **Registros para aproximación de zona 17**

Exploración	Profundidad (m)	SPT AASHTO T206 (N golpes)	Comportamiento
E-4	1.55	14	Consistencia media
	3.55	6	Compacidad floja a media
	5.50	22	Consistencia rígida
	6.20	R	Consistencia rígida
	7.45	48	Compacidad muy densa
	9.40	51	Compacidad muy densa

Fuente: elaboración propia

Del ensayo de penetración estándar se determinó que para suelos arenosos en número de golpes se encuentran en un rango de 30 a 50 golpes indicando que es un parámetro denso y mayor a 50 golpes con una compacidad muy densa. Para los suelos finos los números de golpes presentan intervalos de 8 a 30 golpes, indicando que son suelos firmes a duros y mayor a 30 golpes son suelos durísimos o rígidos, como se indica en la tabla XIV. De acuerdo con lo anterior se estableció que el subsuelo del área de estudio pertenece a la clase de un perfil de suelo rígido tipo D (AGIES NSE 2.1, 2018) como se representa en el apéndice 1.

Tabla XIV. **Número de golpes para estimar la cohesión y fricción de los suelos**

Tipo de suelo		Número de golpes (N)	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción
Suelos cohesivos	Muy blando	< 2	< 0.12	0
	Blando	2-4	0.12-0.25	0
	Firme	4-8	0.25-0.50	0
	Duro	8-15	0.50-1.00	0
	Muy duro	15-30	1.00-2.00	0
	Durísimo	> 30	> 2	0
Suelos no cohesivos	Suelto	< 10	0	28
	Medio	10-30	0	28-30
	Denso	> 30	0	32
Suelos intermedios	Suelto	< 10	0.05	8
	Medio	10-30	0.05-0.50	8-12
	Denso	> 30	0.50	12

Fuente: Terzaghi y Peck. (1967). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*.

Como se indicó en la metodología de ensayo de penetración estándar SPT, la confiabilidad de los números de golpes está en función de la correcta ejecución en el campo y los resultados de los parámetros de resistencia estarán en función de las correctas correcciones del número de golpes además de las correlaciones según el tipo de suelos y profundidad determinada.

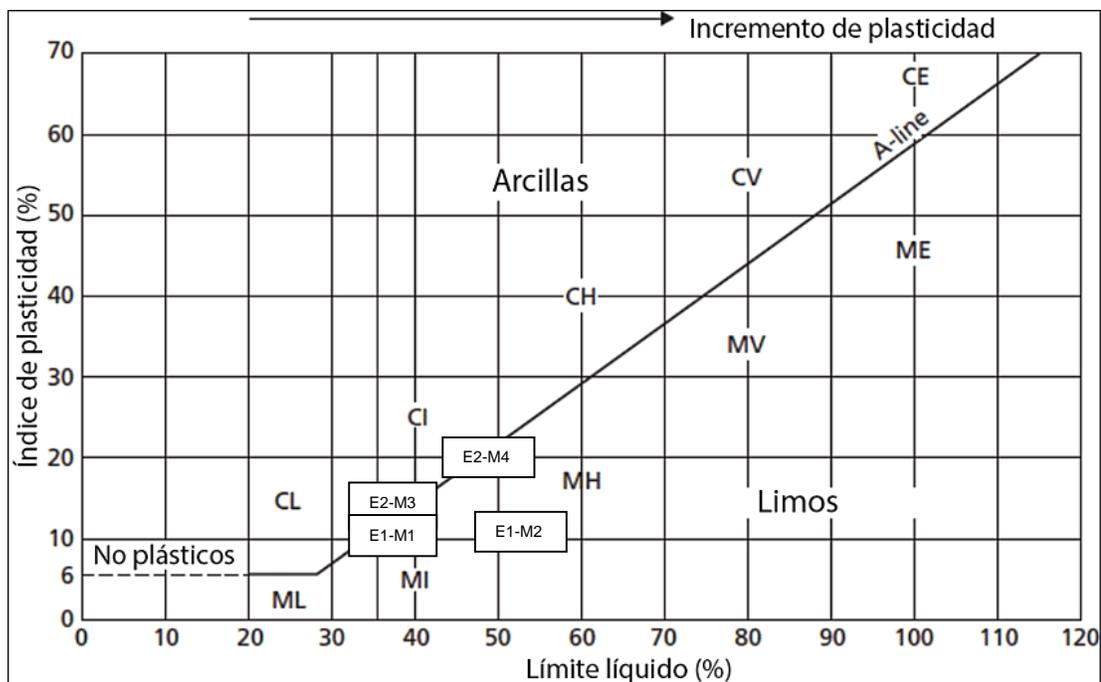
5.3. Análisis de los parámetros físicos

Los resultados de las tablas VI y VIII de los parámetros físicos del suelo compuestos de limos plásticos de acuerdo a los resultados de los ensayos de

granulometría y límites de consistencia, la clasificación según el SUCS los define como ML y MH, y la clasificación AASHTO M145 los agrupa en A-7-5 y A-7-6.

En las exploraciones de la aproximación de la zona 6, el resultado de índice plástico se determinó un potencial de expansión bajo a moderadamente alto en el orden según la carta de plasticidad de la figura 34, donde se comprobó que los resultados pertenecen a las zonas de limos de baja a alta compresibilidad.

Figura 34. **Carta de plasticidad de Casagrande para resultados de zona 6**

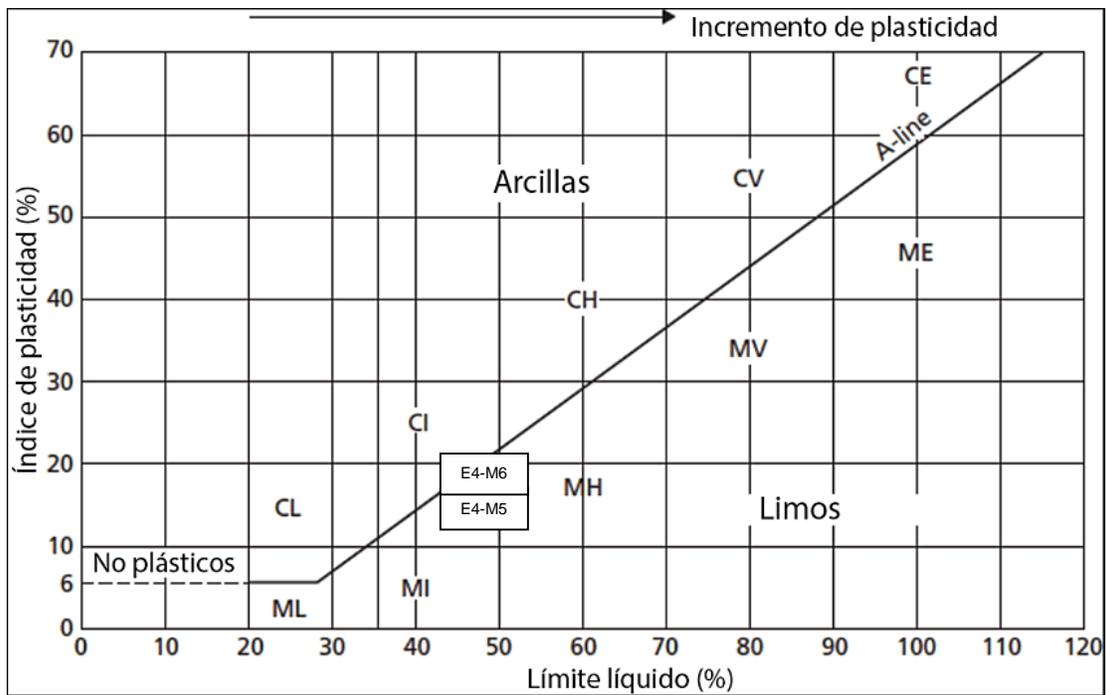


Fuente: Juárez Badillo y Rico Rodríguez. (2003). *Mecánica de suelos*.

En las exploraciones de la aproximación de la zona 17, el resultado de índice plástico se determinó un potencial de expansión bajo en el orden según la

carta de plasticidad de la figura 35 y se evidenció que pertenecen únicamente a las zonas de limos de baja compresibilidad.

Figura 35. **Carta de plasticidad de Casagrande para resultados de zona 17**



Fuente: Juárez Badillo y Rico Rodríguez. (2003). *Mecánica de suelos*.

Para los suelos de textura arenosa de grano fino a grueso ligeramente limosos no se encontró plasticidad. A través de la clasificación AASHTO M 145 se determinó el material piroclasto como suelos de granulares en grupos y rangos de A-2-4 y A-4 y en la clasificación SUCS se encontró en el rango SM, demostrándose la homogeneidad de este material presente en el sustrato de la investigación.

5.3.1. Análisis de los parámetros complementarios indicativos

Los resultados de los ensayos de gravedad específica determinaron que los materiales son mayores en relación a la densidad del agua, como se observa en la tabla VII y IX.

Los contenidos de humedad natural registrados se muestran en un orden del estado sólido a semi-sólido, inferiores al límite líquido. Para una adecuada interpretación visual del color, los materiales deben estar húmedos.

5.4. Análisis de parámetros de resistencia al corte

De los resultados de resistencia de esfuerzo de corte de la tabla X, se encontró que los ángulos de los suelos arenosos son mayores a 35° , confirmando un suelo denso y firme característico de arenas firmes cementadas. Para los suelos finos se obtuvieron parámetros mayores a 20° , con cohesiones típicas de suelos de consistencia medias a rígidas.

De la calicata 1 para el suelo limo arenoso a profundidad de 1.70 m se evidenció un ángulo de 25.30° y cohesión de 4.70 t/m^2 con un comportamiento rígido y una densidad natural de 1.47 g/cm^3 . A la profundidad de 6.05 m para el suelo de textura arenosa se determinó un ángulo de 37.60° y cohesión 1.30 t/m^2 , de un comportamiento firme.

De la calicata 3 a una profundidad de 1.50 m para un suelo de textura arenosa se encontró un ángulo de 36.20° y cohesión 1.60 t/m^2 definiendo un comportamiento firme con una densidad natural de 1.45 g/cm^3 y para la profundidad de 4.50 m para un suelo de textura arenosa se determinó un suelo firme y denso con un ángulo 38.90° y una cohesión de 0.95 t/m^2 .

Se establece que los resultados de ensayos de laboratorio de esfuerzo de corte en comparación a los resultados de resistencia en campo son consistentes ya que se determinan suelos duros, indicando que en su comportamiento natural presentan la capacidad de tenacidad, oponiéndose a ser fácilmente deformados.

5.5. Análisis de cimentaciones especiales

La planicie de las zonas 6 y 17 de la ciudad de Guatemala se definió a través de la caracterización geológica, resultados de las exploraciones geotécnicas *in situ* y en base a los análisis de los parámetros de ensayos de laboratorio, reconociendo un subsuelo homogéneo, con niveles bien definidos de piroclastos encontrándose en la superficie limos de baja a mediana plasticidad, conformando un subsuelo firme y rígido, sin evidencia de nivel freático aparente, cavidades, rellenos antrópicos no controlados ni fenómenos que alteren la naturaleza del sustrato.

Por lo que para obras de infraestructura que requieran apoyarse sobre el nivel de suelo relativamente plano con pendientes menores al 5 %, son favorables para una cimentación superficial.

Para emplazamientos de obras de infraestructura esenciales como puentes donde la cimentación esta próxima a los bordes de ladera, como también a los apoyos en medias laderas, las cimentaciones deberán ser profundas, sujetas a las condiciones de los análisis de estabilidad de talud.

El nivel de desplante del tipo de cimentación superficial o profunda estará sujeta a las cargas de diseño de la estructura.

CONCLUSIONES

1. Se caracterizaron tres unidades geológicas que afloran en el entorno de las zonas 6 y 17 de la ciudad de Guatemala. La unidad de calizas se encontró al Norte de la ciudad en contacto con el afloramiento de la unidad de rocas volcánicas, cubiertas en mayor proporción por la unidad de piroclastos que conforma el sustrato del área de estudio.
2. Mediante la fotointerpretación se identificó que la topografía es relativamente plana con valores de pendiente de hasta el 5% para la proyección de las zonas 6 y 17. Cercano a los bordes de escarpe los valores de pendientes aumentan moderadamente al 45%. Aunque no se determinaron fracturas ni movimientos de ladera, la escorrentía superficial se conforma de canales naturales, en donde las pendientes más elevadas la erosión es gradualmente un factor desencadenante.
3. En la zona 6 se identificó que hay mayor incidencia de actividad antrópica, debido a que en los bordes de escarpe se han asentado viviendas populares rodeando el contorno de la ladera. En la zona 17 el suelo se ha utilizado para desarrollo urbano para el comercio y fábricas privadas, al inicio de la ladera el suelo vegetal se encuentra en mayor proporción, reduciendo la actividad antrópica.
4. De acuerdo a los ensayos de laboratorio de esfuerzos cortantes para las arenas, se determinó que son altamente friccionantes, con mayor resistencia oponiéndose a la deformación. La humedad natural para las muestras finas con plasticidad se encontraron en una fase semi-sólida

siendo inferior a la fase del límite líquido presentando tenacidad con un suelo de comportamiento firme y rígido.

5. A través de los parámetros de resistencia por medio del número de golpes del ensayo SPT, se determinó que los suelos finos son de comportamiento medios a rígidos y las arenas con una consistencia media a firme.

RECOMENDACIONES

1. Por las condicionantes de la geometría y geomorfología según el análisis de pendientes, es necesario una captación adecuada de la escorrentía superficial para el control de erosión en las vertientes naturales evitando alteraciones de humedad y modificaciones de los parámetros de resistencia de suelo.
2. Las excavaciones futuras para el emplazamiento de las cimentaciones deberán estar en función a los análisis de estabilidad del talud local y global, para evitar deslizamientos o desprendimientos, con la mitigación o soluciones permanentes que requiera el diseño de los diferentes tipos de muros de contención.
3. Debido a los cambios volumétricos por la saturación en suelos finos plásticos se recomienda utilizar los parámetros de resistencia residual determinados en los gráficos de esfuerzo-deformación de los ensayos de laboratorio de corte directo y triaxial.
4. El ensayo SPT para la obtención de los parámetros de cohesión no drenada y ángulo de fricción serán utilizados únicamente en la etapa de exploración, por lo que se recomienda que para diseños definitivos utilizar los parámetros por medio de muestras inalteradas de ensayos de corte directo y triaxial en laboratorio.
5. Para el correcto desplante y dimensionamiento de cimentación en función a la envergadura de la estructura y la factibilidad de la

investigación, se deben considerar los métodos de exploraciones combinados, adicionando otras metodologías, técnicas y ensayos complementarios para una mejor interpretación del funcionamiento dinámico del subsuelo.

REFERENCIAS

1. Acevedo, L. (2016). *Caracterización física y geológica de la roca para cimentación del nuevo puente “Los Esclavos”, kilómetro 66+400 carretera CA-01 Oriente, Municipio de Cuilapa, Departamento de Santa Rosa.* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala.
2. Agudelo, D. E. (2012). *Influencia de los procesos de meteorización en la estructura del suelo y la estabilidad de taludes.* (Tesis de licenciatura). Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Colombia. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/11109>
3. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2018). *Normas de seguridad estructural para Guatemala NSE 2.1, Estudios geotécnicos.* Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.agies.org/bibliotecas/>
4. Barba, D., Martínez, A., García, F., Ibarra, E., León, E., López, N., . . . Segovia, J. (2017). *Ingeniería de cimentaciones profundas 1* (Vol. 1). México D.F., México: Copyright.
5. Beccaluva, L., Bellia, S., Coltorti, M., Dengo, G., Giunta, G., Méndez, J., . . . Siena, F. (1995). El borde noroccidental de la Placa del Caribe en Guatemala: nuevos datos geológicos y petrológicos de la faja ofiolítica del Motagua. *Ofioliti*, 20(1), 1-15.

6. Bonneval, H. (1972). *Fotogrametría general* (Vol. 1). París, Francia: Eyrolles.
7. Bowles, J. (1980). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil* (2.^a ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana, S. A.
8. Braja, D. (2006). *Principios de ingeniería de cimentaciones* (5.^a ed.). México, D.F. México: Cengage Learning.
9. Castellanos, S. (2015). Diferencias de las propiedades fisico-mecánicas en arcillas de tres formaciones geológicas, distribuidas en el bloque Chortí, República de Guatemala. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala.
10. Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (5.^a ed.). México D.F., México: Limusa.
11. Dengo, G. (1978). *Marco tectónico de la región del Caribe: Reseña histórica*. Recuperado de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Septiembre-Octubre2005/CD-2/pdf/spa/doc5164/doc5164-contenido.pdf>
12. Dengo, G., y Bohnenberger, O. (1969). Desarrollo estructural del norte de Centroamérica y el Caribe Occidental. *Memorias de la Asociación Estadunidense de Geólogos del Petróleo*, 11, 203-220.
13. Gil, J. (2018). *Conceptualización de la metodología de un estudio geotécnico definitivo con base en la literatura científica y la norma legal vigente*. (Tesis de licenciatura). Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia. Recuperado de

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22886/1/tesis%20ultima%20final.pdf>

14. González, L., Ferrer, M., Ortoño, L., y Oteo, C. (2004). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
15. González, M. (2001). *El terreno* (1.^a ed.). Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya, SL.
16. Hernández, L., y Santamarta, J. (Edits.). (2015). *Ingeniería geológica en terrenos volcánicos: Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias* (1.^a ed.). Madrid, España: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.
17. Instituto Geográfico Nacional, IGN. (1974). *Atlas Nacional de Guatemala*. Guatemala: IGN.
18. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH. (18 de Septiembre de 2019). *Sismología, marco tectónico para Guatemala*. Recuperado de <http://www.insivumeh.gob.gt/geofisica/indice%20sismo.htm#INDICE%20DEL%20CONTENIDO>
19. Juárez Badillo, E., y Rico Rodríguez, A. (2003). *Mecánica de suelos* (Vol. 1). México D.F., México: Limusa, S. A. DE C. V.
20. Lambe, T. W., y Whitman, R. (2004). *Mecánica de suelos* (2.^a ed.). México, D.F., México: Limusa, S.A. De C.V.

21. Lazcano, S. (23 y 24 de Noviembre de 2018). Suelos pumíticos: suelos no-convencionales. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. Congreso llevado a cabo en León, Guanajuato: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. Recuperado de https://www.academia.edu/43266878/Suelos_pum%C3%ADticos_suelos_no_convencionales_Pumice_soils_non_conventional_soils_
22. Lugo, E. (2018). *Combinación de los métodos Janbú-Spencer en el análisis de estabilidad de taludes para el empleo de sistemas flexibles de alta resistencia en la construcción de carreteras*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Federico Villarreal, Facultad de Ingeniería, Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2272>
23. Mórán, S. D., Chiquín, L. G., y Requena, J. (Marzo de 2001). *Mapeo geológico de superficie del cuadrángulo Granados, escala 1:50,000*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Facultad de Geología, Cobán. Recuperado de <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/INF-2000-009.pdf>
24. Muñoz, C., y Corredor, A. (2018). *Caracterización geológica, geotécnica y geomorfológica para la sectorización por tramos homogéneos: caso de estudio: 19,7 km de la carretera que comunica al municipio de Anorí con la vereda Alto de La primavera, Antioquia*. (Tesis de licenciatura). Universidad EAFIT, Facultad de Ciencias, Medellín, Colombia. Recuperado de <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/13707>
25. Pérez, B. (2014). *Caracterización geotécnica de los deslizamientos de taludes del km 18+900 al km 19+600 de la ruta departamental 5, carretera a la Ciudad Quetzal, San Juan Sacatepéquez, Guatemala*.

(Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala.

26. Pérez, C. (2009). Estructura geológica del Valle de la Ciudad de Guatemala interpretada mediante un modelo de cuenca por distensión. *Revista Geológica de América Central*, 41, 71-78. doi:10.15517/RGAC.V0I41.4179
27. Pérez, C. L. (2021). Modelo para interpretar el origen de las estructuras volcánicas emplazadas en los flancos de la depresión tectónica del Valle de la ciudad de Guatemala. *Centro de estudios superiores de energía y minas*, 1, 1-4.
28. Quea, L. (2016). *Diseño de estabilidad de taludes para el nivel de resistencia al corte en el frente de minado del proyecto San Antonio y María-Ananea*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Facultad de Ingeniería, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6651>
29. Quirós, E. (2015). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil* (1.^a ed.). España: Universidad de Extremadura.
30. Red Sismológica Nacional, RSN UCR-ICE. (2015). *Glosario de Geología*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica. Recuperado de https://rsn.ucr.ac.cr/images/Noticias/2016_07/GlosarioRSN.pdf
31. Rivera, K. (s.f.). *Cimentaciones superficiales y profundas: Mecánica de suelos aplicada, Unidad IV*. Recuperado de Academia:

https://www.academia.edu/19524263/Cimentaciones_Superficiales_y_Profundas

32. Schwartz , D. P., Cluff, L. S., y Donnelly, T. W. (1979). Falla cuaternaria a lo largo del límite de las placas del Caribe y América del Norte en América Central. *Desarrollo en Geotectónica*, 13, 431-445. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41783-1.50070-2>
33. Schwartz, D. P. (1985). Límite de placas Caribe-América del Norte en Centroamérica: Nuevos datos sobre tectónica cuaternaria. *Notas del Terremoto*, 55, 28.
34. Servicio Geológico Mexicano. (22 de Marzo de 2017). *Geotecnia*. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157802/Que-es-la-Geotecnia.pdf>
35. Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Recuperado de <http://desastres.medicina.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
36. Suárez, J. (2009). *Deslizamientos, análisis geotécnico* (Vol. 1). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander UIS.
37. Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra* (8.^a ed.). Madrid, España: Pearson Educación S. A.

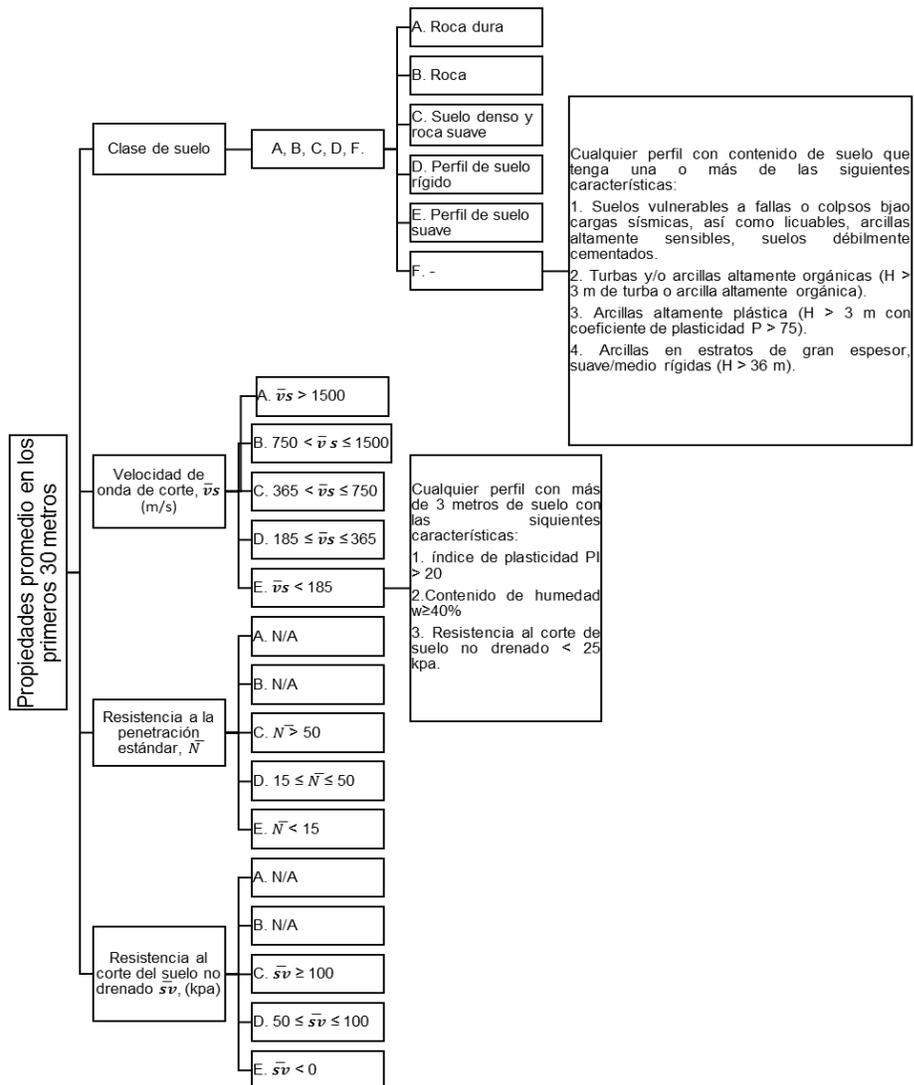
38. Terzaghi, K., y Peck, R. (1967). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica* (2.^a ed.). Barcelona, España: El Ateneo S. A.

39. Unidad de Políticas e Información Estratégica y Programa de Emergencia por Desastres Naturales, UPIE-MAGA y MAGA-BID. (Junio de 2001). *Mapa fisiográfico-geomorfológico de la República de Guatemala, a escala 1:250,000, Memoria técnica*. Guatemala: MAGA. Recuperado de <https://www.maga.gob.gt/download/fisiografia.pdf>

40. Van Zuidam , R. (1986). *Fotointerpretación aérea en análisis de terreno y mapeo geomorfológico*. Enschede: Smith, La Haya.

APÉNDICE

Apéndice 1. Clasificación del tipo de suelo



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Normas de Seguridad Estructural Para Guatemala NSE 2.1 (2018). Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.

ANEXOS

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

Resumen de los ensayos

Proyecto: Aproximaciones zona 6

TIPO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	GRANULOMETRIA			PLASTICIDAD		CLASIFICACIÓN		% HUMEDAD NATURAL
		% Finos (tamiz #200)	% Arena	% Grava	LL	IP	SCU	AASHTO	
POZO A CIELO EXPLORACION 1	0.26 - 1.70	41.66	58.34	0.00	36.70	13.77	SM	A-4	28.23
	1.70 -3.00	51.34	48.56	0.10	51.30	11.52	MH	A-7-5	40.27
	4.00 - 6.50	30.06	62.83	7.11	NP	NP	SM	A-2-4	22.93
	6.50 -7.00	39.38	57.20	3.42	NP	NP	SM	A-4	23.49
	7.50 - 15.00	37.55	59.22	3.23	NP	NP	SM	A-4	25.37

OBSERVACIONES:

Muestra no representativa: -

NP: No presenta

N/A: No aplica

DGP: ASTM D-3441

G.S: ASTM D-854

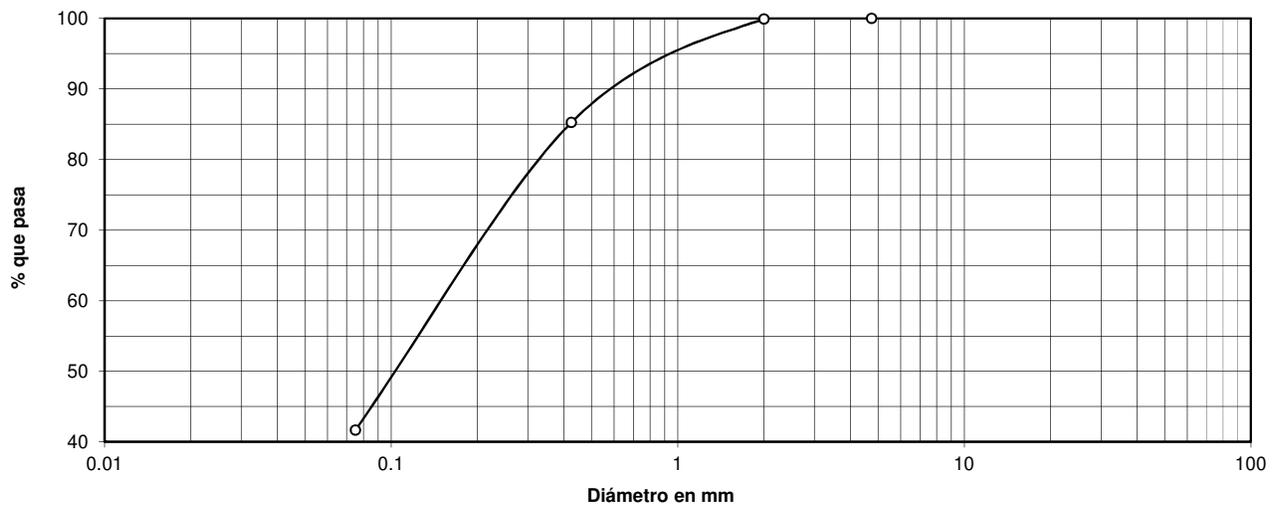
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

Proyecto: Aproximaciones zona 6

Muestra: Pozo a Cielo Abierto **Profundidad Total (m):** 0.26 - 1.70

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	
4	4.75	100.00
10	2	99.92
40	0.425	85.23
200	0.075	41.66

% de Grava: 0.00
% de Arena: 58.34
% de finos: 41.66



Descripción del suelo: Arena limosa con pómez, color café

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-4

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: 36.7 -Indice de Plasticidad: 13.77 -Limite Plastico: 22.91
Humedad natural %: 38.23

Observaciones:

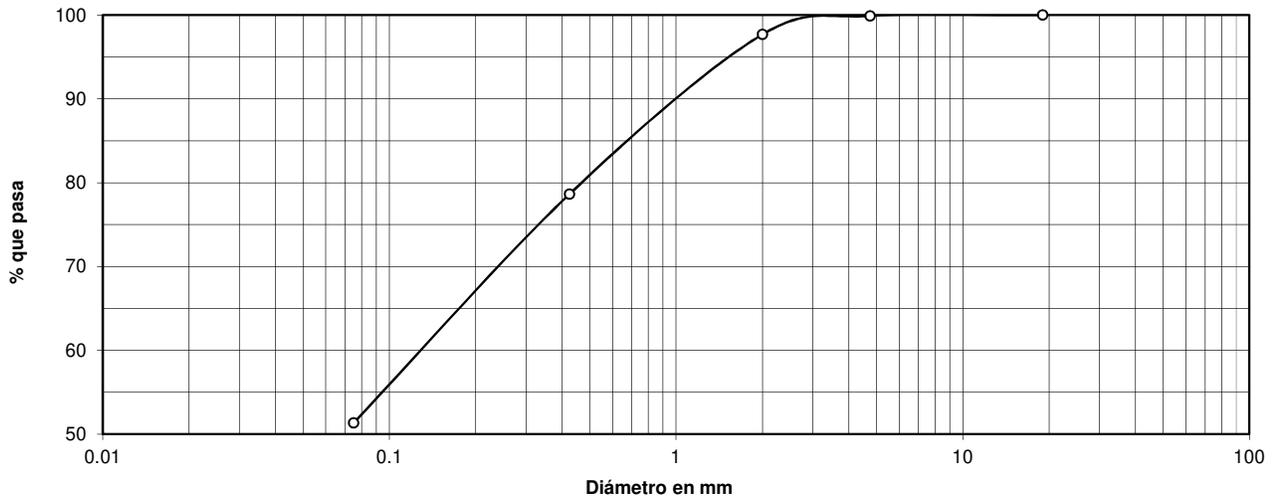
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

Proyecto: Aproximaciones zona 6

Muestra: Pozo a Cielo Abierto **Profundidad (m):** 1.70 - 3.00

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	99.90
10	2	97.68
40	0.425	78.65
200	0.075	51.34

% de Grava: 0.10
% de Arena: 48.56
% de finos: 51.34



Descripción del suelo: Limo arcilloso arenoso con pómez, color café claro

Clasificación S.C.U.: MH **AASHTO:** A-7-5

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: 51.3 -Indice de Plasticidad: 11.52 -Limite Plastico: 39.81
Humedad natural %: 40.27

Observaciones:

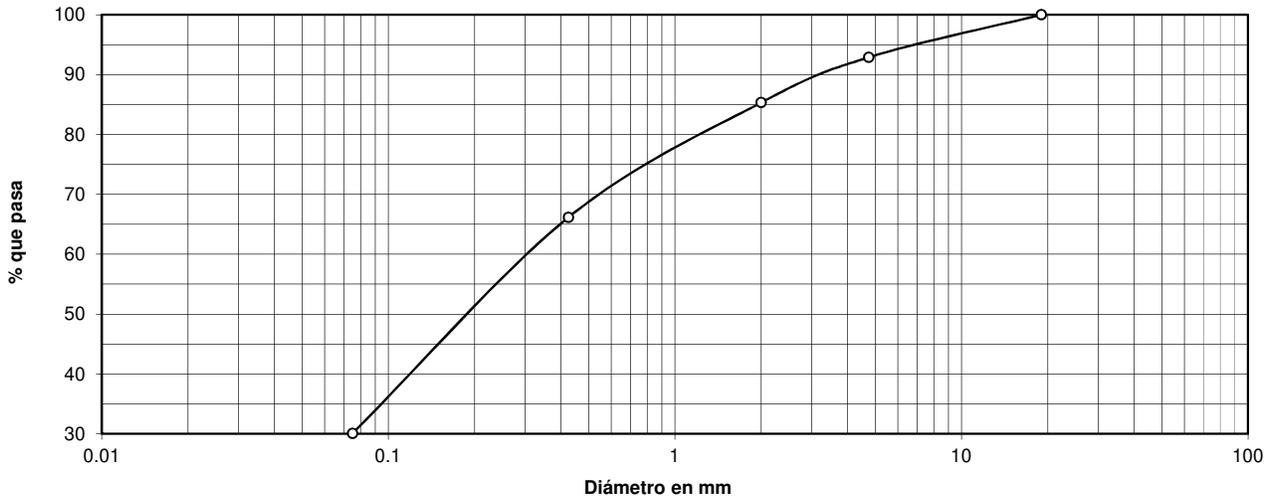
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

Proyecto: Aproximaciones zona 6

Muestra: Pozo a Cielo Abierto **Profundidad (m):** 4.00 - 6.50

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	92.89
10	2	85.32
40	0.425	66.15
200	0.075	30.06

% de Grava: 7.11
% de Arena: 62.83
% de finos: 30.06



Descripción del suelo: Arena limosa con pómez, color beige - rosado :

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-2-4

A-Límites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Límite Líquido: NP -Índice de Plasticidad: NP -Límite Plástico: NP

Humedad natural %: 22.93

Observaciones: NP= NO PRESENTA

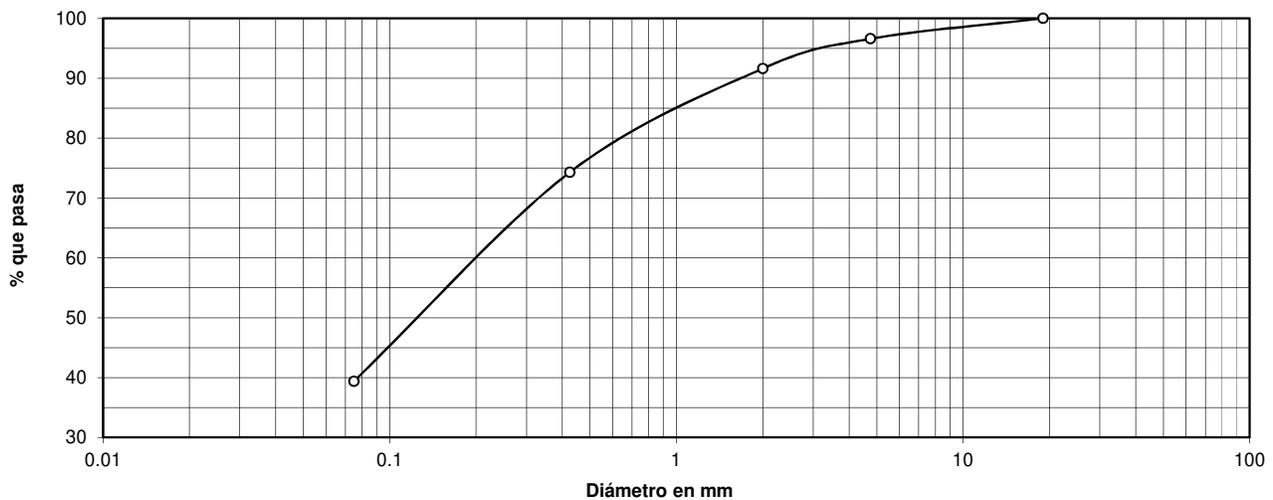
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

Proyecto: Aproximaciones zona 6

Muestra: Pozo a Cielo Abierto **Profundidad (m):** 6.50 - 7.50

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	96.58
10	2	91.60
40	0.425	74.29
200	0.075	39.38

% de Grava: 3.42
% de Arena: 57.20
% de finos: 39.38



Descripción del suelo: Arena limosa con pómez, color café claro

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-4

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Líquido: NP -Indice de Plasticidad: NP -Limite Plástico: NP

Humedad natural %: 23.49

Observaciones: NP= NO PRESENTA

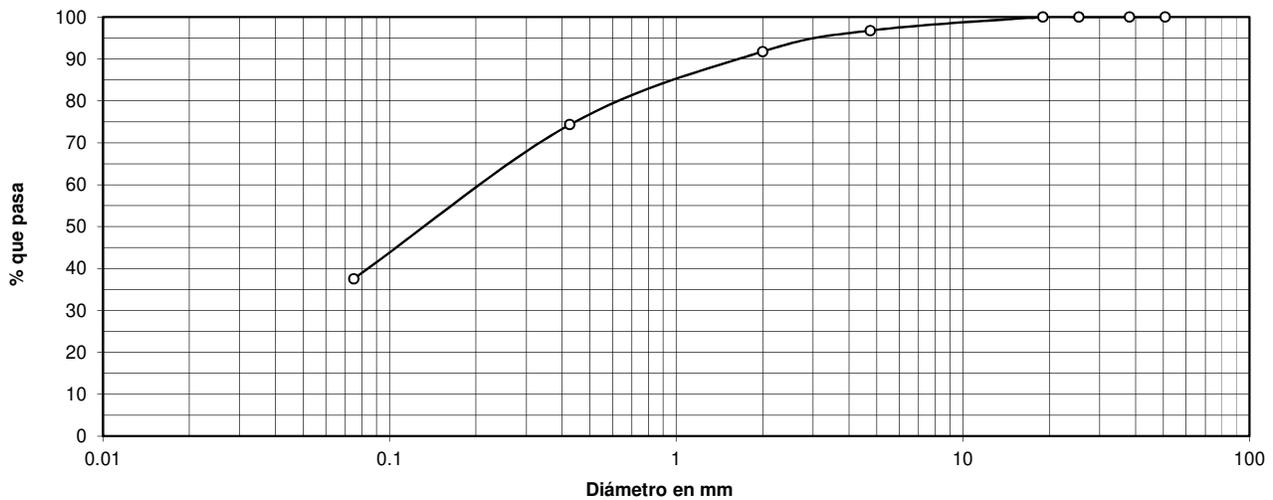
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

Proyecto: Aproximaciones zona 6

Muestra: Pozo a Cielo Abierto **Profundidad (m):** 7.50 - 15.00

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	100.00
1 1/2"	38.1	100.00
1 "	25.40	100.00
3/4"	19	100.00
4	4.75	96.77
10	2	91.75
40	0.425	74.32
200	0.075	37.55

% de Grava: 3.23
% de Arena: 59.22
% de finos: 37.55



Descripción del suelo: Arena limosa con pómez, color beige

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-4

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Líquido: NP -Indice de Plasticidad: NP -Limite Plástico: NP

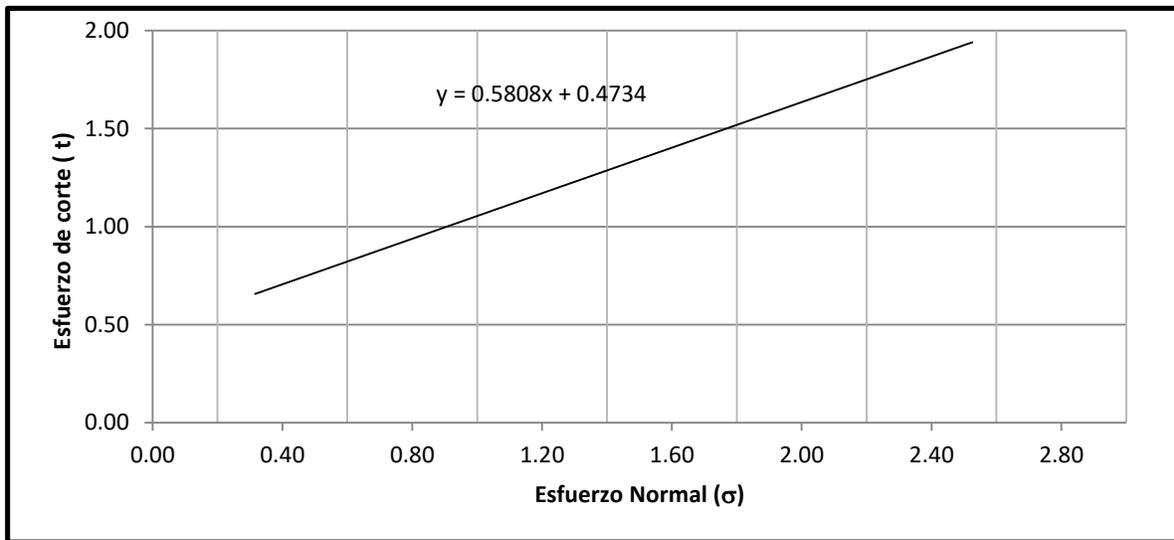
Humedad natural %: 25.37

Observaciones: NP= NO PRESENTA

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

Asunto: ENSAYO DE CORTE DIRECTO
NORMA ASTM 3080/79

Proyecto: Aproximaciones zona 6
Muestra: Calicata Estructura
Profundidad: 1.70 metros



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 25.3^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 4.7 \text{ t/m}^2$
--	---

DESCRIPCION DEL SUELO: Limo arcillo arenoso con pomez color café claro

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

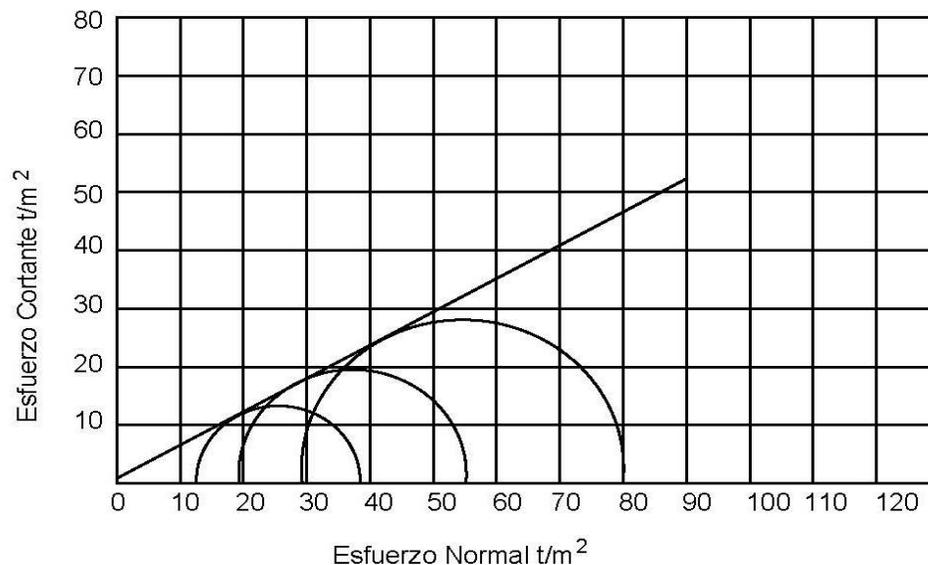
OBSERVACIONES: Muestra por el personal de laboratorio

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.60	0.87	1.26	1.91
DENSIDAD HUMEDA (g/cm ³)	1.47	1.47	1.47	1.47
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1.06	1.06	1.06	1.06
HUMEDAD (%H)	38.5	38.5	38.5	38.5

ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, DIAGRAMA DE MOHR AASHTO T-234

PROYECTO: Aproximacion zona 6

Exploracion: 1 Profundidad: 6.05 metros Muestra: 1



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 37.60^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 1.30 \text{ t/m}^2$
---	--

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.
 DESCRIPCION DEL SUELO: Arena limosa pomez color beige claro
 DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"
 OBSERVACIONES: Muestra tomada por el interesado.

PROBETA No.	1	1	1
PRESION LATERAL (t/m ²)	5	10	20
DESVIADOR EN ROTURA q(t/m ²)	39.20	40.20	59.82
PRESION INTERSTICIAL u(t/m ²)	x	x	x
DEFORMACION EN ROTURA Er (%)	1.5	4.0	6.5
DENSIDAD HUMEDA (t/m ³)	1.41	1.41	1.41
HUMEDAD (%H)	22.9	22.9	22.9

Atentamente,

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

Resumen de los ensayos

Proyecto: APROXIMACIONES ZONA 6

TIPO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	GRANULOMETRIA			PLASTICIDAD		CLASIFICACIÓN		% HUMEDAD NATURAL
		% Finos (tamiz #200)	% Arena	% Grava	LL	IP	SCU	AASHTO	
EXPLORACION 5									
E-2	0.22 - 0.80	36.61	38.98	24.41	NP	NP	SM	A-4	30.40
	0.80 - 2.70	72.08	27.35	0.57	40.70	15.93	ML	A-7-6	31.06
	2.70 - 9.34	44.27	44.47	11.26	NP	NP	SM	A-4	46.87
	9.34 - 12.05	61.70	33.21	5.09	50.30	23.13	MH	A-7-6	47.24
	12.05 - 15.35	47.60	48.41	3.99	NP	NP	SM	A-4	36.49

OBSERVACIONES:

Muestra no representativa: -

NP: No presenta

**ANALISIS GRANULOMETRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

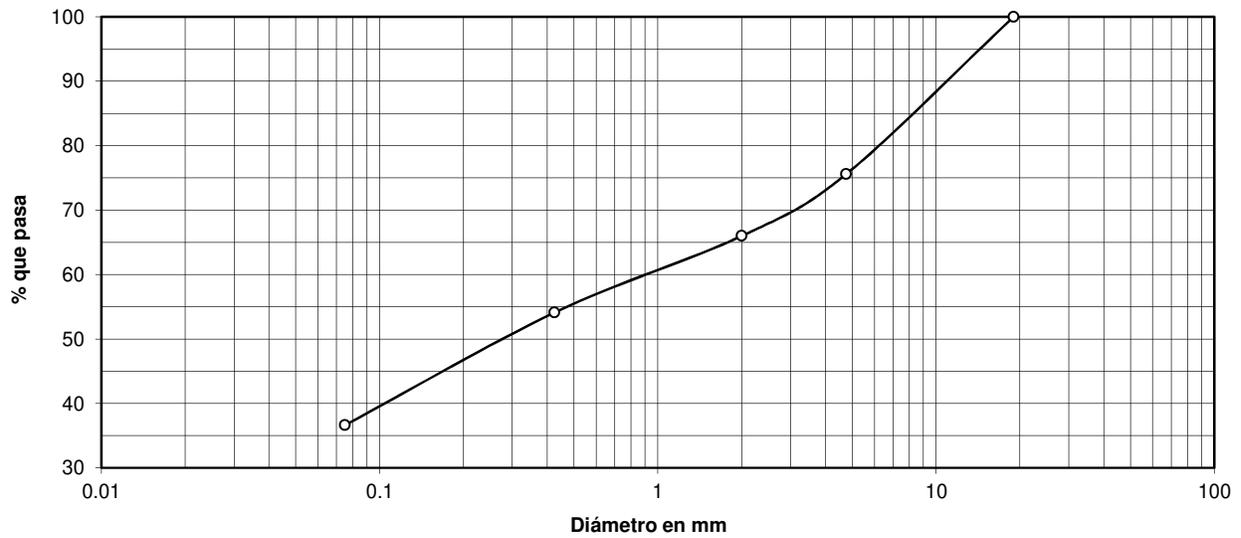
Proyecto: Aproximaciones zona 6

Muestra: Exploracion 2

Prof. De Muestra (m): 0.22 - 0.80

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	75.59
10	2	65.98
40	0.425	54.09
200	0.075	36.61

% de Grava: 24.41
% de Arena: 38.98
% de finos: 36.61



Descripción del suelo: Arena limosa con gravilla, color café claro.

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-4

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: NP -Indice de Plasticidad: NP -Limite Plastico: NP
Humedad natural %: 30.40

Observaciones:

NP: No Presenta

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

Proyecto: Aproximaciones zona 6

Muestra: Exploracion 2

Prof. De Muestra (m): 0.80 - 2.70

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	99.43
10	2	99.22
40	0.425	93.04
200	0.075	72.08

% de Grava: 0.57
% de Arena: 27.35
% de finos: 72.08



Descripción del suelo: Limo arcillo-arenoso color café claro

Clasificación S.C.U.: ML **AASHTO:** A-7-6

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: 40.7 -Indice de Plasticidad 15.93 -Limite Plastico: 24.77
Humedad natural %: 38.06

Observaciones:

NP: No Presenta

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

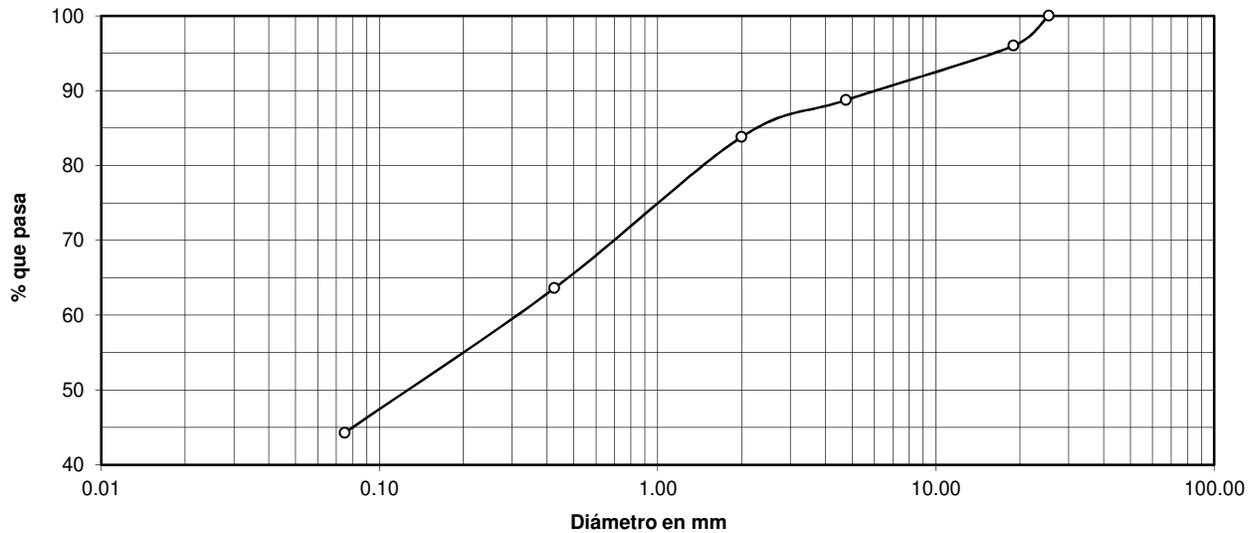
Proyecto: Aproximaciones zona 6

Muestra: Exploracion 2

Prof. De Muestra (m): 2.70 - 9.34

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	100.00
3/4"	19	95.99
4	4.75	88.74
10	2	83.80
40	0.425	63.59
200	0.075	44.27

% de Grava: 11.26
% de Arena: 44.47
% de finos: 44.27



Descripción del suelo: Arena pómez limosa de grano fino con gravilla, color beige oscuro.

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-4

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: NP -Indice de Plasticidad: NP -Limite Plastico: NP
Humedad natural %: 46.87

Observaciones:

NP: No Presenta

**ANALISIS GRANULOMETRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

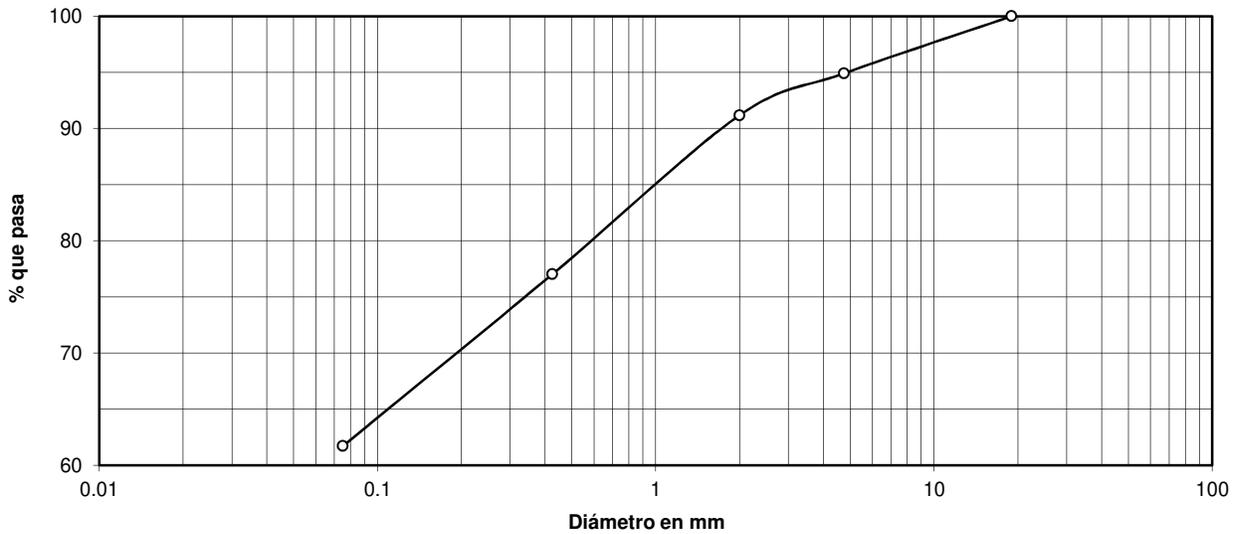
Proyecto: Aproximaciones zona 6

Muestra: Exploracion 2

Prof. De Muestra (m): 9.34 - 12.05

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	94.91
10	2	91.17
40	0.425	77.01
200	0.075	61.70

% de Grava: 5.09
% de Arena: 33.21
% de finos: 61.70



Descripción del suelo: Limo arcillo-arenoso con pómez y gravilla, color café oscuro.

Clasificación S.C.U.: MH **AASHTO:** A-7-6

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: 50.3 -Indice de Plasticidad: 23.13 -Limite Plastico: 27.17
Humedad natural %: 47.24

Observaciones:

NP: No Presenta

**ANALISIS GRANULOMETRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

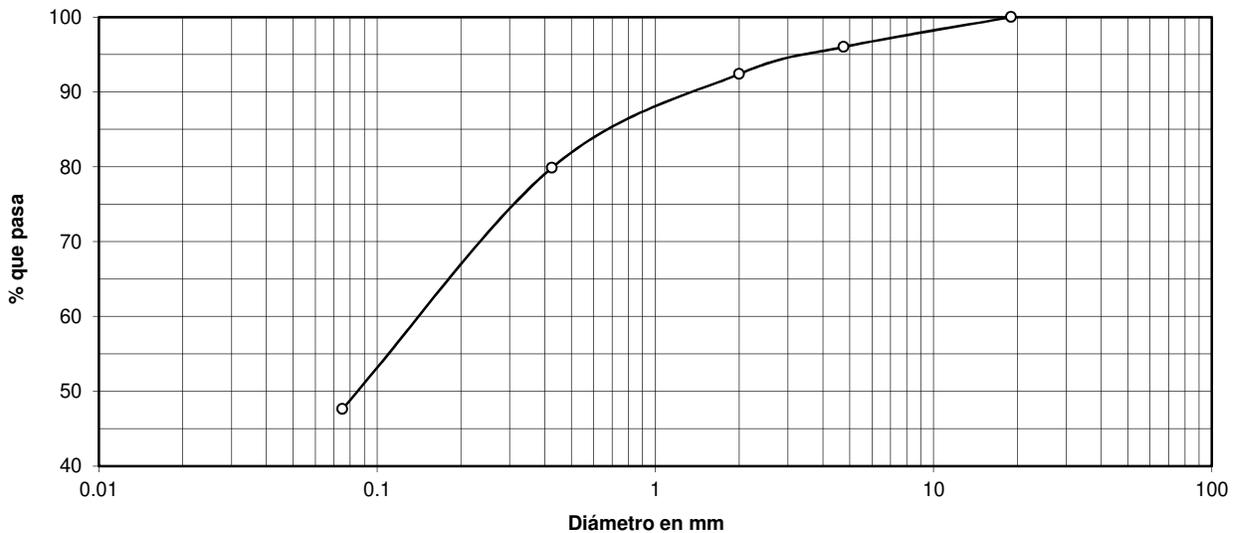
Proyecto: Aproximaciones zona 6

Muestra: Exploracion 2

Prof. De Muestra (m): 12.05 - 15.35

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	96.01
10	2	92.39
40	0.425	79.87
200	0.075	47.60

% de Grava: 3.99
% de Arena: 48.41
% de finos: 47.60



Descripción del suelo: Arena pómez limosa de grano fino con gravilla, color beige.

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-4

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: NP -Indice de Plasticidad NP -Limite Plastico: NP
Humedad natural %: 36.49

Observaciones:

NP: No Presenta

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

Resumen de los ensayos

Proyecto: Aproximaciones zona 17

TIPO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	GRANULOMETRIA			PLASTICIDAD		CLASIFICACIÓN		% HUMEDAD NATURAL
		% Finos (tamiz #200)	% Arena	% Grava	LL	IP	SCU	AASHTO	
EXPLORACION 4									
E-3	0.00 - 2.00	30.35	47.60	22.05	NP	NP	SM	A-1-b	10.07
	2.00 - 3.00	30.97	58.61	10.42	NP	NP	SM	A-2-4	37.77
	3.00 - 5.00	43.55	52.46	3.99	NP	NP	SM	A-4	44.55
	5.00 - 10.00	34.80	61.73	3.47	NP	NP	SM	A-2-4	44.65

OBSERVACIONES:

Muestra no representativa: -

NP: No presenta

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

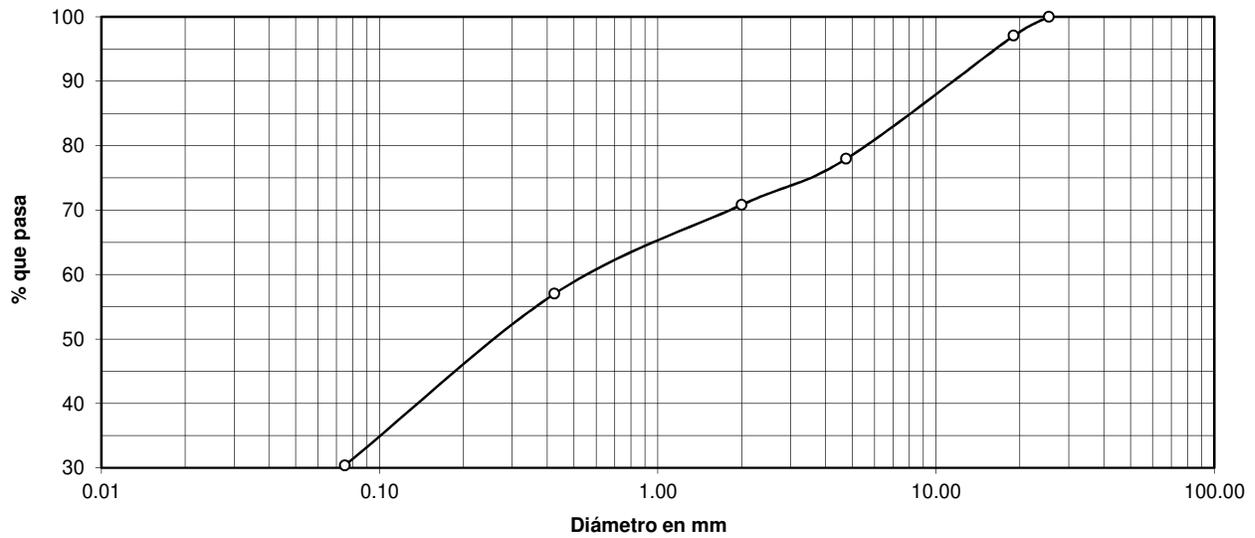
Proyecto: Aproximaciones zona 17

Muestra: Exploracion 3

Prof. De Muestra (m): 0.00 - 2.00

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	100.00
3/4"	19	97.05
4	4.75	77.95
10	2	70.80
40	0.425	57.00
200	0.075	30.35

% de Grava: 22.05
% de Arena: 47.60
% de finos: 30.35



Descripción del suelo: Arena pomez limosa con gravilla, color café oscuro

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-1-b

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: NP -Indice de Plasticidad: NP -Limite Plastico: NP
Humedad natural %: 10.07

Observaciones:

NP: No Presenta

**ANALISIS GRANULOMETRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

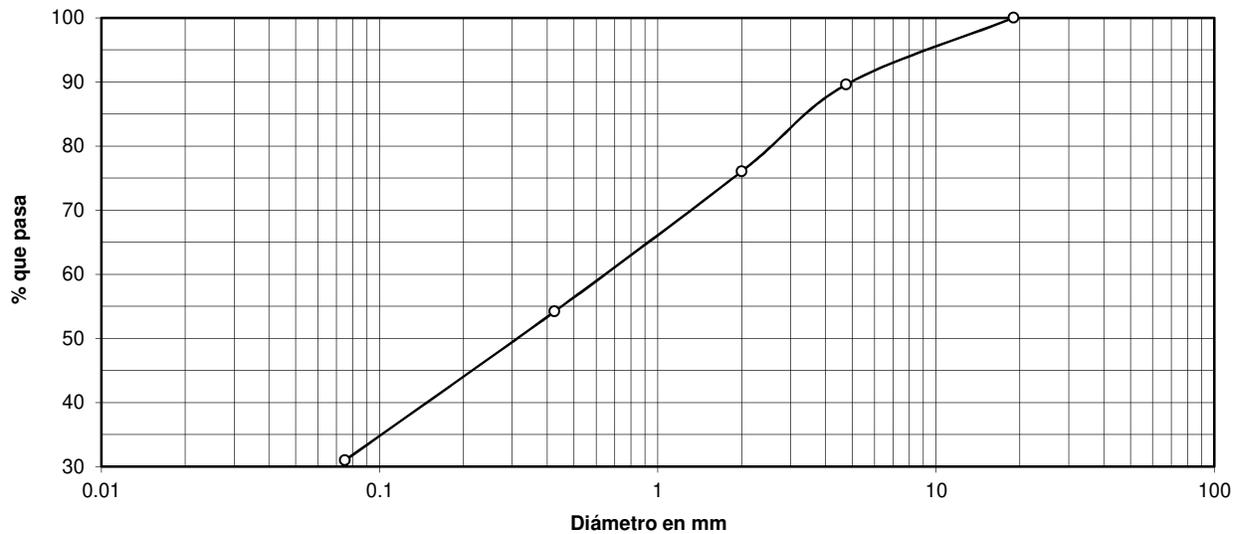
Proyecto: Aproximaciones zona 17

Muestra: Exploracion 3

Prof. De Muestra (m): 2.00 - 3.00

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	89.58
10	2	76.04
40	0.425	54.17
200	0.075	30.97

% de Grava: 10.42
% de Arena: 58.61
% de finos: 30.97



Descripción del suelo: Arena limosa con pómez, color café

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-7-6

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: NP -Indice de Plasticidad NP -Limite Plastico: NP
Humedad natural %: 37.77

Observaciones:

NP: No Presenta

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

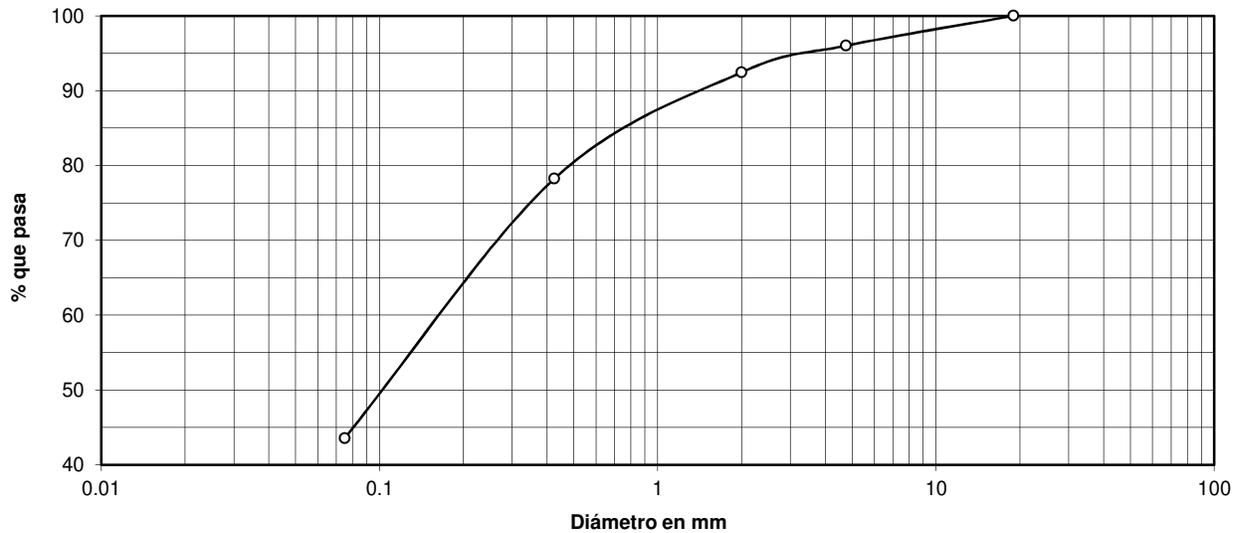
Proyecto: Aproximaciones zona 17

Muestra: Exploracion 3

Prof. De Muestra (m): 3.00 - 5.00

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	96.01
10	2	92.44
40	0.425	78.23
200	0.075	43.55

% de Grava: 3.99
% de Arena: 52.46
% de finos: 43.55



Descripción del suelo: Arena pómez limosa con gravilla, color beige-rosado

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-4

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: NP -Indice de Plasticidad: NP -Limite Plastico: NP
Humedad natural %: 44.55

Observaciones:

NP: No Presenta

**ANALISIS GRANULOMETRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

Proyecto: Aproximaciones zona 17

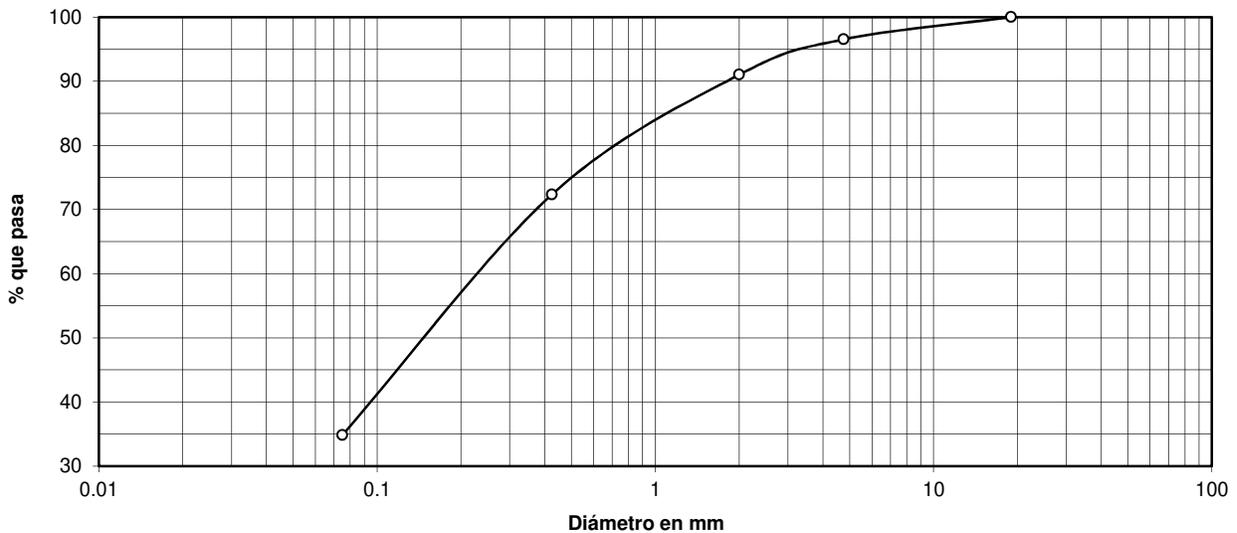
Muestra: Exploracion 3

Prof. De Muestra (m):

5.00 - 10.00

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	96.53
10	2	91.01
40	0.425	72.34
200	0.075	34.80

% de Grava: 3.47
% de Arena: 61.73
% de finos: 34.80



Descripción del suelo: Arena pómez limosa color café-rosado (semi consolidado)

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-2-4

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: NP -Indice de Plasticidad NP -Limite Plastico: NP

Humedad natural %: 44.65

Observaciones:

NP: No Presenta

CONTROL DE CALIDAD

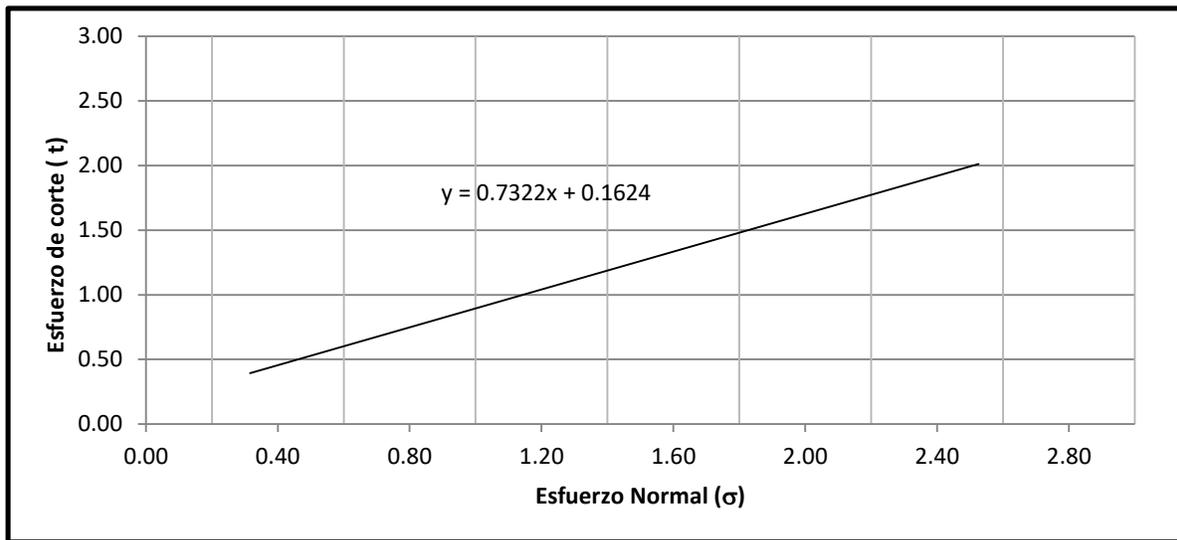
Asunto: ENSAYO DE CORTE DIRECTO
NORMA ASTM D 3080

Proyecto: Aproximaciones zona 17

Profundidad: 1.50 metros

Muestra: M-1

Exploracion: E-3



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 36.2^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 1.6 \text{ t/m}^2$
--	---

DESCRIPCION DEL SUELO: Arena pomez limosa con gravilla, color café oscuro.

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

OBSERVACIONES: Muestra inalterada proporcionada por el interesado.

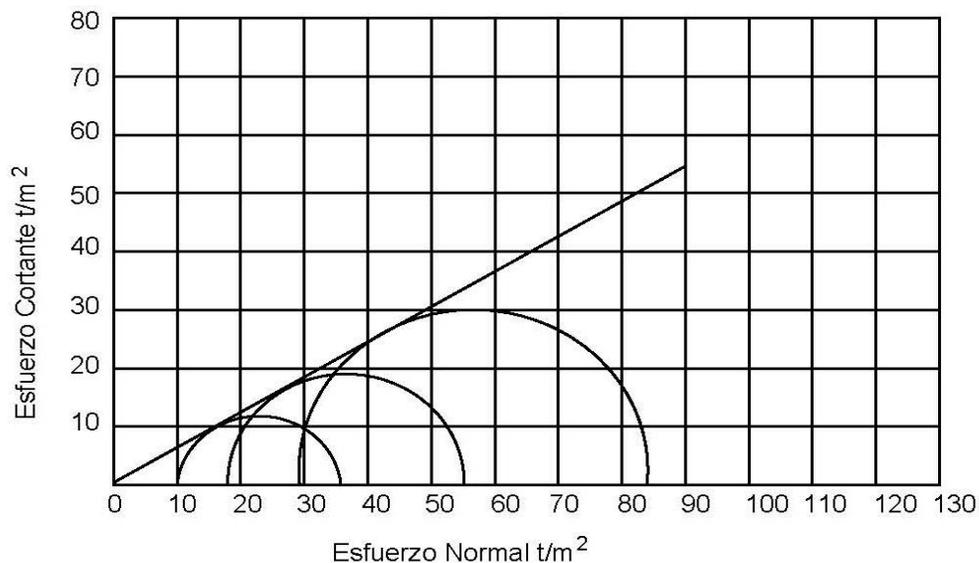
PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm^2)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm^2)	0.32	0.69	1.12	1.99
DENSIDAD HUMEDA (g/cm^3)	1.45	1.45	1.45	1.45
DENSIDAD SECA (g/cm^3)	1.32	1.32	1.32	1.32
HUMEDAD (%H)	10.1	10.1	10.1	10.1

Vo. Bo.

ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, DIAGRAMA DE MOHR AASHTO T-234

PROYECTO: Aproximacion zona 17

Exploracion: 3 Profundidad: 1.50 metros Muestra: 2



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 38.90^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 0.95 \text{ t/m}^2$
---	--

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.
 DESCRIPCION DEL SUELO: Arena pomez limosa color café.
 DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"
 OBSERVACIONES: Muestra tomada por el interesado.

PROBETA No.	1	1	1
PRESION LATERAL (t/m ²)	5	10	20
DESVIADOR EN ROTURA q(t/m ²)	39.20	40.20	59.82
PRESION INTERSTICIAL u(t/m ²)	-	-	-
DEFORMACION EN ROTURA Er (%)	1.5	4.0	6.5
DENSIDAD HUMEDA (t/m ³)	1.45	1.45	1.45
HUMEDAD (%H)	10.1	10.1	10.1

Atentamente,

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

Resumen de los ensayos

Proyecto: Aproximación zona 17

TIPO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	GRANULOMETRIA			PLASTICIDAD		CLASIFICACIÓN		G.S	% HUMEDAD NATURAL
		% Finos (tamiz #200)	% Arena	% Grava	LL	IP	SCU	AASHTO		
E-4	0.05 - 1.10	40.45	53.87	5.68	NP	NP	SM	A-4	2.27	40.74
	1.10 - 2.00	49.07	43.81	7.12	46.87	25.52	ML	A-7-6	2.32	35.79
	2.00 - 2.50	43.28	52.13	4.59	NP	NP	SM	A-4	2.29	43.31
	2.50 - 6.50	63.02	34.22	2.76	48.66	24.29	ML	A-7-6	2.30	42.45
	6.50 - 7.55	35.39	60.91	3.70	NP	NP	SM	A-2-4	2.27	42.93
	7.55 - 10.00	33.43	61.59	4.98	NP	NP	SM	A-2-4	2.20	34.68

OBSERVACIONES:

Muestra no representativa: -

NP: No presenta

N/A: No aplica

DCP: ASTM D-3441

G.S: ASTM D-854

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

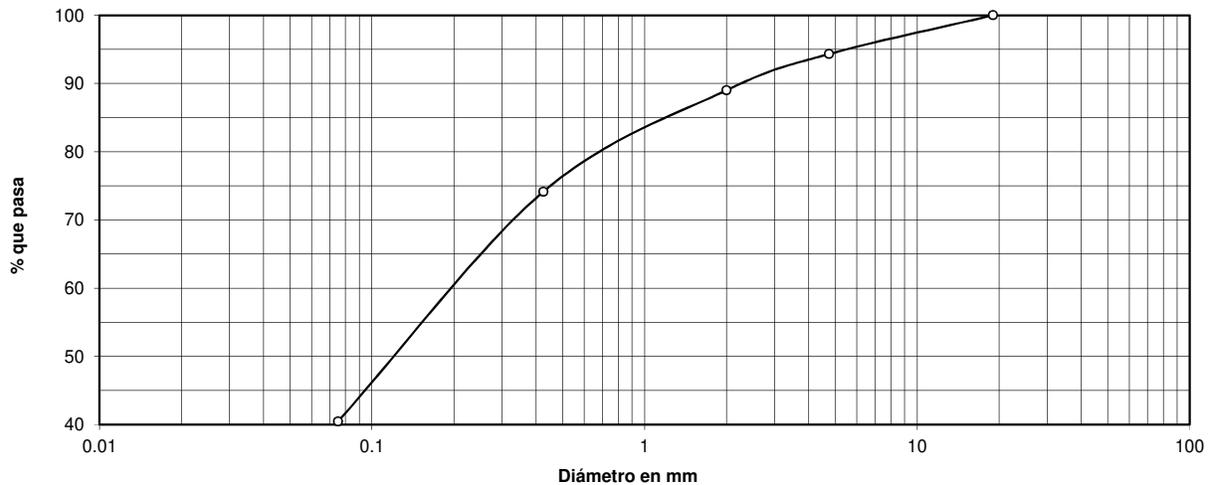
Proyecto: Aproximación zona 17

Muestra: Exploracion 4

Profundidad (m): 0.05 - 1.10

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	94.32
10	2	89.01
40	0.425	74.14
200	0.075	40.45

% de Grava: 5.68
% de Arena: 53.87
% de finos: 40.45



Descripción del suelo: Arena limosa con pómez, color beige-rosado

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-4

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: NP -Indice de Plasticidad NP -Limite Plastico: NP
Humedad natural %: 40.74

Observaciones: NP= NO PRESENTA

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

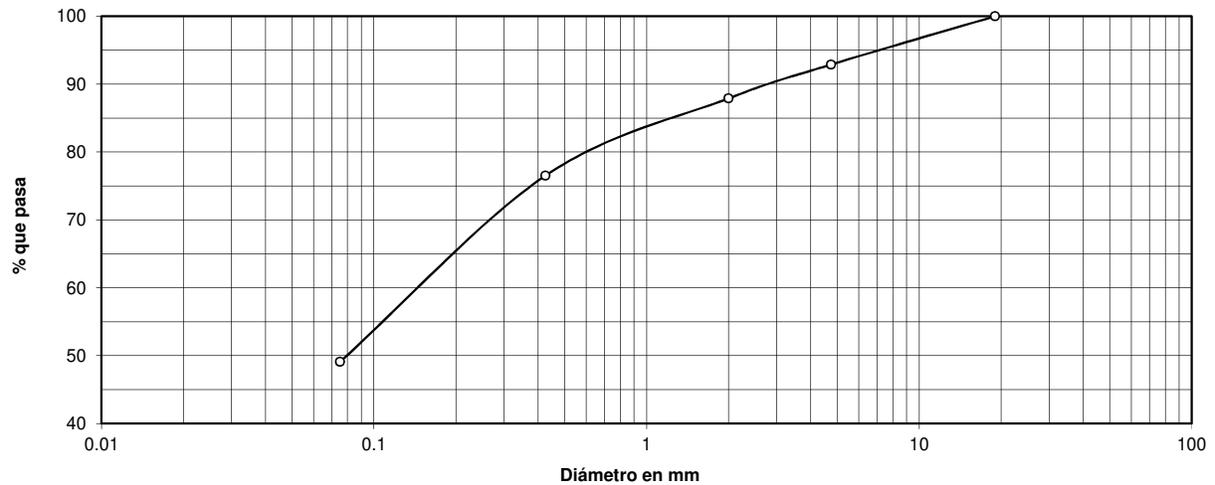
Proyecto: Aproximación zona 17

Muestra: Exploracion 4

Profundidad (m): 1.10 - 2.00

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	92.88
10	2	87.90
40	0.425	76.50
200	0.075	49.07

% de Grava: 7.12
% de Arena: 43.81
% de finos: 49.07



Descripción del suelo: Limo arenoso con pómez color café claro

Clasificación S.C.U.: ML **AASHTO:** A-7-6

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: 46.9 -Indice de Plasticidad: 21.52 -Limite Plastico: 25.38
Humedad natural %: 35.79

Observaciones:

**ANALISIS GRANULOMETRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

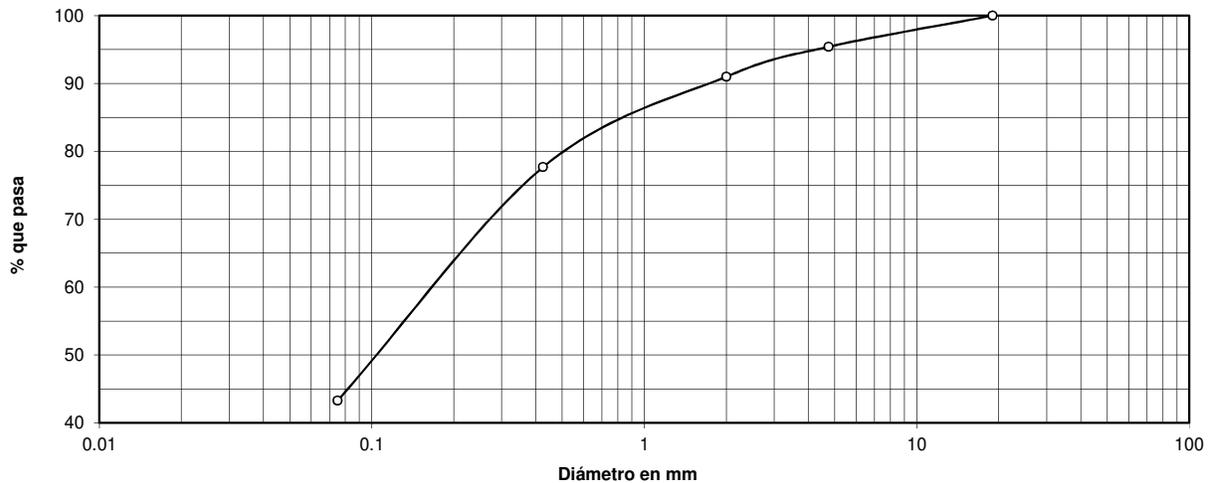
Proyecto: Aproximación zona 17

Muestra: Exploracion 4

Profundidad (m): 2.00 - 2.50

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	95.41
10	2	91.01
40	0.425	77.67
200	0.075	43.28

% de Grava: 4.59
% de Arena: 52.13
% de finos: 43.28



Descripción del suelo: Arena limosa con pómez y gravilla, color beige-rosado

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-4

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: NP -Indice de Plasticidad NP -Limite Plastico: NP
Humedad natural %: 43.31

Observaciones: NP= NO PRESENTA

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

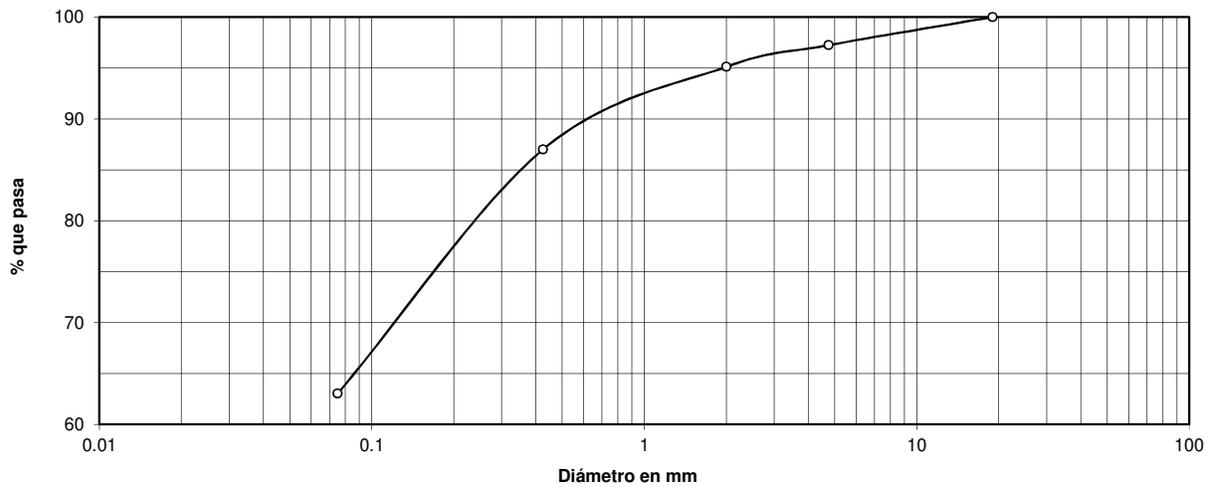
Proyecto: Aproximación zona 17

Muestra: Exploracion 4

Profundidad (m): 2.50 - 6.50

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	97.24
10	2	95.11
40	0.425	87.00
200	0.075	63.02

% de Grava: 2.76
% de Arena: 34.22
% de finos: 63.02



Descripción del suelo: Limo arenoso con pómez y gravilla color café oscuro

Clasificación S.C.U.: ML **AASHTO:** A-7-6

Limites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Limite Liquido: 48.7 -Indice de Plasticidad 20.29 -Limite Plastico: 28.41
Humedad natural %: 42.45

Observaciones:

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CON TAMICES Y CON LAVADO PREVIO.
AASHTO T-87 y ASTM D-421, D422**

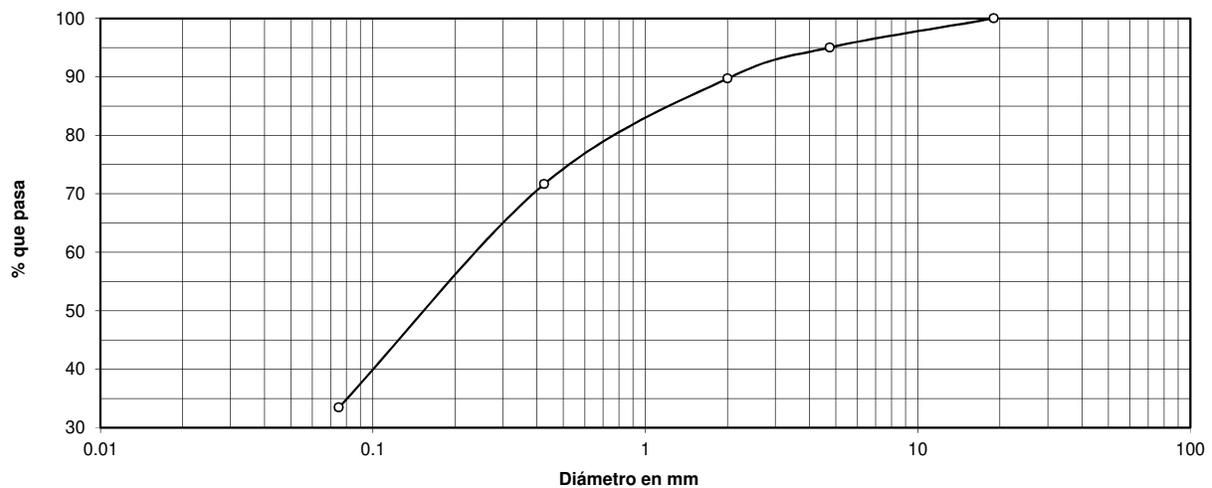
Proyecto: Aproximación zona 17

Muestra: Exploracion 4

Profundidad (m): 7.55 - 10.00

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	
1 1/2"	38.1	
1 "	25.40	
3/4"	19	100.00
4	4.75	95.02
10	2	89.71
40	0.425	71.65
200	0.075	33.43

% de Grava: 4.98
% de Arena: 61.59
% de finos: 33.43



Descripción del suelo: Arena limosa con pómez y gravilla, color beige

Clasificación S.C.U.: SM **AASHTO:** A-2-4

A-Límites de consistencia (AASHTO T-89,T-90):

- Límite Líquido: NP -Índice de Plasticidad NP -Límite Plástico: NP
Humedad natural %: 34.68

Observaciones: NP= NO PRESENTA
