



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

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE  
ORIGEN PIROCLÁSTICO “EL ARENAL”, EN LA ZONA 4 DEL MUNICIPIO DE SALCAJÁ,  
QUETZALTENANGO**

**Ing. Mario Luis Cifuentes Jacobs**

Asesorado por la MSc. Inga. María Fernanda Rivas

Guatemala, enero de 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE  
ORIGEN PIROCLÁSTICO “EL ARENAL”, EN LA ZONA 4 DEL MUNICIPIO DE SALCAJÁ,  
QUETZALTENANGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. MARIO LUIS CIFUENTES JACOBS**

ASESORADO POR LA MSC. INGA. MARÍA FERNANDA RIVAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

GUATEMALA, ENERO DE 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova 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 Armando 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 Córdoba Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Carlos Humberto Aguilar Tumax
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 GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE ORIGEN PIROCLÁSTICO “EL ARENAL”, EN LA ZONA 4 DEL MUNICIPIO DE SALCAJÁ, QUETZALTENANGO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 13 de agosto de 2018.

**Ing. Mario Luis Cifuentes Jacobs**





Facultad de Ingeniería

Decanato  
24189101-  
24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.016.2022

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 GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE ORIGEN PIROCLÁSTICO “EL ARENAL”, EN LA ZONA 4 DEL MUNICIPIO DE SALCAJÁ, QUETZALTENANGO**, presentado por: **Mario Luis Cifuentes Jacobs**, 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, enero de 2022

AACE/gaoc





**Guatemala, enero de 2022**

LNG.EEP.OI.016.2022

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 GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE ORIGEN PIROCLÁSTICO “EL ARENAL”, EN LA ZONA 4 DEL MUNICIPIO DE SALCAJÁ, QUETZALTENANGO”**

presentado por **Mario Luis Cifuentes Jacobs** 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, 06 de agosto de 2021

**M.Sc. Edgar Darío Álvarez Cotí**  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Presente

**M.Sc. Ingeniero Álvarez Cotí:**

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL** del trabajo de graduación titulado: **“CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE ORIGEN PIROCLÁSTICO “EL ARENAL”, EN LA ZONA 4 DEL MUNICIPIO DE SALCAJÁ, QUETZALTENANGO”** del estudiante **MARIO LUIS CIFUENTES JACOBS** quien se identifica con número de carné **2268496860901** y registro académico **201030087** del programa de **MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

**M.Sc. Ing. Armando Fuentes Roca**  
Coordinador  
Área de Infraestructura  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería USAC



Guatemala, 23 de julio de 2021

**Ingeniero M.Sc.  
Edgar Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería USAC  
Ciudad Universitaria, Zona 12**

**Distinguido Ingeniero Álvarez:**

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor de trabajo de graduación del estudiante MARIO LUIS CIFUENTES JACOBS, Carné número 2268 49686 0901 y Registro Académico 201030087, cuyo título es "**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE ORIGEN PIROCLÁSTICO "EL ARENAL", EN LA ZONA 4 DEL MUNICIPIO DE SALCAJÁ, QUETZALTENANGO**", para optar al grado académico de Maestro en INGENIERÍA GEOTÉCNICA, he procedido a la revisión del mismo.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante CIFUENTES JACOBS, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,

**María Fernanda  
Rivas (Soa)**

Digitally signed by María  
Fernanda Rivas (Soa)  
Date: 2021.07.26  
12:10:00 -06'00'

M.Eng. María Fernanda Rivas  
Ingeniera Civil Col: 12898  
Máster en Ingeniería de Campo para el Ambiente  
Asesor





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por la vida y sabiduría para continuar aprendiendo y creciendo como profesional.
- Mis Padres** Thuly Jacobs, y Teódulo Cifuentes, por su apoyo en mi formación.
- Mi Familia** Abuelos, tíos y primos por apoyarme en las diferentes etapas de mi crecimiento, mi agradecimiento por tenernos como parte de mi vida.
- A mis amigos** En especial al Ing. René Estuardo Briones y al Ing. Juan Adolfo Orózco por su amistad y consejos al realizar este trabajo.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por formarme integralmente.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por los conocimientos transmitidos para alcanzar este grado académico, a los docentes, revisores y coordinadores por su dedicación a la academia.
<b>Centro Universitario de Occidente</b>	Por ser mi centro de formación a nivel de licenciatura y por brindarme la oportunidad de laborar durante mis estudios de maestría.
<b>MSc. Inga. María Fernanda Rivas</b>	Por el asesoramiento brindado para elaborar este trabajo.
<b>R&amp;L Ingenieros</b>	Por sus facilidades y asesoría técnica en la realización de ensayos de laboratorio para este trabajo, en especial al Ing. Gabriel Reyes.
<b>Centro de Investigación y Desarrollo del grupo Cementos Progreso (CI+D)</b>	Por el apoyo brindado al realizar los ensayos en sus instalaciones. En especial a los profesionales Lic. Luis Velásquez y MSc. Shirley Torres.





1.3.2.	Complejo volcánico del Santa María .....	5
1.4.	Características geológicas y geotécnicas del suelo volcánico.....	6
1.4.1.	Microestructura.....	6
1.4.2.	Composición mineral.....	7
1.4.2.1.	Evaluación de composición mineralógica del suelo mediante difracción de rayos X (XRD) .....	7
1.4.3.	Geoquímica .....	9
1.4.3.1.	Análisis químico del suelo mediante fluorescencia de rayos X (XRF).....	9
1.5.	Ensayos de mecánica de suelos.....	10
1.5.1.	Ensayo granulométrico (ASTM D422).....	10
1.5.2.	Ensayo de gravedad específica (ASTM D854).....	11
1.5.3.	Ensayo corte triaxial no consolidado, no drenado (UU) (ASTM D2850).....	11
1.5.4.	Ensayo de penetración estándar (ASTM1586).....	11
1.6.	Riesgos geológicos .....	12
1.6.1.	Licuefacción de suelos .....	12
1.6.1.1.	Método simplificado (HBF) .....	12
1.6.2.	Colapso en mecánica de suelos.....	12
1.6.3.	Susceptibilidad a movimientos de masa (deslizamiento).....	13
2.	DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA. ....	15
2.1.	Tipo de estudio y enfoque de investigación .....	15
2.2.	Variables por estudiar .....	15
2.3.	Fases de estudio.....	17

2.4.	Evolución histórica del sitio.....	19
2.5.	Topografía .....	19
2.6.	Hidrología e Hidrogeología.....	20
2.7.	Geología regional .....	22
2.8.	Sismicidad .....	23
2.8.1.	Tipo de fuente sísmica.....	24
2.9.	Metodología caracterización geológica del suelo .....	25
2.9.1.	Descripción del proceso de muestreo.....	25
2.9.2.	Composición mineralógica.....	26
2.10.	Metodología caracterización geotécnica del suelo .....	27
2.10.1.	Ensayos de laboratorio .....	27
2.10.2.	Resumen del proceso de muestreo .....	27
2.10.3.	Ensayo de penetración estándar (SPT).....	31
2.10.4.	Localización y método .....	33
2.10.5.	Correlaciones.....	34
3.	<b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS.....</b>	<b>37</b>
3.1.	Análisis de composición mineralógica por Difracción de Rayos X (XRD) .....	37
3.2.	Análisis químico por XRF .....	39
3.3.	Análisis granulométrico y prueba de compresión triaxial .....	39
3.3.1.	Ensayo de penetración estándar -SPT- (ASTM D1556).....	40
3.4.	Análisis de susceptibilidad a licuefacción .....	47
3.4.1.	Esfuerzo efectivo .....	47
3.4.2.	SPT N60 .....	49
3.4.3.	Relación de resistencia cíclica.....	50

3.4.4.	Datos de sismo.....	51
3.4.4.1.	CSR7.5 (Relación de esfuerzo cíclico) ...	51
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y MEDIDAS PARA LA PROTECCIÓN DEL SITIO .....	55
4.1.	Caracterización Geológica .....	55
4.2.	Caracterización Geotécnica .....	56
4.3.	Análisis de riesgos geológicos .....	57
4.3.1.	Licuefacción de suelos .....	57
4.3.2.	Susceptibilidad a movimientos de masa .....	58
4.4.	Confiabilidad y Replicabilidad .....	59
4.5.	Recomendaciones.....	60
4.5.1.	Cimentaciones.....	60
4.5.2.	Laderas .....	61
	CONCLUSIONES.....	63
	RECOMENDACIONES .....	65
	REFERENCIAS .....	67
	ANEXOS.....	73



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Fotografías de la situación actual de plataformas y taludes de campos El Arenal.....	XVI
2.	Vista aérea de ubicación de campos El Arenal.....	XVI
3.	Zonificación del terreno para la realización del muestreo.....	XXIV
4.	Sureste de México y el occidente de Guatemala en donde se muestran las ubicaciones de los volcanes Santa María, Santiaguito y Cerro Quemado, junto con otros estratovolcanes de Guatemala.....	6
5.	Ley de Bragg.....	8
6.	Ejemplo de gráfica de ensayo XRF.....	10
7.	Topografía del terreno.....	20
8.	Evidencia de flujos en el terreno posterior a la precipitación.....	21
9.	Mapa de geología regional para el municipio de Salcajá.....	22
10.	Fuentes sismogénicas y zona de incidencia de sismo para el sitio de estudio.....	23
11.	Ubicación de muestras para análisis XRD y XRF.....	26
12.	Difractómetro Empyrean Rietveld.....	27
13.	Localización de muestras para caracterización de suelos y ensayo triaxial en laboratorio.....	28
14.	Localización en columna estratigráfica de muestras para caracterización y ensayo triaxial.....	29
15.	Toma de muestras alteradas de pozos a cielo abierto.....	30
16.	Ejemplo de ensayos de laboratorio.....	31
17.	Tipos de yunque o masa de golpeo para el ensayo SPT.....	32

18.	Ensayos SPT realizados en campo .....	32
19.	Ubicación de sondeos mecánicos SPT.....	34
20.	Resultados XRD para muestra Talud 1 .....	38
21.	Resultados XRD para muestra Talud 2 .....	38
22.	Resultados SPT Sondeo 1 .....	41
23.	Resultados SPT Sondeo 1.....	42
24.	Resultados SPT Sondeo 1.....	43
25.	Resultados SPT Sondeo 2.....	44
26.	Resultados SPT Sondeo 2.....	45
27.	Resultados SPT Sondeo 2.....	46
28.	Gráfico de .puntos de FS vs N60 para estimación de susceptibilidad a licuefacción .....	53
29.	Diagrama ternario de fase de los feldespatos a (900 °C) .....	55
30.	Movimiento traslacional en las laderas del terreno .....	58

## TABLAS

I.	Escala de susceptibilidad a deslizamiento en el sitio .....	13
II.	Variables e indicadores de trabajo de investigación.....	16
III.	Tipos de fuente sísmica.....	24
IV.	Contenido de fases minerales en las muestras .....	37
V.	Composición geoquímica de las muestras (%).....	39
VI.	Resumen de ensayos de laboratorio para caracterización geotécnica .....	40
VII.	Contenido de finos en cada muestra .....	47
VIII.	Determinación de Esfuerzo efectivo de cada muestra.....	48
IX.	Determinación de valores de N y N60 .....	49
X.	Determinación de valores de CRR .....	51
XI.	Estimación de factores de seguridad para sismos MW= 6,7 y8 .....	53

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$\sigma'v$	Esfuerzo efectivo
$\sigma v$	Esfuerzo total
$rd$	Factor de reducción de corte
%	Porcentaje
$\theta$	Theta



## GLOSARIO

<b>Feldespatos</b>	Familia de minerales que comprende un grupo de aluminosilicatos relacionados entre sí, con distintas proporciones de potasio, sodio y calcio.
<b>Goniómetro</b>	Instrumento que mide un ángulo o permite que un objeto gire a una posición angular precisa.
<b>Meteorización</b>	Descomposición de minerales y rocas que ocurre sobre o cerca de la superficie terrestre cuando estos materiales entran en contacto con la atmósfera, hidrosfera y la biósfera.
<b>Plagioclasa</b>	Conjunto de minerales que comprenden la serie albita-anortita, sección triclinica del grupo de los feldespatos.
<b>Reptación</b>	Desplazamiento del suelo superficial y subsuperficial, pendiente abajo en forma muy lenta (cm o mm/año), sin una superficie de falla definida.



## RESUMEN

En el municipio de Salcajá se encuentra un terreno conocido por la población con el nombre de El Arenal, que fue adquirido por la municipalidad al inicio del milenio y que estaba formada originalmente por varias laderas que contenían gran cantidad de material de origen piroclástico.

El estudio a continuación presenta un enfoque cuantitativo para poder caracterizar geológicamente el sitio, empleando difracción de rayos X (XRD) para obtener las fases minerales presentes en las dos muestras tomadas y también el ensayo de fluorescencia de rayos x (XRF) para determinar los compuestos químicos que conforman el material.

Para realizar una caracterización geotécnica se utilizaron pruebas de laboratorio en seis diferentes zonas del terreno, las cuales consistieron en análisis granulométrico, gravedad específica y pruebas de compresión triaxial no consolidado no drenado (UU); también se realizaron dos pruebas de ensayo de penetración estándar (SPT) para contrastar resultados.

Se concluyó que el sitio está formado principalmente por plagioclasas, específicamente por albita, aunque conteniendo algunas vetas y zonas que, por los mecanismos de erupción, formaron anortita, ambos minerales son productos piroclásticos.

Luego de realizar un análisis por el método simplificado (HBF) se determinó que el sitio no es susceptible a licuefacción, al tener el nivel freático muy profundo y al evaluarse que en condiciones saturadas por otros agentes climáticos, el sitio

sólo sería susceptible en sismos de magnitud Mw 8 o 9 por lo que es recomendado realizar un análisis geotécnico particular en obras esenciales que se planifiquen emplazar en el terreno; En cuando a las laderas, se evidencia que sí existen indicios de movimientos traslacionales con la erosión como detonante principal, por lo que es recomendable utilizar una medida de protección a la erosión.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Descripción del problema

El terreno denominado El Arenal, ubicado en Salcajá, Quetzaltenango formado por depósitos piroclásticos; emplazará edificaciones importantes o esenciales en áreas susceptibles a riesgos geológicos, por desconocimiento de las propiedades y estructuración geotécnica del sitio.

El municipio de Salcajá, Quetzaltenango se ubica en la zona nororiental de un valle entre un amplio complejo volcánico, actualmente se encuentra en un proceso de urbanización rápida, que ha generado problemas de vulnerabilidad al establecer proyectos en cercanía a zonas con pendientes altas o en la proximidad de los ríos, con escaso estudio del comportamiento geotécnico del sitio.

En cuanto a las características del suelo y su distribución, resalta una cantidad considerable de zonas visiblemente formadas por arenas volcánicas. Los proyectos de urbanización en dichas zonas, muchas veces se emplazan en sitios como pies de taludes anteriormente explotados o rellenos formados antrópicamente. Aunque se cuentan con algunos estudios del suelo a nivel físico y mecánico, el alcance de estos se limita a determinar capacidades portantes para cimentaciones superficiales típicas. La información es escasa en cuanto a su microestructura, origen geológico y propiedades geotécnicas necesarias para una evaluación profunda de susceptibilidad a los diferentes riesgos geológicos.

El área de estudio seleccionada se encuentra dentro de las zonas anteriormente descritas, debido a que ha sufrido históricamente un proceso de

explotación no estructurada, sin un uso seleccionado con base en las virtudes del material. Se observan áreas conformadas de manera no estructural con propósitos de expansión urbana, por lo que se pueden predecir zonas poco consolidadas.

Para la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2017) la categoría de obras importantes (Categoría III) agrupa a las obras que albergan a una gran cantidad de personas; entre ellas se pueden encontrar: Edificaciones gubernamentales, edificios educativos públicos y privadas entre otros; Mientras que una obra esencial o categoría IV es la que deben permanecer durante y después de un siniestro, en esta categoría se pueden clasificar todos los servicios de emergencia, las instalaciones de salud o las instalaciones de telecomunicaciones, transmisión eléctrica o de servicios básicos entre otros.

Al visualizar las categorías mencionadas anteriormente, se puede prever que al ser dicho terreno actualmente pertenece a la Municipalidad de Salcajá, existen probabilidades altas de que la propiedad sea utilizada para construir una edificación de carácter gubernamental o ser cedida para la construcción de centros educativos o instituciones de salud, lo cual requiere que el sitio en el que se planifiquen esté modelado correctamente para contar con la información suficiente para el diseño y construcción de dichas edificaciones de manera segura.

- Formulación de preguntas de investigación

Tomando en cuenta la carencia de información previamente descrita y la necesidad de una expansión urbana regulada y racional en el área de estudio, se genera la siguiente pregunta:

¿Cuáles son las características geológicas-geotécnicas del depósito de material piroclástico El Arenal en la zona 4 del municipio de Salcajá, Quetzaltenango?

En el desarrollo del trabajo de campo y análisis de resultados, surgen los siguientes cuestionamientos.

- ¿Cómo es la microestructura de sus elementos constituyentes, influye ésta en su comportamiento mecánico?
  - ¿Cómo está estructurado el material en el sitio, que estratificación posee en los diferentes puntos de exploración?
  - ¿El material muestra indicios de ser susceptible a fenómenos físicos o geológicos como licuación, o movimientos de masa?
  - ¿Qué medidas se deberían tomar en el caso de urbanizar el área, existen áreas donde no se deba construir, existen áreas donde se deba realizar alguna obra de mitigación o manejo?
- Delimitación del problema

¿Cuándo? La toma de muestras y los ensayos de laboratorio se realizaron en noviembre de 2018, luego de la autorización municipal y los ensayos de campo se realizaron en febrero de 2019.

¿Dónde? En el depósito de material piroclástico conocido como El Arenal en la zona 4 del municipio de Salcajá, Quetzaltenango; en sus diferentes secciones delimitadas en el plan de muestreo.

Figura 1. **Fotografías de la situación actual de plataformas y taludes de campos El Arenal**



Fuente: [Fotografía de Mario Cifuentes]. (Salcajá, Quetzaltenango. 2017). Colección particular. Guatemala.

Figura 2. **Vista aérea de ubicación de campos El Arenal**



Fuente: Google Earth (2021). Consultado el 15 de abril de 2021. Recuperado de Maxar Technologies 2021.

¿Cómo? Las muestras se extrajeron tanto en pozos a cielo abierto como en cara de talud, preformados natural y antrópicamente. La caracterización geológica se realiza interpretando los estudios de difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X.



# OBJETIVOS

## General

Caracterizar geológica y geotécnicamente el depósito de material de origen piroclástico conocido como El Arenal ubicado en la zona 4 del municipio de Salcajá, Quetzaltenango.

## Específicos

1. Analizar la composición mineralógica y geoquímica del material constituyente del depósito de origen piroclástico "El Arenal" para caracterizarlo geológicamente y describir su microestructura y propiedades.
2. Determinar las propiedades mecánicas del suelo mediante ensayos en sitio y en laboratorio para realizar una caracterización geotécnica y evaluar su comportamiento ante cargas.
3. Evaluar la relación del estado de consolidación en estado natural del material con su resistencia al esfuerzo cortante y capacidad portante.
4. Realizar recomendaciones para el establecimiento de medidas de protección al urbanizar el área, y de áreas o puntos donde sea necesario realizar una obra de mitigación o manejo en el caso de la existencia de algún riesgo.





## **HIPÓTESIS**

En el depósito El Arenalse identificarán suelos piroclásticos, cuyas propiedades geotécnicas son adecuadas para el aprovechamiento del terreno para la expansión urbana.



## RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El presente estudio es de tipo cuantitativo, constituido por el estudio e interpretación de ensayos de laboratorio y en sitio. Se enmarca en un diseño no experimental transeccional ya que se limitará a estudiar el sitio seleccionado recolectando información geotécnica en el momento del estudio para predecir el comportamiento futuro con la incidencia de cargas o fenómenos físicos.

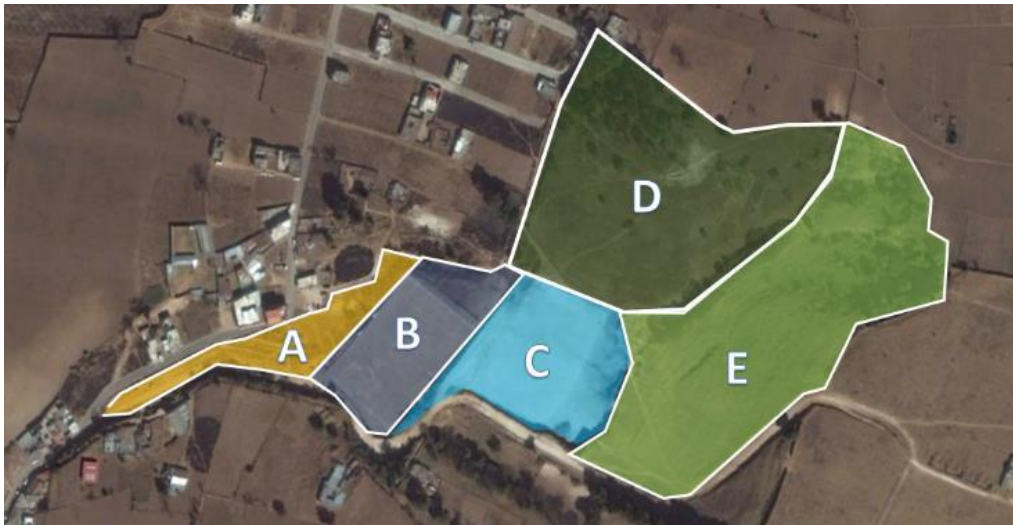
El estudio contempla cuatro fases: En primer lugar, una fase preliminar con la recolección de información auxiliar para la caracterización, como segunda fase los ensayos en sitio y en laboratorio, la tercera fase el análisis de esta información para caracterizar y evaluar la susceptibilidad a riesgos geológicos y por último una fase de discusión de resultados y redacción de recomendaciones para el uso del terreno.

Las variables por estudiar en la caracterización geológica son el porcentaje de fases minerales y el porcentaje de las diferentes sustancias químicas convencionales, el en caso de la caracterización geotécnica se evalúan la granulometría, peso volumétrico, cohesión y ángulo de fricción interna y por último para la evaluación de riesgos geológicos se analizarán las variables de relación de esfuerzo cíclico (CSR), el factor de seguridad para licuefacción de suelos, la resistencia a corte y algunos indicadores de deslizamientos de material previos en las laderas.

- Plan de Muestreo

Luego de reconocimientos iniciales de terreno se identificaron cinco áreas con diferentes aspectos relevantes a considerar y evaluar.

Figura 3. **Zonificación del terreno para la realización del muestreo**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Google Earth (2021). Consultado el 15 de abril de 2021. Recuperado de Maxar Technologies 2021.

- A: Zona de acceso al terreno, área en su estado natural. Área poco problemática, obtener propiedades geomecánicas por medio de ensayo de laboratorio. Para esta zona se realizó un único pozo de muestreo.
- B y C: Plataformas, conformadas antrópicamente de manera reciente. Áreas problemáticas a evaluar propiedades mecánicas, estado de consolidación, susceptibilidad a licuefacción. Dos pozos

de muestreo, dos ensayos de penetración (Uno por cada plataforma).

- D y E: Área de ladera, estado natural. Realizar ensayo triaxial y determinar si es necesario un análisis de estabilidad más profundo. En este caso se realizó un pozo de muestreo por cada ladera.

Para la caracterización geológica se observaron dos tipos de materiales ya que existía un cambio en la coloración de un blanco a un rosado, por lo que se obtuvo una muestra de cada material para su entrega al Laboratorio Químico del Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarcó en las líneas de investigación de Mecánica de Suelos y la línea de Riesgos Geológicos de la Maestría en Ingeniería Geotécnica.

Los suelos de origen piroclástico tienen la particularidad de que poseen propiedades físicas muy diferentes dependiendo del proceso volcánico del que fueron producto. El tipo de erupción o la composición del magma modifican la estructura microscópica y las cantidades de minerales y elementos químicos que forman los granos del material.

En el occidente de Guatemala, un gran porcentaje de la extensión territorial está compuesta por suelos de origen piroclástico, debido al paso del arco volcánico centroamericano, específicamente los rangos volcánicos de la Sierra Madre y de Santa María, que han sido expulsados y depositados por medio de diferentes mecanismos eruptivos, de transporte y sedimentación. En estas zonas es común encontrar terrenos y bancos de explotación de estos materiales.

El objeto de estudio de este trabajo fue el terreno ubicado en el municipio de Salcajá, conocido como El Arenal, debido a que es un depósito de material de origen volcánico con una geomorfología que combina los eventos del relieve natural, con el movimiento de tierras de origen antrópico.

Para que las oficinas encargadas de planificar la urbanización del terreno cuenten con información precisa sobre las características físicas y de origen geológico del suelo, se realizó una caracterización geológica y geotécnica.

La caracterización geológica se obtuvo de la composición mineral y geoquímica por medio de análisis de difracción de rayos X (XRD) y fluorescencia de rayos X (XRF).

La caracterización geotécnica se realizó con ensayos en laboratorio de distribución granulometría, gravedad específica, ensayos de compresión triaxial no consolidado no drenado (UU) y en campo se evaluó su resistencia por medio del ensayo de penetración estándar (SPT).

En el primer capítulo se describen los aspectos generales de los suelos piroclásticos en Guatemala, la teoría del proceso eruptivo, las propiedades mecánicas a analizar y la teoría de licuefacción de suelo y de deslizamientos y erosión de suelos arenosos.

El segundo capítulo presenta la descripción física y geográfica del sitio de estudio y los métodos y técnicas empleados para realizar la caracterización; se aborda también los detalles de los análisis de laboratorio utilizados.

El capítulo 3 muestra los resultados obtenidos en la caracterización geológica y geotécnica, y los cálculos auxiliares que luego se emplearán en el siguiente capítulo para determinar la susceptibilidad a licuefacción y diferentes tipologías de deslizamiento o erosión.

El último capítulo abarca el análisis y discusión de los resultados, explicando la fiabilidad de los modelos matemáticos y cálculos realizados a manera de determinar la susceptibilidad a diferentes riesgos geológicos que se asocian al material estudiado, finalizando con las recomendaciones respecto al manejo del terreno en cuanto a su explotación y al emplazamiento de nuevas obras.



# **1. ASPECTOS GENERALES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS PIROCLÁSTICOS EN GUATEMALA**

## **1.1. Proceso eruptivo y tipos de erupciones**

Para poder entender la forma en la que los suelos se originan luego del proceso eruptivo, es necesario conocer de manera general los diferentes mecanismos de erupción y los productos que un volcán o complejo volcánico pueden generar.

### **1.1.1. El magma**

El magma es una mezcla de roca fundida y semifundida, volátiles y partículas sólidas que se encuentra próxima a la superficie de la tierra (Spera, 1999). El magma se encuentra en estado predominante líquido, pero está compuesto por tres fases, la matriz líquida de roca fundida, una fase sólida formada por partículas suspendidas y una fase gaseosa que se compone de compuestos químicos volátiles y burbujas de aire de diferentes dimensiones.

### **1.1.2. El proceso eruptivo**

Las erupciones volcánicas se producen debido a la diferencia entre la presión existente en el interior de la corteza terrestre y una presión de confinamiento que está directamente relacionada con la presión atmosférica, el magma asciende a través de las fisuras de la corteza hasta llegar a un nivel o punto en el que las presiones se equilibran, este fenómeno es el causante de la aparición de cámaras magmáticas.

El tipo de erupción depende de un conjunto de variables, principalmente la viscosidad del magma, que viene como producto del contenido de sílice presente, entre más bajo sea este contenido, mayor será su viscosidad; otras variables como la temperatura, la presión Inter cámara y el tamaño o cantidad de burbujas en la mezcla también inciden en la viscosidad.

### **1.1.3. Tipos de erupciones**

Sparks y Walker (1973) describen los diferentes tipos de erupciones basándose principalmente en las características de los depósitos de caída, las dos características principales son la dispersión y el grado de fragmentación del magma.

#### **1.1.3.1. Erupciones tipo Hawaiano-Estromboliano**

Para Martí (1989) estas erupciones tienen como características comunes el origen basáltico del magma, una escasa producción de piroclastos debido a que generan lavas muy fluidas. Se dice que ambos tipos de erupción se generan al elevarse burbujas de gases hasta la superficie y se diferencian únicamente en la viscosidad del magma.

#### **1.1.3.2. Erupciones tipo vulcaniano**

Este tipo de erupción se caracteriza porque inicia con una gran explosión provocada por un taponamiento con lava solidificada, luego produce oleadas y flujos piroclásticos menores.

### **1.1.3.3. Erupciones tipo Pliniano**

Estas erupciones son altamente explosivas, con lanzamiento de ceniza a grandes alturas y llegando a distancias considerables dependiendo de las direcciones y velocidades del viento. Su magma es altamente viscoso.

## **1.2. Materiales expulsados en una erupción**

Los volcanes pueden producir diferentes materiales dependiendo de sus mecanismos de erupción y de variables climáticas, así pueden formar lavas, flujos piroclásticos, gases, bloques o cenizas. Dependiendo de los mecanismos de expulsión y fragmentación del magma

### **1.2.1. Flujos magmáticos**

“La morfología de las lavas depende de su viscosidad, del volumen de material emitido, de la pendiente topográfica del edificio volcánico y del medio en que se emplazan” (Conde, 2013, p. 2.30). Las rocas basálticas son un ejemplo de este tipo de material.

### **1.2.2. Depósitos piroclásticos**

Los depósitos piroclásticos son producto de la fragmentación del magma durante el proceso de erupción y por los procesos de meteorización posteriores, las variables de presión y temperatura cambian sus composiciones minerales y geoquímicas.

Un depósito de caída piroclástica es el producido por una lluvia de fragmentos piroclásticos que por definición tienen su origen en una erupción

volcánica; Los depósitos de flujo de bloques y ceniza se denominan a los depósitos asociados al colapso gravitacional y/o explosivo de domos o flujos de lavas, y los depósitos de oleadas piroclásticas son producidos por el depósito de corrientes de densidad generadas desde una columna eruptiva durante erupciones freato-magmáticas.

### **1.3. Geología de la zona volcánica occidental de Guatemala**

Para el contexto del occidente de Guatemala, se debe de tomar en cuenta que los suelos volcánicos recientes pueden haber sido producidos por alguna erupción local de gran magnitud, para eso se describe la geología de la zona.

#### **1.3.1. Franja volcánica de la Sierra Madre**

De los 324 volcanes identificados en Guatemala, solo 8 han tenido erupciones en los registros históricos, y 4 de ellos han tenido gran actividad. La mayoría de ellos son estratovolcanes. El primer cono volcánico emerge en la frontera norte con México. Es el volcán Tacaná o Soconusco, localizado en el departamento de San Marcos, llegando a una altitud de 4,092 metros, uno de los volcanes más altos de Guatemala.

Ha tenido erupciones en el último siglo, la última ocurrió en 1986. Es un estratovolcán activo, expulsando flujos de lava andesítica. Se empezó a formar en el Terciario medio en una base de granito. Presenta fumarolas en el flanco suroeste, así como manantiales. Ha tenido erupciones freáticas y fumarolas periódicas registradas desde el siglo XIX. Cercano al Tacana emerge el imponente estratovolcán Tajumulco, el cual alcanza 4,220 metros, pero no se conocen erupciones históricamente verificadas. Posee un cráter abierto al oeste y los restos de una caldera explotada (Bergoeing, 2015).

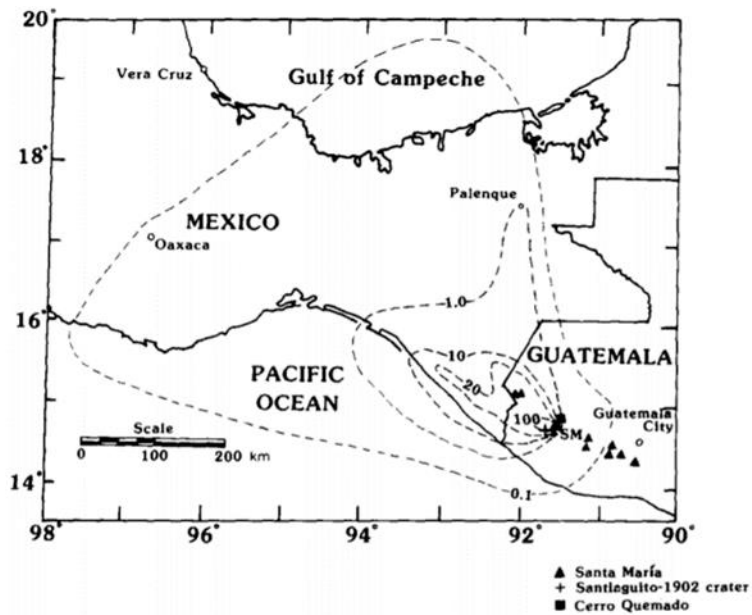
### **1.3.2. Complejo volcánico del Santa María**

El volcán Santa María se ubica en la parte cercana al mar del antiguo campo volcánico de Almolonga. Hoy en día, Almolonga es una gran caldera que contiene varias poblaciones que incluyen Zunil y Quetzaltenango, y está rodeado por volcanes más jóvenes que incluyen El Zunil, Siete Orejas, Santo Tomas y Cerro Quemado. El Zunil resalta actualmente como campo geotérmico; Siete Orejas es una estructura multilobular y como el Santo Tomas, ha sido altamente erosionado y cubierto por vegetación. Cerro Quemado está dominado por bloques y flujos de lava. (Scott, 2013, p. 10)

Santa María tuvo cuatro erupciones catastróficas durante el siglo XX (1902, 1912, 1992 y 1994). La erupción de 1992 destruyó parte de su cráter, dejando una gran escarpa y permitiendo la aparición del cono de Santiaguito (2500 metros), donde una constante nube de cenizas y vapor escapa de su cráter, elevándose a más de 3,200 metros sobre el nivel del mar.

Según Bergoeing (2015) el complejo volcánico de Santa María es parte de la Sierra Madre del sur y es el resultado del arco volcánico de América Central. Se estima que su actividad comenzó hace unos 30,000 años, que es muy reciente (Pleistoceno superior). Los flujos de lava son predominantemente basáltico - andesíticos, y también presentan numerosos depósitos de lahar como resultado de las emisiones piroclásticas y de cenizas asociadas con las lluvias tropicales. Al pie de este complejo se extiende la ciudad de Quezaltenango.

Figura 4. Sureste de México y el occidente de Guatemala en donde se muestran las ubicaciones de los volcanes Santa María, Santiaguito y Cerro Quemado, junto con otros estratovolcanes de Guatemala



Fuente: Eilliams y Self (1983). *The October 1902 plinian eruption of Santa Maria volcano, Guatemala.*

#### 1.4. Características geológicas y geotécnicas del suelo volcánico

Entre las características geológicas y geotécnicas del suelo volcánico se pueden clasificar por su microestructura, composición mineral y geoquímica.

##### 1.4.1. Microestructura

El suelo se compone de tres fases: Una fase formada por sólidos, una por agua contenida en los poros, y una última que contiene el aire u otros gases

según sea el caso. Podemos descomponer los granos o partículas de la fase sólida en los minerales y elementos químicos que lo conforman.

El primero en analizar la microestructura de los suelos fue Karl Terzagui en 1925, El nivel de detalle en cuanto al análisis se ve incrementado en el trabajo de K. Collins en 1983 que describe a detalles los procedimientos de análisis de los suelos para ingeniería, al analizarlos con el Microscopio electrónico de barrido (MEB).

#### **1.4.2. Composición mineral**

El componente más abundante en cualquier suelo es la porción mineral, que ocupa entre el 45 % al 49 % del volumen. Los minerales del suelo pueden dividirse en dos grupos, los primarios, como los que generalmente se encuentran en arenas y limos, que son materiales muy similares a la roca matriz o material de origen de estos; Los minerales secundarios por otro lado, son producto de la meteorización o exposición al ambiente de los minerales primarios. Estos minerales son más característicos de las arcillas, debido a la expedición de iones y su área superficial mayor, estos minerales poseen una capacidad de retención de agua, entre otras características importantes en la geoquímica. (DeGomez, Kolb y Kleinman, 2015, p. 15)

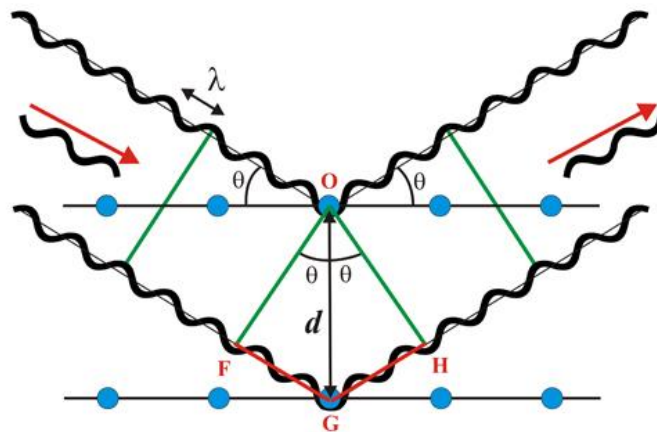
##### **1.4.2.1. Evaluación de composición mineralógica del suelo mediante difracción de rayos X (XRD)**

El método de difracción de rayos x (XRD) utiliza rayos de alta energía con un valor de longitud de onda cercana al tamaño de los cristales de los que están formado el suelo a evaluar y así ver la distancia entre átomos. Se utiliza un tubo

con rayos incidentes y un detector, moviéndose de forma sincronizada para realizar la captura de datos y poder realizar una gráfica que describa la estructura.

En un cristal existe un arreglo de átomos de forma ordenada, formando planos separados a cierta distancia, cuando estos planos hacen que las ondas del rayo cambien de ángulo, se genera el fenómeno de difracción. El ángulo entre el rayo incidente y el refractado se le denomina  $2\theta$  esto obedece a la ley de Bragg.

Figura 5. Ley de Bragg



Fuente: DeGomez, Kolb y Kleinman (2015). *Basic Soil Components*.

El evento de difracción se puede visualizar como consecuencia de la interacción entre la radiación electromagnética y los electrones. La radiación electromagnética ingresa al material con una cierta frecuencia y los electrones en el material se mueven junto a las ondas, oscilando en la dirección de la polarización de la luz incidente.



La longitud de onda de los rayos X, que varía de 0,1 a 100 Å está en el rango de distancias interatómicas o tamaños de celda unitaria y, por lo tanto, la difracción puede producirse por la interacción elástica de los rayos X teniendo la materia algún grado de orden. (Lavina, Dera y Downs, 2014, p. 2)

### **1.4.3. Geoquímica**

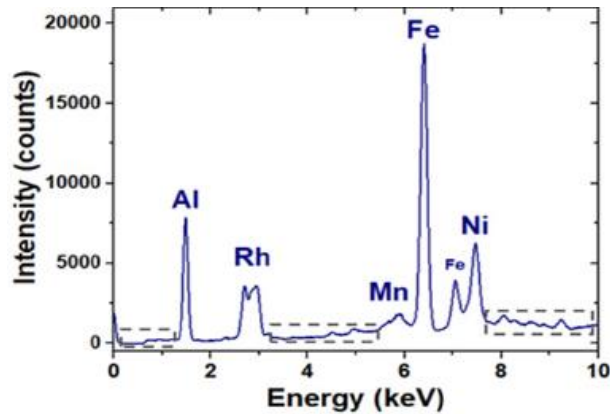
La geoquímica es la rama de las ciencias de la tierra que utiliza las herramientas y principios de la química para explicar los mecanismos que regulan las interacciones pasadas y presentes de la tierra. No se limita únicamente al estudio del origen del sistema solar o de la tierra e incluye otros temas como la composición de la atmósfera o de los océanos.

#### **1.4.3.1. Análisis químico del suelo mediante fluorescencia de rayos X (XRF)**

Este es un análisis que puede realizarse en sólidos, líquidos o polvo que puede identificar diferentes elementos químicos. El funcionamiento de los equipos de XRF utilizan una fuente de rayos X que se dirige a una muestra para luego ser registrados por un detector.

El ensayo funciona a manera general induciendo la pérdida de electrones de un nivel energético de los átomos de la muestra, para estar en equilibrio el átomo obtiene electrones y esta energía generada se percibe a través de rayos x secundarios los cuales son captados por el detector. La energía generada es característica de cada elemento químico y es así como se puede identificar los elementos que forman la muestra, en este caso de la roca o suelo a analizar.

Figura 6. **Ejemplo de gráfica de ensayo XRF**



Fuente: Pinto (2018). *Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry: Principles and Applications for Analysis of Mineralogical and Environmental Materials*.

## 1.5. **Ensayos de mecánica de suelos**

Para una caracterización geotécnica, es necesario conocer características físicas del material, esto se realiza mediante ensayo granulométrico y ensayo de gravedad específica, de igual manera es vital la obtención de las características mecánicas, mediante ensayo corte triaxial y el ensayo de penetración estándar.

### 1.5.1. **Ensayo granulométrico (ASTM D422)**

Consiste en la separación del suelo para determinar el tamaño de sus partículas por una serie de tamices ordenados de mayor a menor abertura y luego lo expresaremos en dos maneras analíticamente a través de tablas, calculando los porcentajes retenidos y los porcentajes que pasa por cada tamiz, y gráficamente mediante una curva granulométrica,

### **1.5.2. Ensayo de gravedad específica (ASTM D854)**

Esta es la propiedad de un suelo que determina su peso unitario en comparación al peso unitario del agua destilada a cuatro grados Celsius.

### **1.5.3. Ensayo corte triaxial no consolidado, no drenado (UU) (ASTM D2850)**

Para esta prueba los especímenes se colocan en una cámara triaxial de confinamiento, al someterse a presión de un fluido mientras se aplica un esfuerzo normal en la probeta. Para esto se someten tres diferentes muestras a diferentes esfuerzos confinados a manera de conocer el comportamiento mecánico producido por los esfuerzos internos (esfuerzo efectivo y presión de poro) y así lograr obtener los parámetros mecánicos para la caracterización geotécnica del sitio.

### **1.5.4. Ensayo de penetración estándar (ASTM1586)**

El ensayo de penetración estándar (SPT) por sus siglas en inglés (*Standard Penetration Test*) se considera el ensayo en sitio más popular y económico para obtener información geotécnica del suelo.

En la actualidad se utiliza una masa normada de aproximadamente 145 lb y una caída de 70 cm. Se recomienda en suelos finos o arena, no en roca o gravas debido a que se puede dañar el equipo por el efecto de rechazo para este tipo de materiales sólidos.

## **1.6. Riesgos geológicos**

Para garantizar el emplazamiento de alguna edificación importante o en el caso de ubicar una urbanización formal, es necesario considerar si esta no se ubica en una zona de potencial riesgo por algún fenómeno de origen geológico.

### **1.6.1. Licuefacción de suelos**

Para Sana (2021) la licuefacción se da principalmente en suelos arenosos saturados y se desencadena en el caso de sismos de gran magnitud, al generarse presiones muy altas en el agua que ocupan los vacíos en el suelo, esto provoca fallos en taludes, puentes o cimentaciones. Se han observado condiciones para licuefacción en sismos de magnitud de 5.5 o más.

#### **1.6.1.1. Método simplificado (HBF)**

El método simplificado consiste en obtener dos valores, por un lado, la relación del esfuerzo cíclico (CSR) y por otro lado la resistencia cíclica del suelo (CRR). Al encontrar estos valores puede realizarse la relación para obtener el factor de seguridad (FS), siendo está  $FS=CRR/CSR$ , al realizar este cálculo si el valor de FS es menor o igual a uno, se concluye que el suelo se licua, por el contrario, si es mayor a uno se concluye que el suelo no se licua.

### **1.6.2. Colapso en mecánica de suelos**

La estructura del suelo en su estado natural se encuentra en estado de equilibrio, cuando alguna fuente externa causa un desequilibrio al incrementar o disminuir las fuerzas vinculantes entre partículas, el suelo puede pasar a un nuevo estado de equilibrio.

Según Herмосilla y Cardenas (2012) si el estado tensional en los contactos entre partículas es superior a la resistencia, las partículas cambian de posición produciendo cambios en la estructura y pasando a un nuevo estado de equilibrio que muchas veces deriva en el colapso del suelo.

### 1.6.3. Susceptibilidad a movimientos de masa (deslizamiento)

La susceptibilidad es una propiedad del terreno que indica qué tan favorables o desfavorables son las condiciones de éste, para que puedan ocurrir deslizamientos. “El mapa de susceptibilidad clasifica la estabilidad relativa de un área, en categorías que van de estable a inestable” (Suarez, 1998, p. 16).

Tabla I. **Escala de susceptibilidad a deslizamiento en el sitio**

<b>Susceptibilidad</b>	<b>Criterio</b>
VI Muy Alta	Taludes con deslizamientos activos. Los movimientos pueden ser continuos o estacionarios.
V Alta	Taludes sujetos con frecuencia, a actividades de deslizamiento. La activación de los deslizamientos resulta cuando ocurren eventos con intervalos de recurrencia menor a cinco años.
IV Medianamente alta	Taludes con actividad de deslizamientos poco frecuente. La activación de deslizamientos ocurre en los eventos con intervalos de recurrencia mayores a cinco años.

Continuación tabla I.

---

III Mediana	Taludes con antigua evidencia de actividad de deslizamientos, pero que no han presentado movimientos en los últimos cien años.
II Baja	Taludes que no muestran evidencia de actividad previa de deslizamientos pero que se consideran probables que se desarrollen en el futuro. Sin embargo, los análisis de esfuerzos como la analogía con otros taludes o el análisis de los factores, muestran una posibilidad baja de que lleguen a presentarse deslizamientos
I Muy baja	Taludes que no muestran evidencia de actividad previa de deslizamiento y que por análisis de esfuerzo, analogías con otros taludes, o por análisis de los factores de estabilidad, se considera muy improbable que se desarrollen deslizamientos en el futuro previsible.

---

Fuente: Croizier (1986). *Landslides: Causes, Consequences and Environment*.

## **2. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA.**

### **2.1. Tipo de estudio y enfoque de investigación**

El presente estudio es de tipo cuantitativo, la caracterización geológica se realizará usando ensayos de laboratorio que arrojan porcentajes y la caracterización geotécnica se realizará empleando también ensayos realizados por laboratorio privado. Los análisis de susceptibilidad a riesgos geológicos también emplean métodos cuantitativos para la determinación de los indicadores de riesgo.

Se enmarca en un diseño no experimental transeccional ya que se limitará a estudiar el sitio seleccionado recolectando información geotécnica en el momento del estudio para predecir el comportamiento futuro con la incidencia de cargas o fenómenos físicos.

Los métodos y técnicas utilizados para llevar a cabo el estudio ya han sido utilizados y validados con anterioridad, los ensayos se realizaron empleando equipos con la calibración adecuada y bajo normativa de ASTM.

### **2.2. Variables por estudiar**

En la siguiente tabla se presentan las variables a analizar, separándolas en tres categorías: La caracterización geológica del material, la caracterización geotécnica y en análisis de susceptibilidad a riesgos geológicos.

Tabla II. **Variables e indicadores del trabajo de investigación**

Campo	Variable	Tipo	Definición Teórica	Definición Operativa	Indicadores
Caracterización geológica	<b>Mineralogía</b>	Cuantitativa	Describir la composición mineral del material	Obtener minerales que forman el material, se puede inferir el proceso y tipo de erupción del que fue producto.	% Fase Mineral
	<b>Geoquímica</b>	Cuantitativa	Clasificación de la roca matriz	Obtener sustancias químicas que compongan el material, y como está estructurado a nivel microscópico.	% Sustancias químicas convencionales
Caracterización Geotécnica	<b>Características Físicas</b>	Cuantitativo	Cualidad propia del material que lo diferencia de otro tipo.	Empleando muestras alteradas se determina el tamaño de sus partículas, y el peso específico seco	Granulometría  Peso Volumétrico
	<b>Propiedades mecánicas</b>	Cuantitativa	Capacidad del estrato del suelo para soportar esfuerzo mecánico.	Por ensayos mecánicos, determinar los parámetros la resistencia al esfuerzo cortante y axial. Mediante ensayos de campo y laboratorio	Cohesión, Angulo de fricción interna



Continuación tabla II.

Campo	Variable	Tipo	Definición Teórica	Definición Operativa	Indicadores
Riesgos Geológicos	<b>Susceptibilidad a Licuación</b>	Cuantitativa	Nivel de peligrosidad a sufrir el efecto de licuación en función al tipo de suelo	Obtener por medio del ensayo SPT y correlaciones con los ensayos triaxiales los valores de velocidad de onda para determinar si es susceptible al fenómeno.	Relación de esfuerzo cíclico, Factor de Seguridad
	<b>Movimientos de masa</b>	Mixta	Evaluación de áreas donde deba de analizarse la estabilidad de laderas	Realizar análisis de pendientes de terreno, emplear los resultados de prueba de corte directo (Si es requerido)	Resistencia a corte Indicios de movimientos previos

Fuente: elaboración propia.

### 2.3. Fases de estudio

A continuación, se describirán las fases realizadas en el estudio.

- Primera fase: Fase preliminar

En esta fase se incluye la recolección de información histórica, de cambios de uso, topografía, hidrología, y de geología regional; así como visitas y recorridos de campo para establecer los puntos clave de muestreo y de análisis.

- Segunda fase: Ensayos en sitio y en laboratorio

Se constituye por la toma de muestras en estado inalterado y alterado, los procedimientos de laboratorio para la caracterización geológica que se realizó por medio de los ensayos de difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X que fueron realizados con el apoyo del Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso (CI+D).

Para caracterizar el suelo con fines de ingeniería se emplearon ensayos para 6 muestras obtenidas mediante el plan de muestreo, las cuales sirvieron para realizar las pruebas de gravedad específica (ASTM D854) análisis granulométrico (ASTM D422); en estos mismos puntos se obtuvieron muestras para determinar el comportamiento mecánico mediante ensayos de corte triaxial no consolidado – no drenado (ASTM D2850); Luego de desarrollar profundización en el estudio, se determinó la ubicación de dos puntos para realizar ensayo de penetración estándar (SPT) (ASTM D1586) y obtener las propiedades directamente en el sitio.

Todos los ensayos previamente enumerados se realizaron empleando todos los procedimientos estandarizados en la norma para garantizar la veracidad de los resultados de laboratorio y procedimientos de evaluación de sitio en campo.

- Tercera fase: Revisión de resultados, caracterización

La tercera fase incluye la revisión y evaluación de los resultados, la caracterización geológica interpretando las gráficas de los ensayos de rayos x, el

análisis de los distintos riesgos geológicos se realizó por medio de modelos matemáticos previamente formulados, utilizando los valores arrojados por los ensayos geotécnicos.

- Cuarta fase: Discusión de resultados

La cuarta y última fase está conformada por el análisis y discusión de los resultados obtenidos, la generación de tablas o gráficos para representarlos; y la elaboración de recomendaciones con medidas a tomar en cuenta para el uso correcto del terreno evaluado.

#### **2.4. Evolución histórica del sitio**

El terreno originalmente ostentaba una topografía uniforme, que desde inicios del milenio se empezó a utilizar como banco de material para obras de infraestructura propias de la Municipalidad de Salcajá, al consumir gran parte de este recurso se procedió a intervenir el terreno realizando movimiento de tierras para generar dos plataformas, una cortando y otra con un relleno controlado.

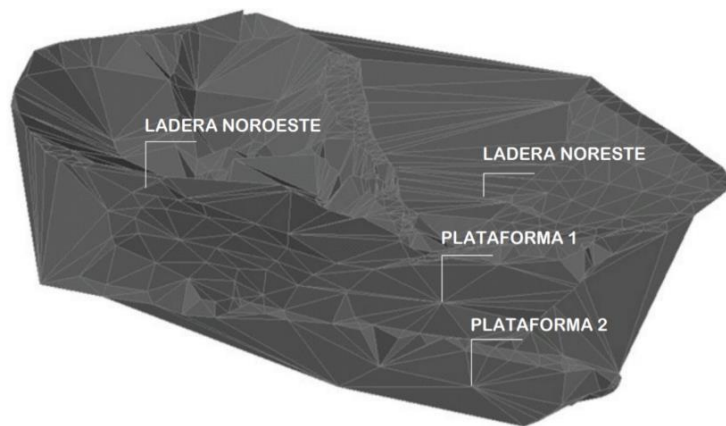
Esto incide directamente dentro de las propiedades geotécnicas del suelo ya que se generaron zonas débiles las cuales deben de ser identificadas debido a los potenciales riesgos geológicos o de soporte que pueden ocurrir.

#### **2.5. Topografía**

El estado topográfico actual en el que se encuentra el sitio en investigación, se observan cuatro elementos principales; dos plataformas

conformadas de forma antrópica y dos laderas en los sentidos noreste y noroeste que mantienen en un alto porcentaje su estado natural.

Figura 7. **Topografía del terreno**



Fuente: elaboración propia realizado con Autodesk Civil3D 2020.

## 2.6. Hidrología e Hidrogeología

De una forma general el sitio se encuentra dentro de la cuenca del Río Samalá, este afluente principal se encuentra a una distancia aproximada de 500 m del terreno.

Localmente en el sitio de estudio, debido al movimiento de tierras que se fue generando en la propiedad, los flujos naturales de la precipitación se han visto alterados, esto sumado a que en un porcentaje alto del terreno la protección a la erosión es mínima (por la falta de vegetación) se producen flujos evidentes que en temporada de lluvia se pueden identificar por el arrastre de sedimentos

de suelo orgánico generando pequeños cauces, este fenómeno vuelve particularmente susceptibles taludes y laderas al erosionarse.

**Figura 8. Evidencia de flujos en el terreno posterior a la precipitación**

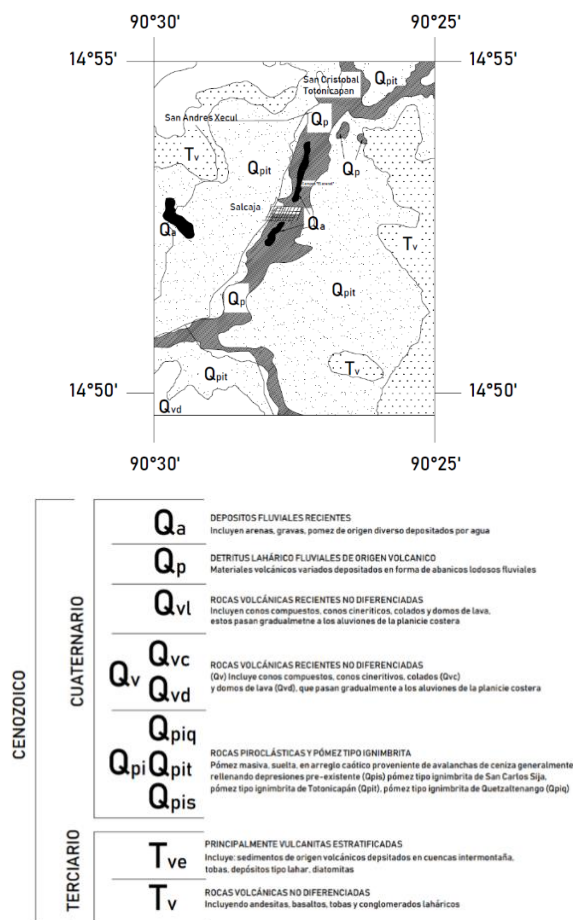


Fuente: [Fotografía de Mario Cifuentes]. (Salcajá, Quetzaltenango. 2019). Colección particular. Guatemala.

## 2.7. Geología regional

El terreno se encuentra en la zona de depósitos fluviales recientes (Qa), esto se confirma a través de diversos paleosuelos encontrados en los taludes visibles, los cuales indican que deslizamientos previos se han registrado desde la dirección este, se evidencia en capas de materiales meteorizados que se mantienen tanto en toda la extensión del terreno como en toda la zona cercana.

Figura 9. Mapa de geología regional para el municipio de Salcajá



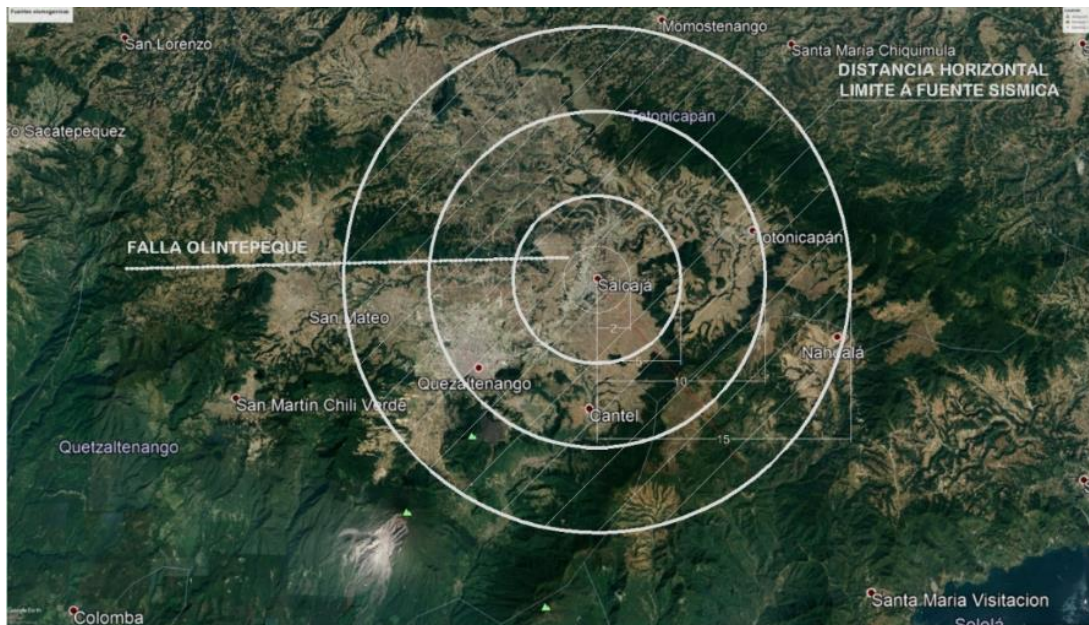
Fuente: INSIVUMEH (1978). *Informe final: Estudio de aguas subterráneas en el valle de Quetzaltenango.*

## 2.8. Sismicidad

La norma NSE 2-2018 indica que para el diseño estructural de cualquier edificación es necesario tomar en cuenta fallas sísmicas si el sitio se encuentra cercano a la fuente, siempre y cuando exista información oficialmente reconocida por autoridades competentes.

En este caso se cuenta con un informe del INSIVUMEH con información sobre la geología regional y fallas cercanas que puede ser usado para realizar las modificaciones necesarias a las ordenadas del espectro en la generación del diseño estructural.

Figura 10. **Fuentes sismogénicas y zona de incidencia de sismo para el sitio de estudio**



Fuente: Google Earth (2021). Consultado el 15 de abril de 2019. Recuperado de Maxar Technologies 2021.

En la figura 10 se observa la zona de incidencia sísmica por intensidades sísmicas especiales, se observan 4 círculos concéntricos indicando 2, 5, 10 y 15 kilómetros, debido a que la norma considera esas tres distancias a la falla. La única falla próxima a Salcajá es la de Olinstepeque que su parte más cercana se encuentra a 2 km de distancia.

### 2.8.1. Tipo de fuente sísmica

La norma clasifica en tres tipos de fuentes sísmicas las cuales se presentan en la tabla III.

Debido a que la única falla que se encuentra en la zona de incidencia del proyecto es la de Olinstepeque, la cual el informe del INSIVUMEH la indica como una falla inferida, tomando en cuenta su baja actividad sísmica y poco conocimiento de su máxima magnitud-momento, se infiere que es una falla de tipo C.

Tabla III. Tipos de fuente sísmica

Tipo de fuente	Descripción	Máxima magnitud-momento	Tasa de corrimiento (mm por año)
A	Fallas geológicas capaces de generar eventos de gran magnitud y con alta tasa de sismicidad	$M_0 \geq 7.0$	$TC \geq 5$
B	Fallas geológicas que no son A o C	$M_0 \geq 7.0$	$TC < 5$
		$M_0 \leq 7.0$	$TC > 2$
		$M_0 \geq 6.5$	$TC < 2$



Continuación tabla III.

C	Fallas geológicas incapaces de generar eventos de gran magnitud y que tienen baja tasa de sismicidad	$M_0 < 6.5$	$TC \leq 2$
---	--	-------------	-------------

Fuente: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018). *Norma de Seguridad Estructural 2: Demandas Estructurales*

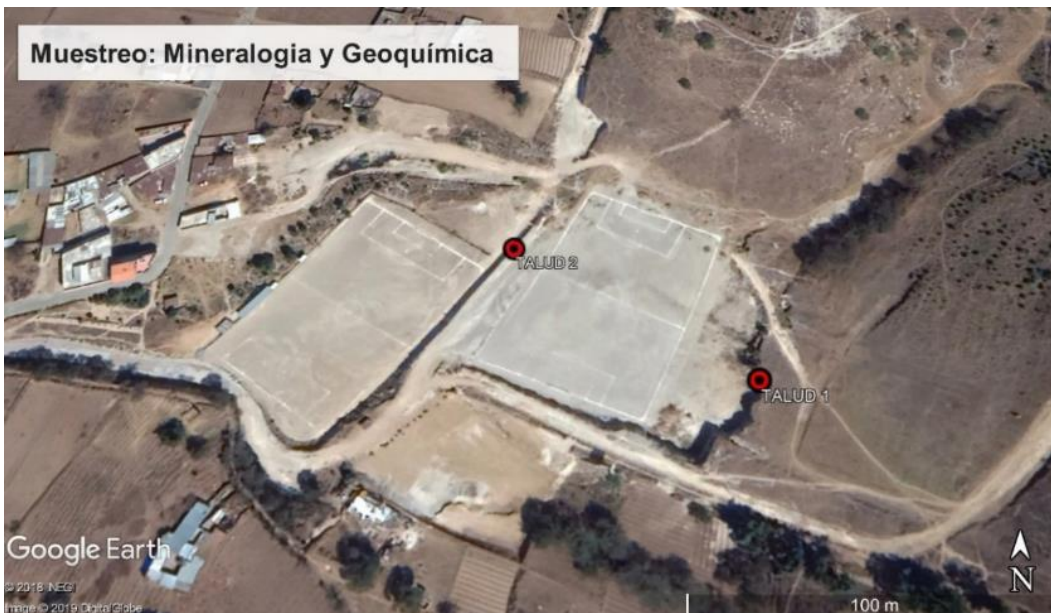
## 2.9. Metodología caracterización geológica del suelo

Una caracterización física del suelo volcánico solo permite una clasificación cualitativa del suelo, para poder determinar los contenidos de fases minerales y de elementos químicos, un análisis detallado debe de ser realizado.

### 2.9.1. Descripción del proceso de muestreo

Para identificar los minerales del suelo en estado cristalino, se utilizó la difracción de rayos X (XRD), en el caso de la geoquímica se utilizó el ensayo de fluorescencia de rayos X (XRF). Se analizaron dos muestras, debido a una diferencia de tonalidad de blanco a rosa en el sitio de estudio. La localización de dichos puntos de muestreo está identificada en la figura 11.

Figura 11. **Ubicación de muestras para análisis XRD y XRF**



Fuente: Google Earth (2021). Consultado el 15 de abril de 2021. Recuperado de Maxar Technologies 2021.

### **2.9.2. Composición mineralógica**

El equipo empleado para realizar el análisis de difracción de rayos X (XRD) fue un difractómetro *Empyrean Rietveld de PANalytical*, propiedad del Centro de Investigación y Desarrollo (C I+D) de grupo PROGRESO que realiza el análisis con un goniómetro de 4 minutos por barrido y rango de medición de  $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$ . Los picos en el diagrama resultante representan los minerales obtenidos de la muestra analizada en bruto.

Figura 12. **Difractómetro *Empyrean Rietveld***



Fuente: Malvern Panalytical (2020). *Malvern Panalytical: Products*.

## **2.10. Metodología caracterización geotécnica del suelo**

Para realizar la caracterización geotécnica se realizó una combinación entre los ensayos de laboratorio con muestras tomadas a cielo abierto y de ensayos en el sitio.

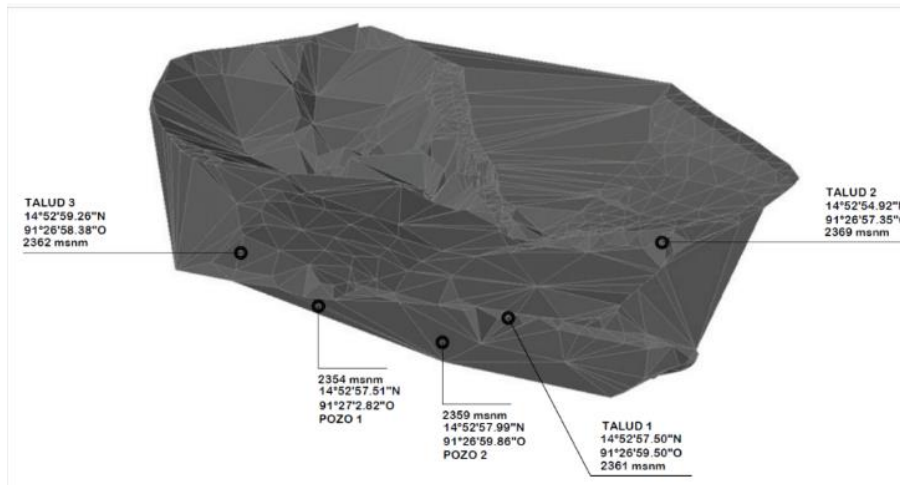
### **2.10.1. Ensayos de laboratorio**

En cuanto a los ensayos de laboratorio, como se mencionó en el plan de muestreo, se obtuvo una muestra por cada una de las áreas que por sus características han sido seleccionadas dentro del terreno.

### **2.10.2. Resumen del proceso de muestreo**

En la siguiente figura se ilustran las seis muestras del sitio de estudio, representando diferentes secciones del terreno según el plan de muestreo.

Figura 13. **Localización de muestras para caracterización de suelos y ensayo triaxial en laboratorio**



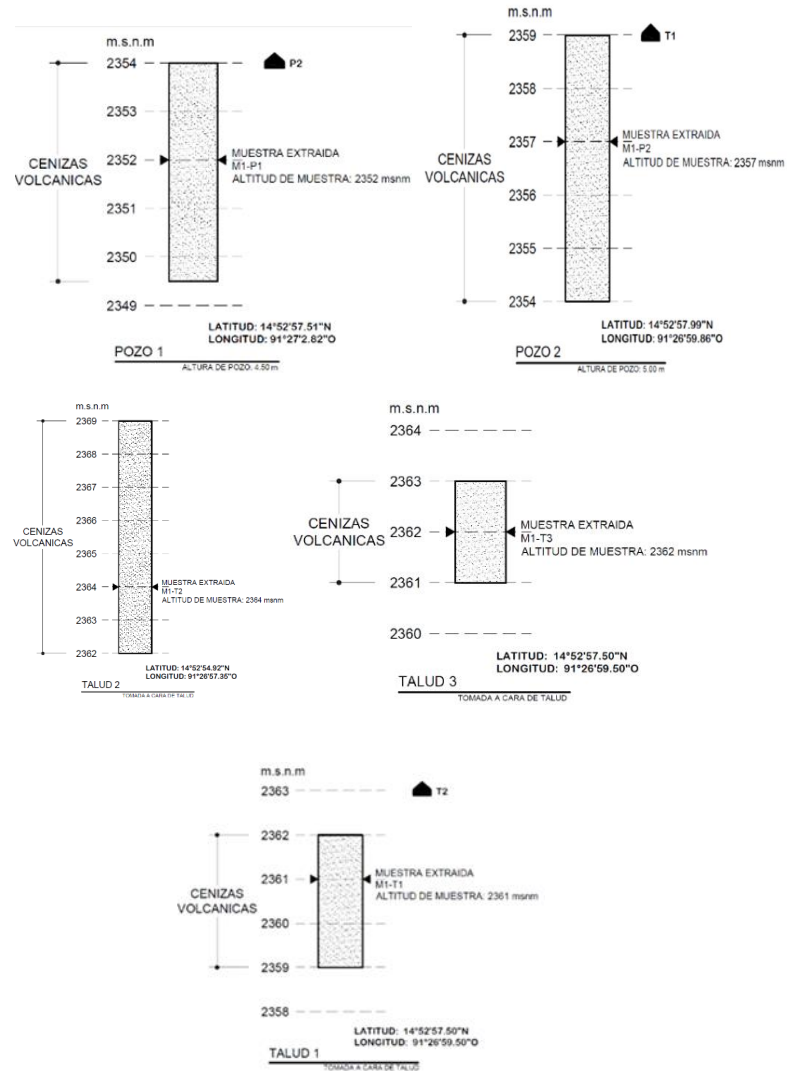
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Civil3D 2020.

A las muestras anteriores se les realizaron los siguientes ensayos.

- Análisis granulométrico (ASTM D422)
- Gravedad específica (ASTM D854)
- compresión triaxial no consolidado no drenado (ASTM D2850-70)

Estas muestras fueron tomadas por el autor, y llevadas al laboratorio RyL Ingenieros, ubicado en la cabecera del municipio de Quetzaltenango, para su ensayo y análisis, los resultados y el procedimiento documentado mediante fotografías se presenta en los anexos del presente documento.

Figura 14. **Localización en columna estratigráfica de muestras para caracterización y ensayo triaxial**



Fuente: elaboración propia, realizado Autodesk AutoCAD 2020.

Figura 15. Toma de muestras alteradas de pozos a cielo abierto



Fuente: [Fotografía de Mario Cifuentes]. (Salcajá, Quetzaltenango. 2019). Colección particular. Guatemala.

Figura 16. **Ejemplo de ensayos de laboratorio**



Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico*.

### 2.10.3. **Ensayo de penetración estándar (SPT)**

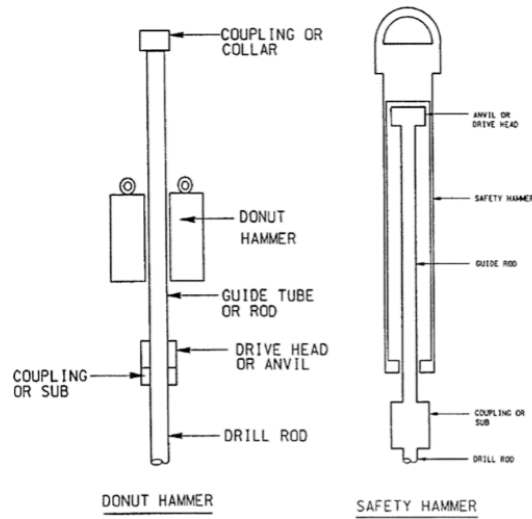
El ensayo SPT como se describió en el capítulo uno, utiliza un tubo de muestreo partido para obtener muestras alteradas de los diferentes estratos de suelo, al mismo tiempo que mida la resistencia del suelo a la penetración.

Para la realización de los ensayos se empleó un sistema de golpeo de tipo dona, sistema que se evidencia a la norma correspondiente (ASTM D1556) de forma manual, el yunque de golpeo tiene una masa de 140 lb y se deja caer de una distancia vertical de 76 cm aproximadamente.

Para la obtención de resultados se obtuvo el valor de N (cantidad de golpes) para cada 0.50 m de profundidad, siendo este valor de N luego corregido por varios motivos como el tipo de material, tipo de cuerda o método empleado debido a que esto puede alterar el nivel de energía inducido al suelo.



Figura 17. Tipos de yunque o masa de golpeo para el ensayo SPT



Fuente: ASTM International (1999). *ASTM D1586-99 Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils.*

Figura 18. Ensayos SPT realizados en campo



Fuente: [Fotografía de Mario Cifuentes]. (Salcajá, Quetzaltenango. 2019). Colección particular. Guatemala.



Para el método manual utilizando el yunque de golpeo de dona, Batilas, Pelekis, Roussos, y Athanasopoulos, (2016) concluyen que es necesario multiplicar por un coeficiente de 0.77 los valores de N para realizar la correcta correlación para las propiedades físicas y dinámicas del suelo.

#### **2.10.4. Localización y método**

Para la evaluación de campo, luego de analizar los ensayos de laboratorio se estableció necesario un total de 2 ensayos de penetración estándar, debido a que no se ha definido la forma de aprovechamiento de terreno y por lo tanto no se puede determinar si es una obra de tipo ordinaria o importante, se utilizará el mínimo de sondeos mecánicos (2) según la Norma de Seguridad Estructural 2.1 Ensayos Geotécnicos.

Estos sondeos mecánicos se priorizaron en las plataformas creadas de forma antrópica en el sitio, para poder evaluar diferencias provocadas por la conformación del terreno y la evolución del movimiento de tierras.

Figura 19. **Ubicación de sondeos mecánicos SPT**



Fuente: Google Earth (2021). Consultado el 15 de abril de 2021. Recuperado de Maxar Technologies 2021.

### **2.10.5. Correlaciones**

Para la obtención de los parámetros de suelo utilizando el ensayo de penetración estándar, es necesario utilizar correlaciones propuestas por diferentes autores, el problema de la elección de la correlación correcta es un problema estudiado desde hace décadas, por lo que se ha dado mayor importancia a los estudios más recientes donde el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se acerca a 1, lo cual indica un mayor acercamiento entre los ensayos de campo y los ensayos de laboratorio.

Las correlaciones de mayor relevancia para adoptar en esta investigación basados en el valor corregido de  $N_{60}$  son:

- Ángulo de fricción efectivo

$$\phi' = 12.79 + \sqrt{25.86N_{60}} \quad (\text{Ec. 1})$$

- Cohesión (C)

$$C = -16.5 + 2.15N \quad (\text{Ec. 2})$$

- Velocidad de onda de corte ( $V_s$ )

$$V_s = 97.90(N_{60})^{0.214} \quad (\text{Ec. 3})$$



### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS

#### 3.1. Análisis de composición mineralógica por difracción de rayos X (XRD)

Los resultados del análisis se resumen en la tabla IV y los diagramas resultantes en las figuras 20 y 21.

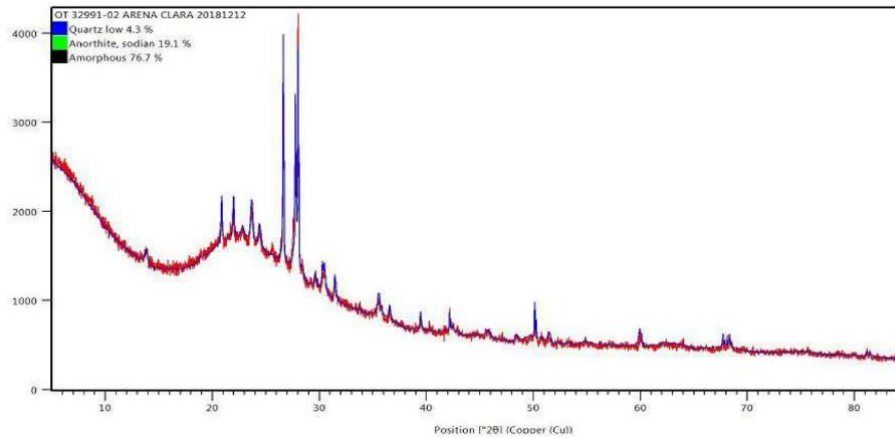
Tabla IV. **Contenido de fases minerales en las muestras**

Muestra	Apariencia	Fase Mineral			
		Cuarzo	Albita	Anortita	Material Amorfo
		SiO <sub>2</sub>	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	
Talud 1	Rosada	4.30 %		19.10 %	76.70%
Talud 2	Blanca	2.80 %	10.90 %		86.20 %

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Cementos Progreso S.A. (2018). *Centro tecnológico: Ensayo de laboratorio.*

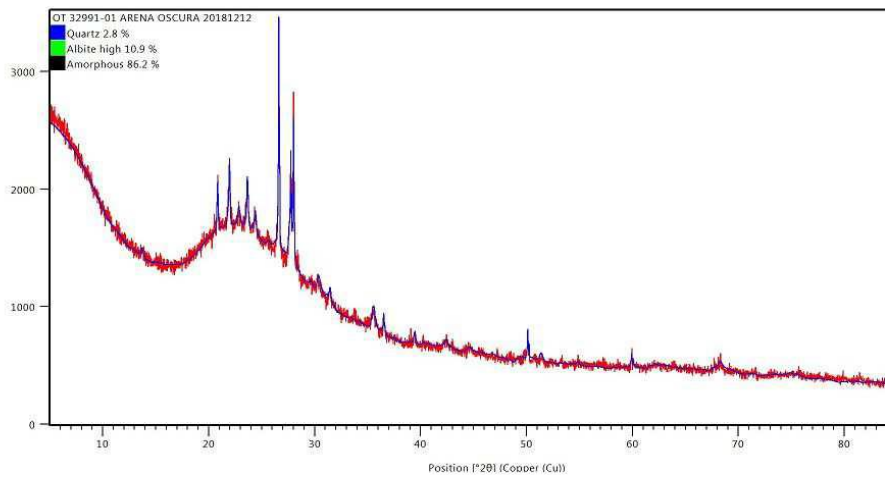
Los resultados de las dos muestras indican que el suelo volcánico es predominantemente compuesto por materiales amorfos, pero con porcentajes de feldespatos como anortita y albita y porcentajes mínimos de minerales de cuarzo.

Figura 20. Resultados XRD para muestra Talud 1



F Fuente: Cementos Progreso S.A. (2018). *Centro tecnológico: Ensayo de laboratorio.*

Figura 21. Resultados XRD para muestra Talud 2



Fuente: Cementos Progreso S.A. (2018). *Centro tecnológico: Ensayo de laboratorio.*

En el caso de estas muestras ensayadas a través del método de fluorescencia de rayos x (XRF) se hace la aclaración que se nombra como “Arena Oscura” a la correspondiente al talud uno de apariencia rosada que se menciona

en la prueba XRD, mientras se le llama arena clara a la arena de color blanco mencionada como talud 2.

### 3.2. Análisis químico por XRF

En la tabla V se muestra el análisis químico por XRF para la composición geoquímica de la muestra.

Tabla V. **Composición geoquímica de las muestras (%)**

	<b>Arena Oscura</b>	<b>Arena Clara</b>		<b>Arena Oscura</b>	<b>Arena Clara</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	71.48	71.44	<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.19	0.18
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	12.47	12.80	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.11	0.09
<b>K<sub>2</sub>O</b>	3.65	3.71	<b>MnO</b>	0.08	0.08
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3.59	3.69	<b>MgO</b>	0.00	0.00
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1.62	1.62	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.00	0.00
<b>CaO</b>	1.32	1.51	<b>SO<sub>3</sub></b>	0.00	0.00
<b>LOI (950 °C) (Pérdida por ignición)</b>				3.61	3.07

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Cementos Progreso S.A. (2018). *Centro tecnológico: Ensayo de laboratorio.*

### 3.3. Análisis granulométrico y prueba de compresión triaxial

A continuación, se presentan de forma tabulada los resultados obtenidos a partir del ensayo de granulometría (ASTM D422) y ensayo de compresión triaxial no consolidado no drenado (ASTM D2850-70).

Tabla VI. **Resumen de ensayos de laboratorio para caracterización geotécnica**

<b>Muestra</b>	<b>Altitud (MSNM)</b>	<b>%Finos</b>	<b><math>\gamma_{seco}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Angulo de fricción interna</b>	<b>Cohesión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Pozo 1	2352	17.7	1.852	21.56	0.48
Pozo 2	2357	17.6	1.611	20.06	0.39
Talud 1	2361	24.5	1.362	28.61	0.11
Talud 2	2369	19.1	1.550	28.89	0.14
Talud 3*	2362	7.7	1.604		

\*Debido a su granulometría / ausencia de finos. Fue imposible la reconfirmación de muestra para ensayo Triaxial UU.

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Cementos Progreso S.A. (2018). *Centro tecnológico: Ensayo de laboratorio.*

### 3.3.1. **Ensayo de penetración estándar -SPT- (ASTM D1556)**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de penetración estándar -SOT- (ASTM D1556).



## ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR

ASTM D1586

<b>Proyecto:</b>	Caracterización geológica y geotécnica del depósito de material de origen piroclástico "El Arenal"	<b># De Sondeo</b>	1
<b>Ubicación</b>	Zona 4, Salcajá, Quetzaltenango	<b>Fecha Ensayo</b>	16/02/2019
<b>Coordenadas</b>	14° 52.968'N // 91° 26.997'W	<b>Nivel Freático</b>	N/A
<b>Solicitante</b>	Ing. Mario Cifuentes Jacobs		

Figura 22. Resultados SPT sondeo 1

Captura de Datos en Campo				Parámetros Físicos (Calculados)				Parámetros Mecánicos (Calculados)					
PROF m	20 cm	15 cm	N cm	Clasificación	Corrección Energía CE	N60 Corregido	Compacidad Relativa	Fricción Interna	Cohesión Kpa	Cohesión Kg/cm2	Angulo de Reposo	E (kg/cm2)	Vs (m/s)
0.50	2	2	4	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	3.08	Muy Suelto	22.85	9.53	0.10	56.42	88.23	124.55
1.00	3	4	8	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	6.16	Suelto	26.10	11.40	0.12	58.05	103.26	144.46
1.50	4	6	14	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	10.78	Medio Denso	29.68	14.19	0.14	59.84	125.80	162.84
1.50	4	6	14	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	10.78	Medio Denso	29.68	14.19	0.14	59.84	125.80	162.84
2.50	10	18	36	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	27.72	Medio Denso	36.55	24.42	0.25	64.27	208.47	199.32
3.00	11	12	21	SM: Arenas limosas, mezclas de arena y limo	0.77	16.17	Medio Denso	32.98	17.44	0.18	61.49	152.11	177.60
3.50	11	12	23	SM: Arenas limosas, mezclas de arena y limo	0.77	17.71	Medio Denso	33.82	18.37	0.19	61.91	159.62	181.09
4.00	11	14	26	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	20.02	Medio Denso	35.01	19.77	0.20	62.50	170.90	185.91

Relaciones de Cálculo

\*Factor de corrección para método manual, empleando yunque de dona (Battias, Pelekis, Roussos, & Athanasopoulos, 2016)

\*Angulo de Fricción Interna (Montenegro & González, 2014)

\*Cohesión (Kumar, Bhargava, & Choudhury, 2016)

\*Velocidad de onda de corte (Rahimi, Wood, & Wotherspoon, 2020)

E = Webb (1969)

Fuente: elaboración propia.

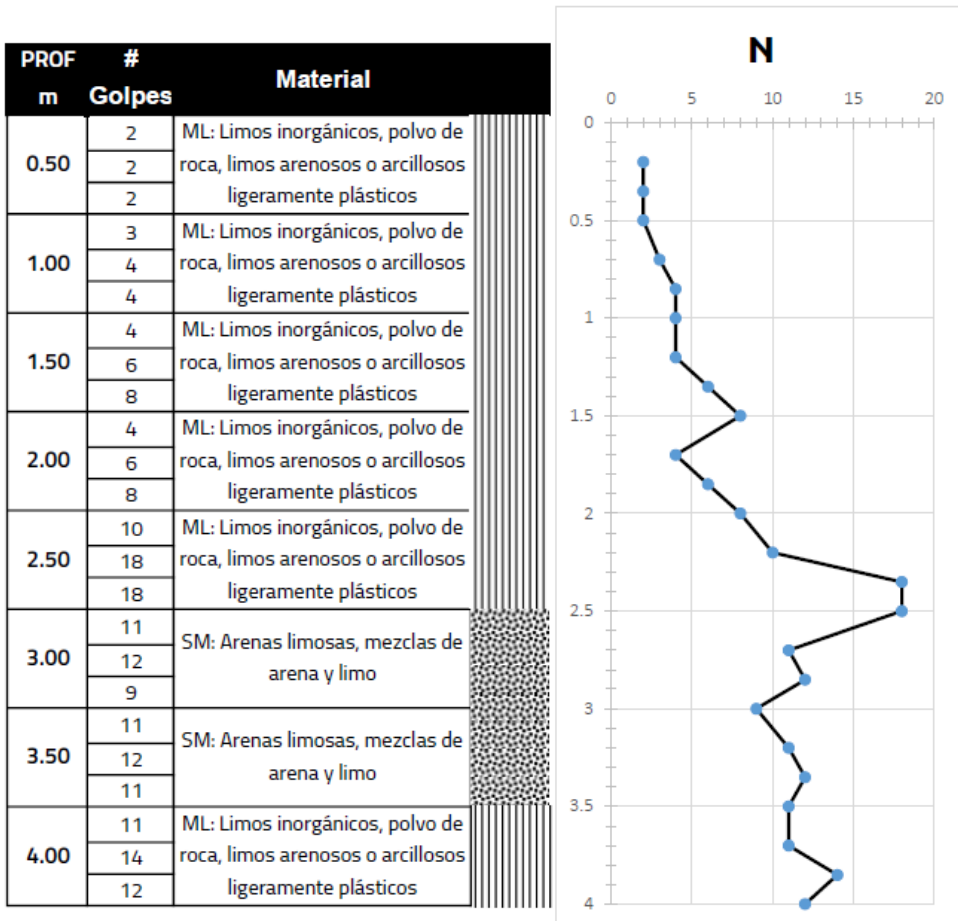
Figura 23. Resultados SPT sondeo 1

**ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR**

ASTM D1586

Sondeo#	1
---------	---

Proyecto:	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE ORIGEN PIROCLÁSTICO "EL ARENAL"
Ubicación	Zona 4, Salcajá, Quetzaltenango
Coordenadas	14° 52.968'N // 91° 26.997'W
	Número de Golpes
	Blow Count



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Resultados SPT sondeo 1

**ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR**

ASTM D1586

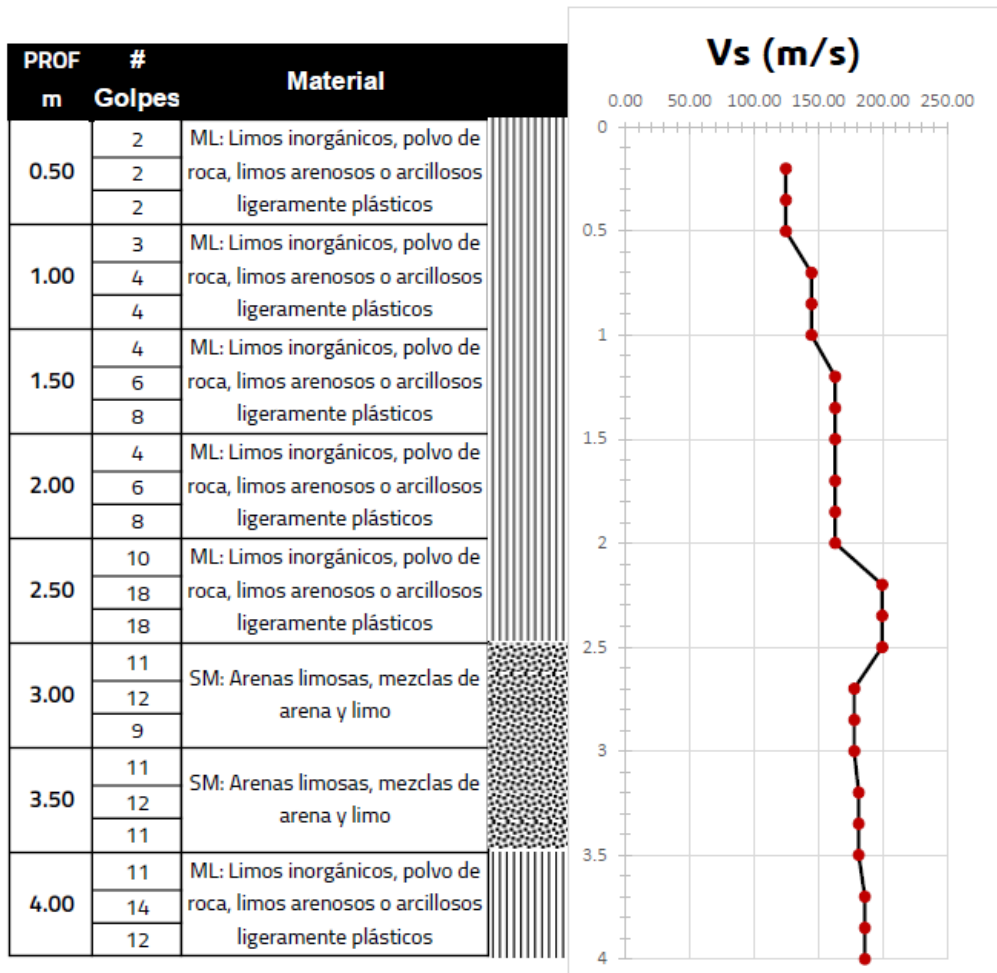
Sondeo#	1
---------	---

Proyecto: CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE ORIGEN PIROCLÁSTICO "EL ARENAL"

Ubicación: Zona 4, Salcajá, Quetzaltenango

Coordenadas: 14° 52.968'N // 91° 26.997'W

Velocidad de Onda de Corte
Shear Wave Velocity



Fuente: elaboración propia.

# ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR

ASTM D1586

Proyecto:

Caracterización geológica y geotécnica del depósito de material de origen piroclástico "El Arenal"
Zona 4, Salcajá, Quetzaltenango
14° 52.930'N // 91° 26.954'W
Ing. Mario Cifuentes Jacobs

Ubicación

Coordenadas

Solicitante

# De Sondeo

Fecha Ensayo

Nivel Freático

2
16/02/2019
N/A

Figura 25. Resultados SPT Sondeo 2

Captura de Datos en Campo				Parámetros Físicos (Calculados)				Parámetros Mecánicos (Calculados)						
PROF m	20 cm	15 cm	15 cm	N	Clasificación	Corrección Energía LE	NGO Corregido	Compacidad Relativa	Fricción Interna	Cohesión Kpa	Cohesión Kg/cm2	Angulo de Reposo	E (kg/cm2)	Vs (m/s)
0.50	3	3	4	7	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	5.39	Suelto	25.38	10.93	0.11	57.69	99.50	140.39
1.00	2	4	3	7	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	5.39	Suelto	25.38	10.93	0.11	57.69	99.50	140.39
1.50	3	6	5	11	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	8.47	Suelto	28.02	12.79	0.13	59.01	114.53	154.65
1.50	8	6	6	12	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	9.24	Suelto	28.59	13.26	0.14	59.30	118.29	157.56
2.50	7	7	9	16	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	12.32	Medio Denso	30.70	15.12	0.15	60.35	133.32	167.56
3.00	12	11	9	20	SM: Arenas limosas, mezclas de arena y limo	0.77	15.4	Medio Denso	32.55	16.98	0.17	61.27	148.35	175.76
3.50	12	12	12	24	SM: Arenas limosas, mezclas de arena y limo	0.77	18.48	Medio Denso	34.22	18.84	0.19	62.11	163.38	182.75
4.00	14	10	12	22	ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	0.77	16.94	Medio Denso	33.41	17.91	0.18	61.70	155.87	179.38

Relaciones de Cálculo

\*Factor de corrección para método manual, empleando yunque de dona (Batllas, Peletis, Roussos, & Athanopoulos, 2016)

\*Angulo de Fricción interna (Montenegro & González, 2014)

\*Cohesión (Kumar, Bhargava, & Choudhury, 2016)

\*Velocidad de onda de corte (Rahimi, Wood, & Wotherspoon, 2020)

E= Webb (1969)

Fuente: elaboración propia.

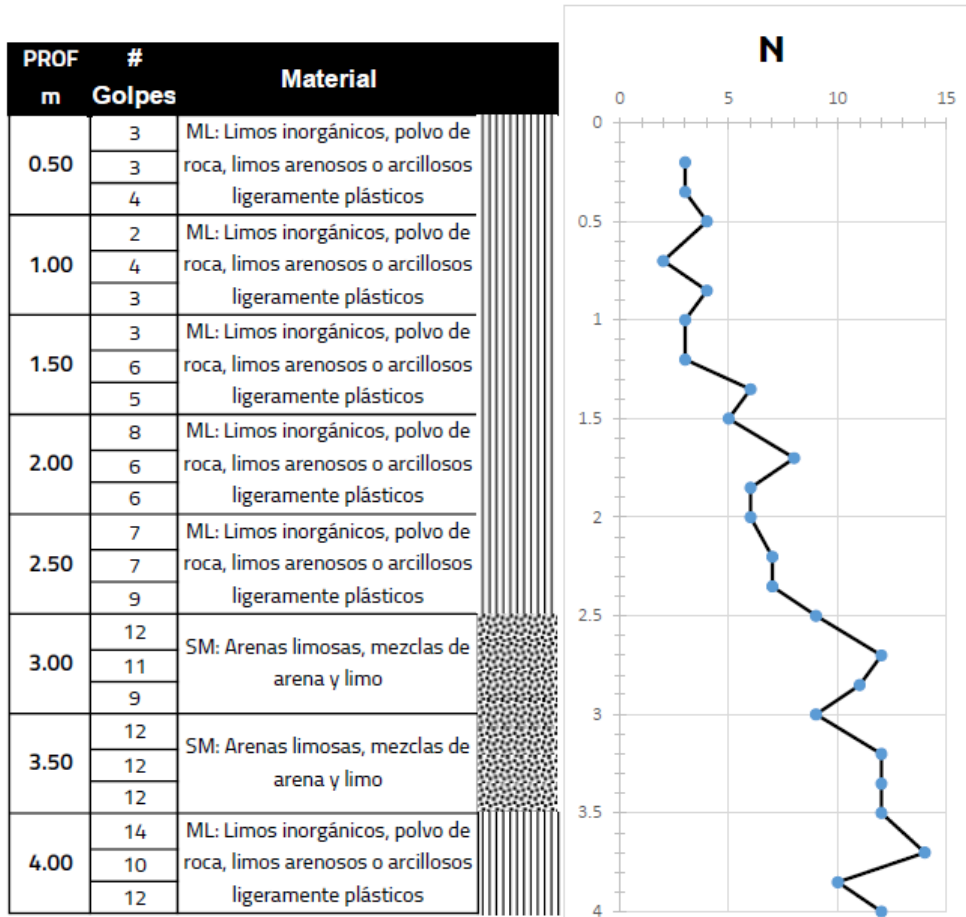
Figura 26. Resultados SPT sondeo 2

**ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR**

ASTM D1586

Sondeo#	2
---------	---

Proyecto:	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE ORIGEN PIROCLÁSTICO "EL ARENAL"
Ubicación	Zona 4, Salcajá, Quetzaltenango
Coordenadas	14° 52.930'N // 91° 26.954'W
	Número de Golpes
	Blow Count



Fuente: elaboración propia.

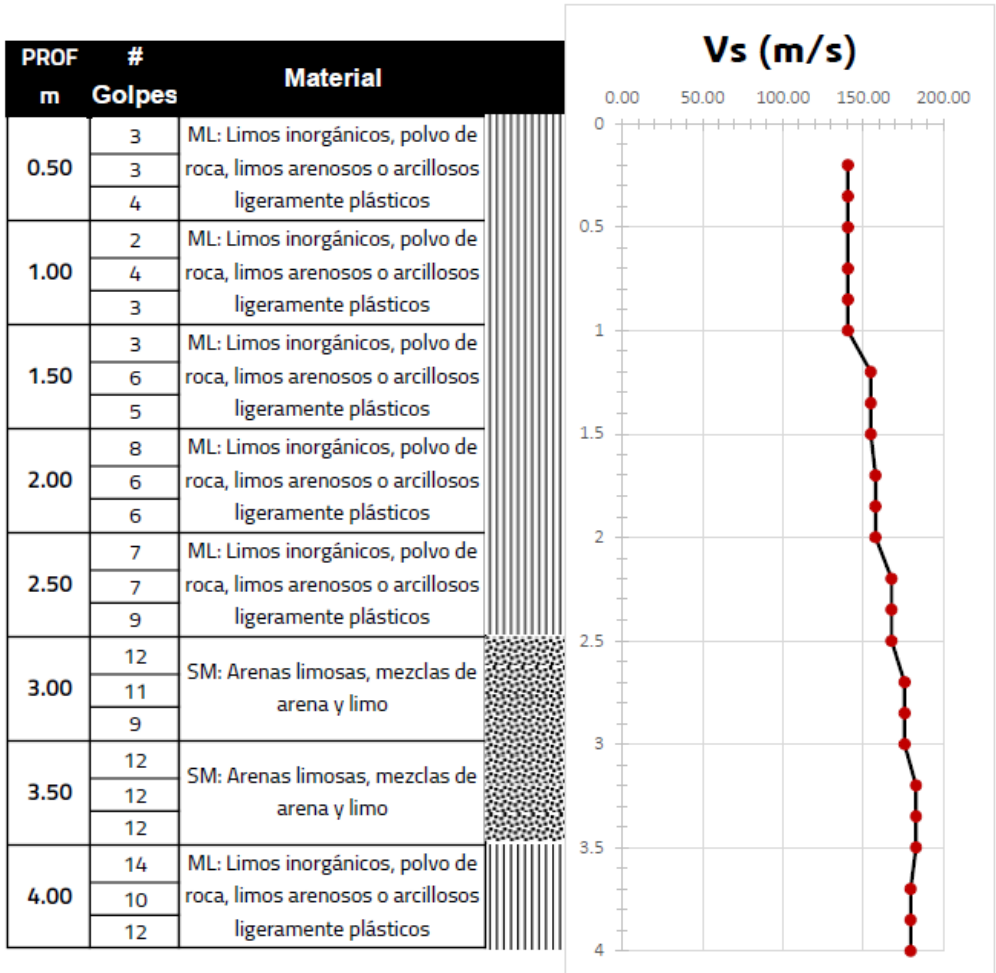
Figura 27. Resultados SPT sondeo 2

**ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR**

ASTM D1586

Sondeo#	2
---------	---

Proyecto:	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL DEPÓSITO DE MATERIAL DE ORIGEN PIROCLÁSTICO "EL ARENAL"
Ubicación	Zona 4, Salcajá, Quetzaltenango
Coordenadas	14° 52.930'N // 91° 26.954'W
	Velocidad de Onda de Corte
	Shear Wave Velocity



Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Análisis de susceptibilidad a licuefacción

El contenido de finos (FC) se obtuvo de ensayos de análisis granulométrico, expresado como el porcentaje de peso de muestra que pasa el tamiz #200. Estos ensayos se efectuaron en cada punto de estudio, los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Contenido de finos en cada muestra**

<b>Muestra</b>	<b>FC (%)</b>
Pozo 1	17.7
Pozo 2	17.6
Talud 1	24.5
Talud 2	19.1

Fuente: elaboración propia.

#### 3.4.1. Esfuerzo efectivo

El esfuerzo efectivo del suelo se conoce como la fracción de esfuerzo normal a una profundidad específica que ejercen las partículas de suelo entre sí en los puntos de contacto sin tomar en cuenta la presión por el agua intersticial. No se tomará en cuenta la presión intersticial ya que, por las prospecciones y ensayos realizados, el nivel freático parece profundo y alejado de las cotas de cimentación.

La ecuación que se utilizó para calcular el esfuerzo efectivo es la siguiente

$$\sigma' = [H\gamma_w + (H_A - H)\gamma_{sat}] - H_A\gamma_w \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$\sigma'$ = Esfuerzo efectivo

H= Altura del nivel freático desde la parte superior de la columna de suelo

H<sub>A</sub>= Distancia desde el punto de estudio y el nivel freático

$\gamma_w$ = Peso Unitario del agua

$\gamma_{sat}$ = Peso unitario del suelo saturado

Para este caso se consideraron datos de altura de nivel freático de 1m, distancia del punto de análisis al nivel freático de 30 m, esto debido a que según la determinación de elevaciones la lámina del río Samalá se encuentra a 30 metros por debajo de la cota promedio de análisis. En el caso de los pesos específicos del agua (9800 N/m<sup>3</sup>) y de cada suelo según los ensayos de laboratorio de gravedad específica. La única diferencia es el peso específico saturado de la muestra del pozo 1.

Tabla VIII. **Determinación de esfuerzo efectivo de cada muestra**

	<b>Densidad húmeda (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Esfuerzo efectivo (<math>\sigma'</math>) kPa</b>
<b>Pozo 1</b>	2.53	728.83
<b>Pozo 2</b>	1.88	544.10
<b>Talud 1</b>	1.74	504.31
<b>Talud 2</b>	1.87	541.25

Fuente: elaboración propia.



### 3.4.2. SPT N60

Para calcular los valores de N60 utilizando correlación del ensayo triaxial, se utilizó la correlación presentada por Kumar, Bhargava y Choudhury (2016). En este estudio se demuestra que existe una relación lineal entre la cohesión y los valores de N de los ensayos de SPT, la ecuación de regresión propuesta es la siguiente:

$$C = -16.5 + 2.15N \quad (\text{Ec. 5})$$

En donde C es la cohesión de un suelo intermedio en KPa y N es el valor N obtenido en un ensayo SPT, por lo cual los resultados de N obtenidos de los ensayos triaxiales.

Para la corrección o N60 se utilizó el mismo factor empleado para el ensayo SPT de campo, 0.77 considerando el ensayo manual y el martillo golpeador de tipo *donut*.

Tabla IX. **Determinación de valores de N y N60**

<b>Muestra</b>	<b>Cohesion [kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Cohesion [kPa]</b>	<b>SPT N</b>	<b>N60</b>
<b>Pozo 1</b>	0.48	47.07	29.57	22.77
<b>Pozo 2</b>	0.39	38.25	25.46	19.60
<b>Talud 1</b>	0.11	10.79	12.69	9.77
<b>Talud 2</b>	0.14	13.73	14.06	10.83

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.3. Relación de resistencia cíclica

Para encontrar la relación de la resistencia cíclica primero debe de corregirse el valor de N empleando la propuesta del método HBF, la cual se realizó con la siguiente ecuación:

$$(N_1)_{60} = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_v}} \times N_{60} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$(N_1)_{60}$ =Equivalente de arena limpia valor de N

$P_a$ = Presión atmosférica

$\sigma'_v$ =Esfuerzo efectivo

$N_{60}$ =Valor de N corregido

El estudio Hwang, Khoshnevisan, Juang y Lu (2020) , cuya metodología se emplea para el presente cálculo de susceptibilidad a licuefacción, propone la siguiente expresión para el cálculo de la relación de resistencia cíclica (CRR) cíclica.

$$CRR = A + \frac{B \times (N_1)_{60cs}}{1 - (N_1)_{60cs}/C} \quad (\text{Ec. 7})$$

En donde los parámetros A, B y C son 0.07, 0.0042 y 42 respectivamente. y el valor  $(N_1)_{60cs}$  se obtiene de la siguiente manera

$$(N_1)_{60cs} = k_s \times (N_1)_{60} \quad (\text{Ec. 8})$$

De esta ecuación el valor de  $k_s$  depende del contenido de finos, si el contenido de finos es menor o igual al 10 % el valor de  $k_s$  es igual a 1. Si el contenido de finos es mayor al 10 % se utiliza la siguiente ecuación:

$$k_s = 1 + 0.07 \times \sqrt{FC - 10} \quad (\text{Ec. 9})$$

Aplicando las ecuaciones a cada muestra se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla X. **Determinación de valores de CRR**

	<b>FC (%)</b>	<b>Ks</b>	<b>(N1)60cs</b>	<b>CRR</b>
<b>P1</b>	17.70	1.19	10.14	0.126
<b>P2</b>	17.60	1.19	10.09	0.126
<b>T1</b>	24.50	1.27	5.55	0.097
<b>T2</b>	19.10	1.21	5.67	0.097

Fuente: elaboración propia.

#### **3.4.4. Datos de sismo**

El método HBF permite evaluar la susceptibilidad a licuefacción a determinado sismo de prueba, por lo cual se evaluarán los datos para sismos de magnitudes  $M_w$  (Escala de momento sísmico) de 6, 7 y 8 y una aceleración pico de suelo de  $8 \text{ m/s}^2$ .

##### **3.4.4.1. CSR7.5 (Relación de esfuerzo cíclico)**

Para calcular el valor de CSR7.5 se utilizó la ecuación siguiente propuesta en el método HBF:

$$CSR_{7.5} = 0.65 \times \frac{a_{max}}{g} \times \frac{\sigma'_v}{\sigma_v} \times \frac{r_d}{MSF} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

$a_{max}$ =aceleración máxima de suelo

$\sigma_v$ =Esfuerzo total

$\sigma'_v$ =Esfuerzo efectivo

$r_d$ =Factor de reducción de corte

$MSF$ =Factor amplificación de magnitud

Para calcular el factor de amplificación de magnitud se utilizó la ecuación propuesta por Hwang en el método HBF, la cual es la siguiente:

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^{-1.8} \quad (\text{Ec. 11})$$

Para calcular el factor de reducción de corte se utilizó la ecuación propuesta por el método HBF, la cual depende de la profundidad, si la profundidad es menor que 10 m el factor de reducción se encuentra con la siguiente ecuación

$$r_d = 1.0 - 0.01z \quad (\text{Ec.12})$$

Donde  $z$  es la profundidad en metros, si la profundidad es mayor a 10m y menor a 20m el factor de reducción se encuentra con la siguiente ecuación:

$$r_d = 1.2 - 0.03z \quad (\text{Ec. 13})$$

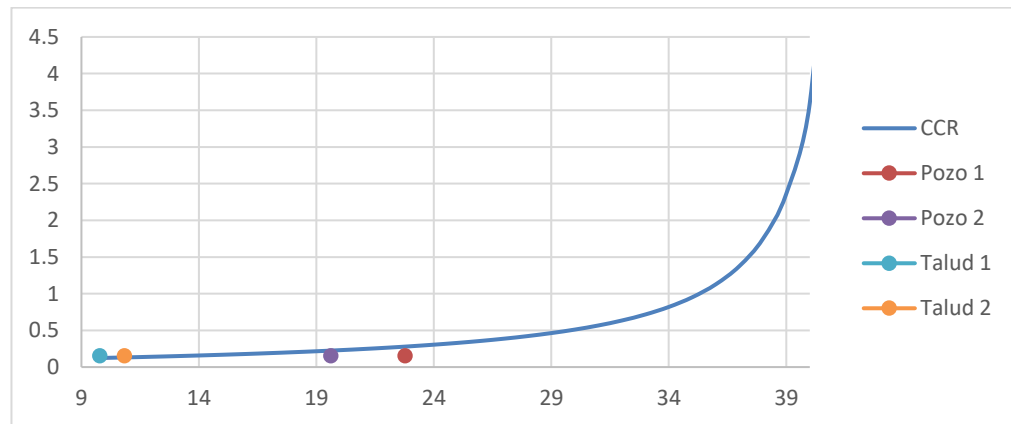
El factor de seguridad se encuentra al dividir el valor de CRR entre el valor de CSR7.5.

Tabla XI. Estimación de factores de seguridad para sismos MW= 6,7 y8

Muestra	MW=8			MW=7			MW=6		
	rd	CSR7.5	FS	rd	CSR7.5	FS	rd	CSR7.5	FS
Pozo 1	0.45	0.197	0.639	0.45	0.155	0.813	0.45	0.117	1.074
Pozo 2	0.45	0.197	0.638	0.45	0.155	0.811	0.45	0.117	1.074
Talud 1	0.45	0.197	0.491	0.45	0.155	0.625	0.45	0.117	0.824
Talud 2	0.45	0.197	0.495	0.45	0.155	0.629	0.45	0.117	0.830

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Gráfico de puntos de FS vs N60 para estimación de susceptibilidad a licuefacción



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.



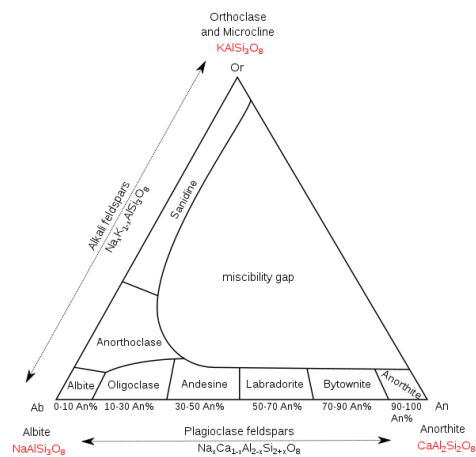
## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y MEDIDAS PARA LA PROTECCIÓN DEL SITIO

### 4.1. Caracterización geológica

Los resultados de los análisis mostraron que el depósito está formado mayoritariamente por mineral albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), el cual es un mineral o solución sólida del grupo de los silicatos, clasificándose entre los feldespatos denominados plagioclasas.

Entre las características de este mineral se encuentran su tonalidad blanca o gris, a veces translúcida. Este mineral se produce naturalmente en erupciones volcánicas ya que se forma al enfriarse el magma.

Figura 29. Diagrama ternario de fase de los feldespatos a (900 °C)



Fuente: Mather (2013). *Geochemistry*.

Dentro del depósito se encuentran vetas o zonas en las que la tonalidad cambiaba, una muestra de este material también se llevó al laboratorio dando como resultado el mineral Anortita, el cual corresponde al mismo grupo de la albita, siendo la diferencia que seguido del Silicio que es el mineral predominante el segundo más abundante es el calcio en lugar del sodio, esto es lo que cambia la tonalidad del blanco o translúcido por un color rosado o color salmón.

#### **4.2. Caracterización geotécnica**

En cuanto a las características geotécnicas, luego de los ensayos en campo, se observó homogeneidad del tipo de material hasta la profundidad de 4 metros, que se estima que es una profundidad adecuada de desplante para la cimentación de edificios que por su altura no requieren de un sistema no convencional o sistema de cimentación pilotada o profunda. Estas conclusiones se ven reforzadas al analizar los resultados de análisis de ensayo granulométrico.

En cuanto a las diferencias entre muestras que se evidenciaron se encuentra una pequeña variación en la granulometría de los taludes de plataformas que no se han modificado de forma antrópica y las que han sufrido manipulación para poder usarla para urbanizar, por el momento como caminos de terracería y canchas de fútbol. Esto es normal al considerar que el uso de maquinaria y la exposición directa al medio ambiente meteoriza de forma física las partículas de suelo.

Las propiedades mecánicas expuestas en los resultados de campo muestran uniformidad en los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna, estos únicamente varían debido al contenido de finos porcentual al tamaño de las muestras. La información se confirma al evaluar los resultados de ensayos de compresión triaxial no consolidada no drenada (UU).



Como conclusión de esta caracterización, los valores alcanzados se consideran adecuados para cimentaciones superficiales sin necesidad de realizar tratamientos o procesos de mejoramiento o estabilización de suelo de tipo físico. Esto se puede confirmar al analizar los resultados del cálculo de capacidad de carga para cimentaciones cuadradas presentadas en los anexos.

### **4.3. Análisis de riesgos geológicos**

A continuaciones se desarrolla el análisis de riesgos geológicos entre los cuales se puede mencionar la licuefacción de suelos y la susceptibilidad a movimientos de masa.

#### **4.3.1. Licuefacción de suelos**

Como se puede ver en la tabla XI, luego de realizar el análisis de susceptibilidad a licuefacción en el sitio, se estableció que para un sismo de Magnitud 6, las zonas que han tenido poca manipulación antrópica por movimiento de tierras no se ven susceptibles al fenómeno de licuefacción.

Sin embargo, las muestras extraídas de los puntos Talud 1 y Talud 2, que corresponden a las zonas que han sido manipuladas por maquinaria para establecer plataformas presentan un factor de seguridad menor a 1, lo cual indicaría que podrían sufrir licuefacción, siempre recordando que para que esto se active deben darse condiciones de saturación en el estrato analizado.

Esta tendencia también aplica para el análisis de sismos de magnitud 7 y 8, que son sismos de diseños severo o extremo respectivamente. Esto es equivalente a que exista una probabilidad de excedencia en 50 años de 5 % y 2

%, se concluye que no representa un riesgo ya que estas probabilidades todavía son más bajas si deben de combinarse con un estado de saturación de suelo.

#### 4.3.2. Susceptibilidad a movimientos de masa

Luego de analizar la topografía y realizar los recorridos de terreno, se identifica que las pendientes máximas en el lugar son de 35 % en la ladera noreste y 29 % en la ladera noroeste, en análisis cualitativo y de observación es la principal razón para identificar las laderas dentro de la categoría IV (Medianamente alta), para esto se toma en cuenta algunos factores evidenciables como movimientos traslacionales de masa, lo cual se evidencia en la vegetación todavía presente y en un pequeño deslizamiento observado en la parte más al oeste del terreno, contigua a otras propiedades. Actualmente esto no representa ningún peligro al ser terreno no urbanizado, sin embargo, en el caso de tener alguna edificación, este fenómeno si pudiese afectar la integridad estructural al generar asentamiento o movimiento lateral no contemplado en diseño en los elementos estructurales.

Figura 30. **Movimiento traslacional en las laderas del terreno**



Fuente: [Fotografía de Mario Cifuentes]. (Salcajá, Quetzaltenango. 2019). Colección particular. Guatemala.

Como otro factor a tomar en cuenta se observan procesos de erosión derivados de la escorrentía superficial; estas grietas o flujos como rastro de corrientes de escorrentía aparecen en todo el terreno, sin embargo, es en las laderas donde son más relevantes, al mostrar un mal drenaje del talud lo cual en eventos de lluvia extremos podría sobresaturar el suelo y desencadenar deslizamientos rápidos.

#### **4.4. Confiabilidad y replicabilidad**

Para asegurar que los resultados obtenidos a través de los ensayos tengan rigurosidad científica, así como para asegurar que puedan ser comprobados para cualquier revisión al tema se consideran los siguientes factores.

Todos los ensayos de laboratorio fueron realizados mediante los procedimientos normados por *American Society for Testing and Materials* (ASTM) por lo que se puede asegurar la calidad de estos, así también la realización del ensayo de penetración estándar (SPT) se ejecutó mediante equipo estandarizado, aunque pueden existir variantes por la propia naturaleza del ensayo, al obtenerse los resultados mediante correlaciones geotécnicas.

En el caso de las muestras, luego de realizar los reconocimientos preliminares, observando los taludes y yacimientos, así como al evaluar la estratigrafía en los pozos a cielo abierto se observó uniformidad en el terreno, lo que vuelve factible la utilización de una única muestra por zona (según plan de muestreo) y así la optimización de recursos.

Principalmente por la uniformidad de características físicas visualizada en los pozos a cielo abierto, se determinó que no es necesario una densidad de

ensayos de campo muy alta, por lo que se realizaron únicamente dos ensayos SPT, uno por cada plataforma.

#### **4.5. Recomendaciones**

Debido a los valores de N encontrados y plasmados en la tabla IX, se establece que para las muestras Pozo 1 y Pozo 2, se puede clasificar el sitio como D (Perfil de suelo rígido) en la clasificación de la norma AGIES NSE 2.1 - Estudios Geotécnicos. Estos valores clasifican al terreno en una categoría baja, por lo que, para poder emplazar una obra importante o esencial, según la propia clasificación de AGIES, es necesario un estudio geotécnico a detalle para evaluar los riesgos geológicos ya específicos para las edificaciones planificadas.

##### **4.5.1. Cimentaciones**

Para el caso de cimentaciones superficiales, se establece que es factible el uso de un sistema tradicional, mientras se dimensione según los valores de soporte o capacidad de carga, recordando ajustar las dimensiones del cimiento en la teoría de cálculo escogida.

Para proponer una edificación empleando niveles debajo del nivel de suelo, en el cual sea necesario realizar excavaciones o en el caso se proponga edificaciones que por su altura requieran de cimentaciones profundas, deben de realizarse estudios geofísicos y mediante Sondeo eléctrico vertical identificar nivel freático para poder evaluar si los estratos saturados se encuentran en la altura de intervención, lo cual podría crear problemas de licuefacción en estratos profundos o de tubificación en caso de modificar los drenajes naturales.

#### **4.5.2. Laderas**

Luego de realizar la evaluación de pendientes y características físicas de las laderas existentes, se evidencia que el riesgo más importante radica en el manejo de agua pluvial, el tipo de material y la ausencia de vegetación ha producido flujos que provocan movimientos traslacionales. En cuanto a las sugerencias para mitigar esta situación, se plantea el continuar con las labores de reforestación que ya se han iniciado en la parte de las coronas de los taludes, para aumentar la protección a erosión en estas zonas.

Para reforzar las medidas para proteger la erosión, previo a establecer complejos de edificios de tipo residencial, escolar, sanitario o lo que finalmente se establezca en el sitio, deben de protegerse de la erosión estos taludes. Esto puede realizarse mediante soluciones como mantos geo sintéticos de protección, que podrían ser permanentes o temporales si se planifica la revegetación.



## CONCLUSIONES

1. El depósito El Arenal está formado por el mineral albita con algunas vetas de anortita, los cuales son silicatos de aluminio con predominancia de sodio y calcio respectivamente; esto fue comprobado con ensayos de difracción de rayos X (XRD) y confirmado al analizar su composición química mediante fluorescencia de rayos x (XRF).
2. La caracterización geotécnica evidenció uniformidad del tipo de material siendo esto desde limos arenosos (ML) hasta arenas limosas (SM); la diferencia de clasificación se da por variación de características como contenido de finos o peso específico que fue producido por las variantes de las zonas manipuladas por maquinaria al conformar plataformas y por la meteorización de los taludes y plataformas expuestas a la intemperie.
3. Las propiedades mecánicas en el sitio son muy similares, con base en parámetros como el ángulo de fricción interna, el cual osciló entre los 21 y 29 grados, en el caso de la cohesión entre 0.11 y 0.48 kg/cm<sup>2</sup>, lo que da como resultado estratos dentro de la clasificación de sitio D (Perfil de suelo rígido) en la clasificación de la NSE 2.1 Estudios Geotécnicos para Guatemala, con excepciones de estratos que se clasifican como C (Perfil de suelo suave).
4. El sitio presenta características apropiadas para su aprovechamiento para urbanización en todas las zonas, haciendo la salvedad de que en las laderas es necesario un análisis detallado de estabilidad de talud

dependiendo de las sobrecargas, y considerar una solución para control de erosión en el caso de no urbanizarse.

5. En el caso de las cimentaciones, si se planifica el nivel de cimentación profunda o la construcción de sótanos, es necesario realizar una prospección geofísica por medio de sondeo eléctrico vertical (SEV) e identificar el nivel freático para un análisis de susceptibilidad a licuefacción, al considerarse cercano al río Samalá ya que sus estratos presentan velocidades de onda de corte bajas.



## RECOMENDACIONES

1. Considerar las características geotécnicas del material antes planificar una urbanización en área, esto incluiría prospección geofísica para poder evaluar la altura de niveles freáticos y así también el potencial de licuefacción. Un estudio más profundo de tipo geotécnico se sugiere en caso de que se planifiquen cimentaciones profundas o la construcción de sótanos.
2. Promover la investigación a detalle de suelos piroclásticos, ya que es un campo que debe de investigarse con más frecuencia en programas de estudio de geotecnia o geología; Las propiedades mecánicas de estos materiales se perciben de forma general como buenas, sin embargo, pueden existir sitios en los que el problema de erosión, niveles freáticos y granulometría propicien la susceptibilidad a licuefacción, asentamientos o aparición de grietas en taludes y laderas.



## REFERENCIAS

1. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2017). Estudios Geotécnicos. Guatemala: Autor.
2. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2018). *Norma de Seguridad Estructural 2: Demandas Estructurales*. Guatemala: Autor.
3. ASTM International. (1999). *ASTM D1586-99 Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils*. Estados Unidos: Autor.
4. ASTM International. (2002). *ASTM D422-63 Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. Estados Unidos: Autor.
5. ASTM International. (2002). *D854-02 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. Estados Unidos: Autor.
6. ASTM International. (2003). *ASTM D2850 Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression*. Estados Unidos: Autor.
7. Batilas, A. V., Pelekis, P. C., Roussos, P. G. y Athanasopoulos, G. A. (abril, 2016). SPT Energy Measurements: Manual vs. Automatic Hammer Release. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(2), 1-9. Recuperado de

[https://www.researchgate.net/publication/311751835\\_SPT\\_Energy\\_Measurements\\_Manual\\_vs\\_Automatic\\_Hammer\\_Release](https://www.researchgate.net/publication/311751835_SPT_Energy_Measurements_Manual_vs_Automatic_Hammer_Release)

8. Bergoeing, J. (2015). *Geomorphology of Central America*. Amsterdam, Países bajos: Elsevier.
9. Bruker Corporation (2019). What is X-ray Diffraction?. Estados Unidos: Autor.
10. Cementos Progreso S.A. (2018). *Centro tecnológico: Ensayo de laboratorio*. Guatemala: Autor.
11. Collins, K. (julio, 1983). Scanning electron microscopy of engineering soils. *Geoderma*, 30, 243-252.
12. Conde, M. M. (2013). *Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad* (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid, España.
13. Crozier, M. (1986). *Landslides: Causes, Consequences and Environment, Crom Helm*. Londres: Croom Helm.
14. Das, B. M. (2014). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Mexico: Cengage Learning.
15. DeGomez, T., Kolb, P., y Kleinman, S. (2015). *Basic Soil Components. Arizona*. Estados Unidos: Universidad de Arizona. Recuperado de <https://articles.extension.org/pages/54401/basic-soil-components>

16. González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Educación. Recuperado de [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod\\_resource/content/1/Livro%202.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf)
17. Hermosilla, M., y Cardenas, J. (diciembre, 2012). Evaluación e identificación del potencial de colapso en suelos derivados de cenizas volcánicas del Sur de Chile. *Revista Ingeniería De Obras Civiles*, 2, 30-37. Recuperado a partir de <http://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/1969>
18. Hwang, J.-H., Khoshnevisan, S., Juang, C. y Lu, C.-C. (enero, 2020). Soil liquefaction potential evaluation – An update of the HBF method focusing on research and practice in Taiwan. *Engineering Geology*, 280(1), 105926.
19. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (1978). *Informe final: Estudio de aguas subterráneas en el valle de Quetzaltenango*. Guatemala: Autor.
20. Kumar, R., Bhargava, K. y Choudhury, D. (octubre, 2016). Estimation of Engineering Properties of Soils from Field SPT Using Random Number Generation. *INAE Letters*, 1, 77-84.
21. Lavina, B., Dera, P. y Downs, R. T. (enero, 2014). Modern X-ray Diffraction Methods in Mineralogy and Geosciences. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 78(1), 1-31. Recuperado de [https://www.geo.arizona.edu/xtal/group/pdf/RMG78\\_1.pdf](https://www.geo.arizona.edu/xtal/group/pdf/RMG78_1.pdf)

22. Malvern Panalytical (2020). Malvern Panalytical: Products. Estados Unidos Autor.
23. Martí, J. (1989). Materiales volcánicos y mecanismos eruptivos en los volcanes y la caldera del parque nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias). Madrid, España: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
24. Mather, T. (enero, 2013). Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. *Geochemistry*, 1(1), 1-10.
25. Montenegro, L. F. y González, A. J. (2014). *Calibración del método de parámetros de resistencia con SPT en suelos de la región llanera colombiana* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
26. Pinto, A. H. (febrero, 2018). Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry: Principles and Applications for Analysis of Mineralogical and Environmental Materials. *Aspects in Mining & Mineral Science*, 1(2), 1-6.
27. Rahimi, S., Wood, C. M. y Wotherspoon, L. M. (julio, 2020). Influence of soil aging on SPT-Vs correlation and seismic site classification. *Engineering Geology*, 272(2), 105653.
28. R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico*. Guatemala: Autor.
29. Rojas, E. (2011). *Susceptibilidad a la licuefacción por medio del sondeo de penetración estándar: Las Lisas, Chiquimulilla, Santa Rosa*,

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

30. Sana, H. (enero, 2021). Liquefaction as a seismic hazard: Scales, examples and analysis. *Elsevier*, 1, 153-163.
31. Scott, J. (2013). *The Santiaguito volcanic dome complex, Guatemala*. Reino Unido: University of Oxford UK.
32. Skempton, A. W. (septiembre, 1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Géotechnique*, 36(3), 425-447.
33. Sparks, R. y Walker, G. (enero, 1973). The Ground Surge Deposit: a Third Type of Pyroclastic Rock. *Natural Physical Science*, (241), 62-64.
34. Spera, F. J. (1999). *Physical Properties of Magma*. En H. Sigurdsson, *Encyclopedia of Volcanoes*. Estados Unidos: Academic Press.
35. Suarez, J. (1998). *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
36. Williams, S., y Self, S. (1983). The October 1902 plinian eruption of Santa Maria volcano, Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 16(1-2), 33-56.

37. Winter, J. D. (1990). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*.  
Inglaterra: Prentice-Hall Inc.

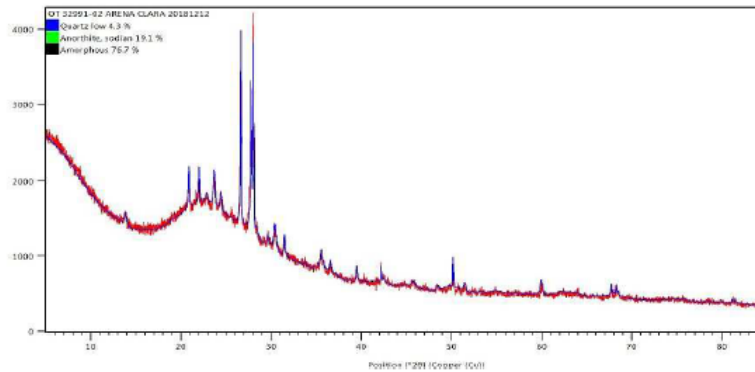


# ANEXOS

## Anexo 1. Resultados de ensayos de laboratorio difracción de rayos X (XRD), Muestra arena clara.

	CEMENTOS PROGRESO S.A. <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 <a href="mailto:atc@cementopro.com">atc@cementopro.com</a>		OT	32991
			FECHA	2018-12-05
			PÁGINA	1 de 1
			ÁREA DE LA B.	QC
Cliente	CID / CETEC	Procedencia	No indica	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	Arena Clara	
Coniaco	LUIS VELASQUEZ	Análisis(s)	JCHAJON	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	12/12/2018	

### INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO DIFRACCIÓN DE RAYOS X



Fase Mineral	Fórmula	Concentración en % p/p
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	4.30%
Anortita	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	19.10%
Material amorfo	--	76.70%
--	--	--
--	--	--
--	--	--
--	--	--

La cuantificación de las fases minerales se realizó mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con afinamiento Rietveld en un equipo Empyrean de PANalytical, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de 5° ≤ 2θ ≤ 90°, con una duración de 4 minutos por barrido.

Observaciones: Las fases minerales cuantificadas mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X son las que se encuentran disponibles en ICSD (Inorganic Crystal Structure Database).

ANALISTA: \_\_\_\_\_


AUTORIZADO POR: \_\_\_\_\_  
Jefe de laboratorio / Coordinador

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

SQL-CT-QC-IE-18/Rev. 0

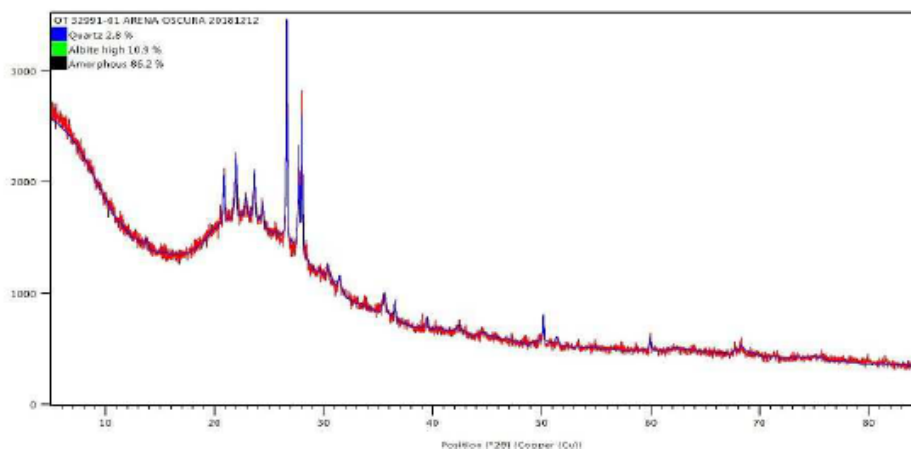
Fuente: Cementos Progreso S.A. (2018). Centro tecnológico: Ensayo de laboratorio.

## Anexo 2. Resultados de ensayos de laboratorio difracción de rayos X (XRD), Muestra arena oscura.

	CEMENTOS PROGRESO S.A. <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 <a href="mailto:ceeo@cmpro.com">ceeo@cmpro.com</a>		OT	32991
			FECHA	2018-12-05
			PÁGINA	1 de 1
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	Ci+D / CETEC	Procedencia	No indica	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	Arena Oscura	
Consejero	LUIS VELASQUEZ	Analista(s)	JCHAJON	
Teléfono	2288-4100	Fecha de Ensayo	12/12/2018	

### INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

### DIFRACCIÓN DE RAYOS X



Fase Mineral	Fórmula	Concentración en % p/p
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	2.80%
Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	10.90%
Material amorfo	--	86.20%
--	--	--
--	--	--
--	--	--
--	--	--
--	--	--

La cuantificación de las fases minerales se realizó mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con afinamiento Rietveld en un equipo Empyrean de PANalytical, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de 5° ≤ 2θ ≤ 90°, con una duración de 4 minutos por barrido.

Observaciones: Las fases minerales cuantificadas mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X son las que se encuentran disponibles en ICSD (Inorganic Crystal Structure Database).

ANALISTA: \_\_\_\_\_

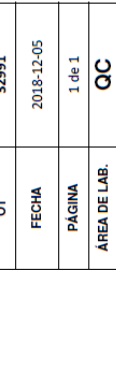
AUTORIZADO POR: \_\_\_\_\_  
Jefe de laboratorio / Coordinador

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

SQL-CT-QC-IE-18/Rev. 0

Fuente: Cementos Progreso S.A. (2018). Centro tecnológico: Ensayo de laboratorio.

Anexo 3. **Resultados de ensayos de laboratorio fluorescencia de rayos X (XRF)**

		OT	32991
		FECHA	2018-12-05
		PÁGINA	1 de 1
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CHD / CETEC	Procedencia	No Indica
Dirección / Teléfono	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA / 2286-4100	Muestra	Arena Oscura
Contacto	LUIS VELASQUEZ	Analista(s)	RPOSADAS
Proyecto	Tesis	Fecha de Ensayo	05/12/2018

**INFORME DE ENSAYO**

**ANÁLISIS QUÍMICO**

**MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X**

* COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)														
Muestra	Al2O3	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	TiO2	LOI (950 °C)	Total
1 Arena Oscura	12.47	1.32	0.11	1.62	3.65	0.00	0.08	3.59	0.00	0.00	71.48	0.19	3.61	98.12
2 Arena Clara	12.80	1.51	0.09	1.62	3.71	0.00	0.08	3.69	0.00	0.00	71.44	0.18	3.07	98.19
3														-
4														-
5														-
6														-

\* Expresada como porcentaje en masa (w/w).

Analista

Jefe de Laboratorio/Coordinador

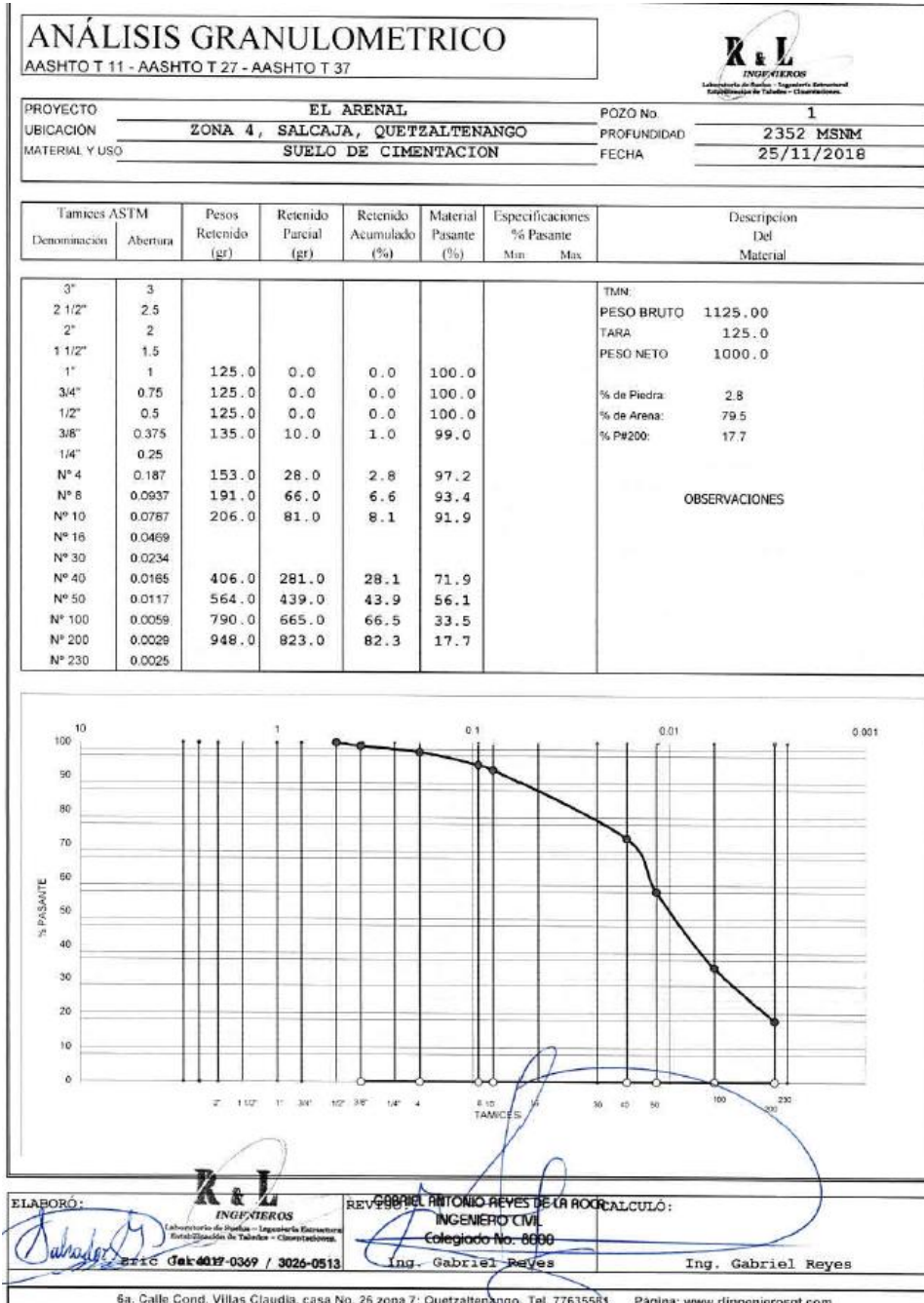
**OBSERVACIONES**

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.

SRL-CT-00-IE-02/Rv. 0

Fuente: Cementos Progreso S.A. (2018). Centro tecnológico: Ensayo de laboratorio.

## Anexo 4. Resultados de ensayo de laboratorio granulometría



Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 5. Resultados de ensayo de laboratorio de gravedad específica



### GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS DEL SUELO (ASTM D854).

Peso del suelo secado al horno =	146.8 gr
Peso del picnometro + Agua =	164.2 gr
Peso del picnometro + Agua + suelo =	218.2 gr
Gs =	1.582 gr/cm <sup>3</sup>

**R & L**  
**INGENIEROS**  
Laboratorio de Suelos - Ingeniería Estructural  
Establecimiento de Taboada - Chiriquí, Panamá.  
Tel. 4017-0369 / 3026-0513

**GABRIEL ANTONIO REYES DE LA ROCA**  
**INGENIERO CIVIL**  
Colegiado No. 8000

6ª. Calle Cond. Villas Claudia Casa No. 26, zona 7; Quetzaltenango. Tel. 77635581.  
www.rlingenierosgt.com rlingenieros1@gmail.com

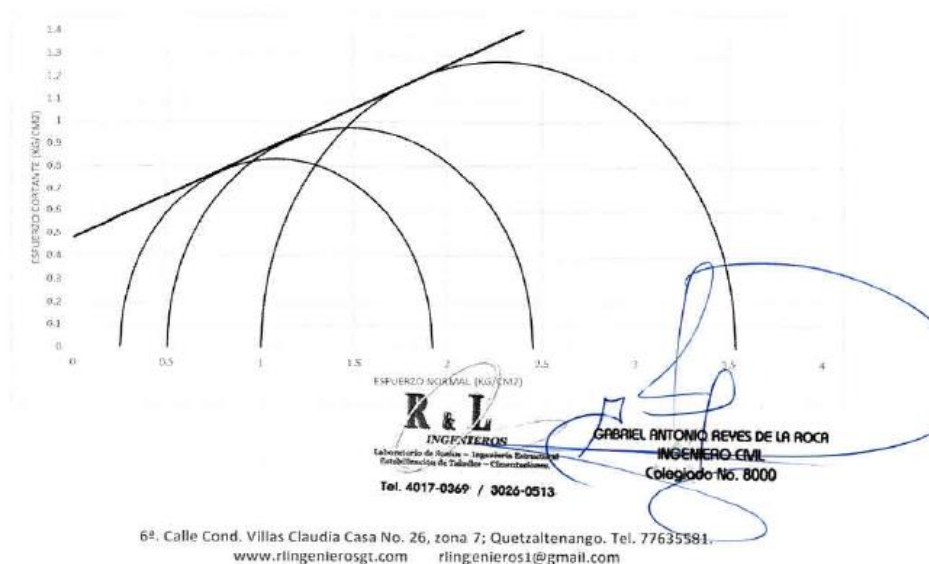
Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

Anexo 6. **Resultados de ensayo de laboratorio compresión triaxial no consolidado no drenado**



**PROYECTO:** El Arenal.  
**UBICACION:** Zona 4, Salcajá, Quetzaltenango.  
**PRUEBA:** Compresión Triaxial, ASTM D2850-70.  
**No. POZO:** P1, Muestra 1.  
**PROFUNDIDAD:** 2352 MSNM  
**FECHA:** 26/11/2018.

PARAMETROS DE CORTE:			
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 21.56^\circ$		COHESIÓN: $C_u = 0.48 \text{ Kg/cm}^2$	
TIPO DE ENSAYO:	No consolidado y no drenado.		
DESCRIPCION DEL SUELO:	Arena limosa		
DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA:	3.80 X 7.63 cm		
OBSERVACIONES:	Muestra tomada por el interesado.		
PROBETA No.	1	2	3
PRESION LATERAL (Kg/m <sup>2</sup> )	0.25	0.50	1.00
PRESION INTERSTICIAL u(Kg/m <sup>2</sup> )	x	x	x
DENSIDAD SECA (Gr/cm <sup>3</sup> )	1.97	1.97	1.97
DENSIDAD HUMEDA (Gr/cm <sup>3</sup> )	2.53	2.53	2.53
HUMEDAD (%W)	21.88	21.88	21.88



Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 7. Resultados de ensayo de laboratorio valor soporte



### CALCULO DE VALOR SOPORTE.

Datos	
Df	1.00
B	1.00
L	1.00
$\phi$	21.56
Cu	5.29
$\beta$	0
$\gamma_1$	2.17
$\gamma_2$	2.79
FS	3

Factores de Carga		
Nc	Nq	Ny
12.92	4.48	1.55

Factores de Forma		
Fcs	Fqs	Fys
1.35	1.40	0.60

Factores de Profundidad		
Fcd	Fqd	Fyd
1.38	1.32	1.00

Factores de Inclinación		
Fci	Fqi	Fyi
1.00	1.00	1.00

qu	145.75	T/m <sup>2</sup>
qa neta	48.58	T/m <sup>2</sup>
Módulo de Winkler:	8.81	Kg/cm <sup>3</sup>

Df = Profundidad de fundación de la cimentación (m).

B = Ancho cimentación (m).

L = Largo cimentación (m).

$\phi$  = Angulo de fricción interna (°)

Cu = Cohesión (Ton/m<sup>2</sup>).

$\beta$  = Angulo inclinación cimentación

$\gamma_1$  = Peso específico seco (Ton/m<sup>3</sup>).

$\gamma_2$  = Peso específico material humedo (Ton/m<sup>3</sup>).

FS = Factor de seguridad

qa neta = Valor soporte del suelo

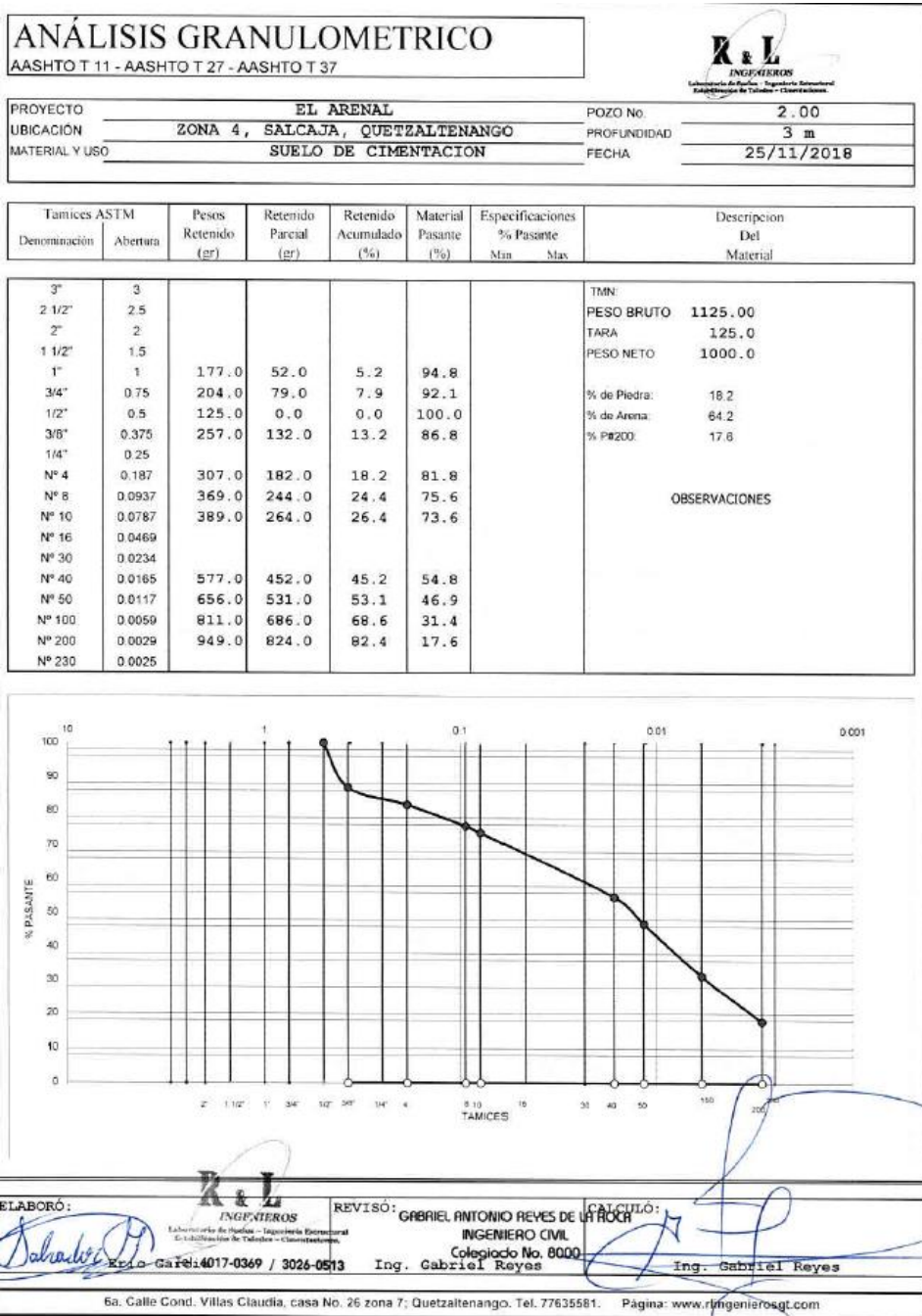
  
**GABRIEL ANTONIO REYES DE LA ROCA**  
 INGENIERO CIVIL  
 Colegiado No. 8000  
 R & L INGENIEROS  
 Laboratorio de Suelos - Ingeniería Geotécnica  
 Estabilización de Tierras - Construcción  
 Tel. 4017-0369 / 3026-0513

6ª. Calle Cond. Villas Claudia Casa No. 26, zona 7; Quetzaltenango. Tel. 77635581.

Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*



## Anexo 8. Resultados de ensayo de laboratorio granulometría



Fuente: R&L Ingenieros (2018). Análisis granulométrico.



## Anexo 9. Resultados de ensayo de laboratorio de gravedad específica



### GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS DEL SUELO (ASTM D854).

Peso del suelo secado al horno =	155 gr
Peso del picnómetro + Agua =	192.6 gr
Peso del picnómetro + Agua + suelo =	251.4 gr
Gs =	1.611 gr/cm <sup>3</sup>



**R & L**  
INGENIEROS  
Laboratorio de Suelos - Ingeniería Estructural  
Estabilización de Taludes - Construcciones  
Tel. 4017-0369 / 3026-0513

**GABRIEL ANTONIO REYES DE LA ROCA**  
INGENIERO CIVIL  
Colegiado No. 8000

6ª. Calle Cond. Villas Claudia Casa No. 26, zona 7; Quetzaltenango. Tel. 77635581.  
www.rlingenierosgt.com rlingenieros1@gmail.com

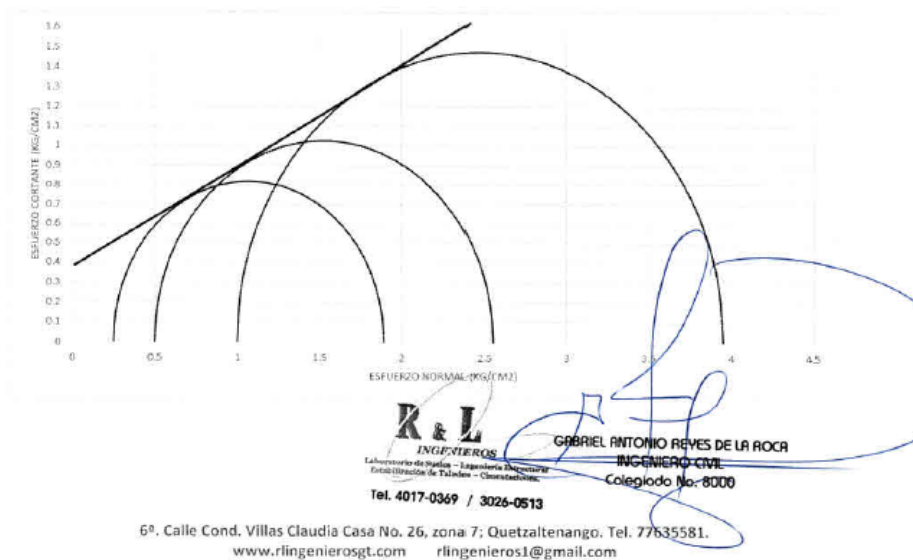
Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 10. Resultados de ensayo de laboratorio compresión triaxial no consolidado no drenado



**PROYECTO:** El Arenal.  
**UBICACION:** Zona 4, Salcajá, Quetzaltenango.  
**PRUEBA:** Compresión Triaxial, ASTM D2850-70.  
**No. POZO:** P2  
**PROFUNDIDAD:** 3.00 m  
**FECHA:** 26/11/2018.

<b>PARAMETROS DE CORTE:</b>			
<b>ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : <math>\phi = 20.06^\circ</math></b>		<b>COHESIÓN: <math>C_u = 0.39 \text{ Kg/cm}^2</math></b>	
TIPO DE ENSAYO:	No consolidado y no drenado.		
DESCRIPCION DEL SUELO:	Arena limosa		
DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA:	3.80 X 7.63 cm		
OBSERVACIONES:	Muestra tomada por el interesado.		
PROBETA No.	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
PRESION LATERAL (Kg/m <sup>2</sup> )	0.25	0.50	1.00
PRESION INTERSTICIAL u(Kg/m <sup>2</sup> )	x	x	x
DENSIDAD SECA (Gr/cm <sup>3</sup> )	1.57	1.57	1.57
DENSIDAD HUMEDA (Gr/cm <sup>3</sup> )	1.88	1.88	1.88
HUMEDAD (%W)	20.06	20.06	20.06



Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 11. Resultados de ensayo de laboratorio valor soporte



### CALCULO DE VALOR SOPORTE.

Datos	
Df	1.00
B	1.00
L	1.00
$\phi$	27.89
Cu	4.30
$\beta$	0
$\gamma_1$	1.73
$\gamma_2$	2.07
FS	3

Factores de Carga		
Nc	Nq	Ny
17.13	7.07	3.29

Factores de Forma		
Fcs	Fqs	Fys
1.41	1.53	0.60

Factores de Profundidad		
Fcd	Fqd	Fyd
1.33	1.30	1.00

Factores de Inclinación		
Fci	Fqi	Fyi
1.00	1.00	1.00

<b>qu</b>	164.70	T/m <sup>2</sup>
<b>qa neta</b>	54.90	T/m <sup>2</sup>
<b>Módulo de Winkler:</b>	9.96	Kg/cm <sup>3</sup>

Df = Profundidad de fundación de la cimentación (m).

B = Ancho cimentación (m).

L = Largo cimentación (m).

$\phi$  = Angulo de fricción interna (°)

Cu = Cohesión (Ton/m<sup>2</sup>).

$\beta$  = Angulo inclinación cimentación

$\gamma_1$  = Peso específico seco (Ton/m<sup>3</sup>).

$\gamma_2$  = Peso específico material humedo (Ton/m<sup>3</sup>).

FS = Factor de seguridad

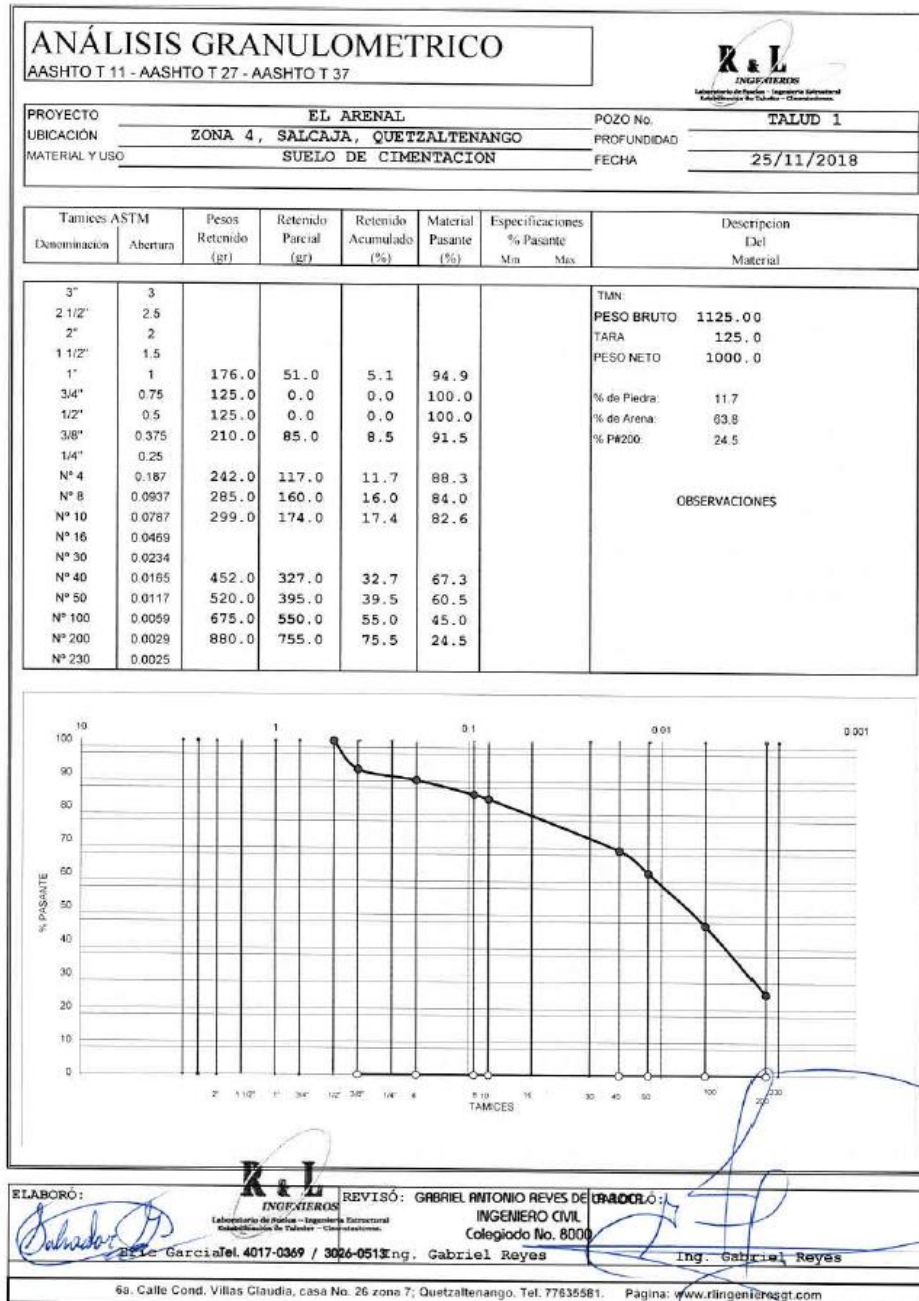
qa neta = Valor soporte del suelo

  
**R & L**  
 INGENIEROS  
 Laboratorio de Estudios - Ingeniería Estructural  
 Edificación de Talleres - Climatización  
**GABRIEL ANTONIO REYES DE LA ROCA**  
 INGENIERO CIVIL  
 Colegiado No. 8000  
 Tel. 4017-0369 / 3026-0513

6ª. Calle Cond. Villas Claudia Casa No. 26, zona 7; Quetzaltenango. Tel. 77635581.  
 www.rlingenierosg.com rlingenieros1@gmail.com

Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 12. Resultados de ensayo de laboratorio granulometría



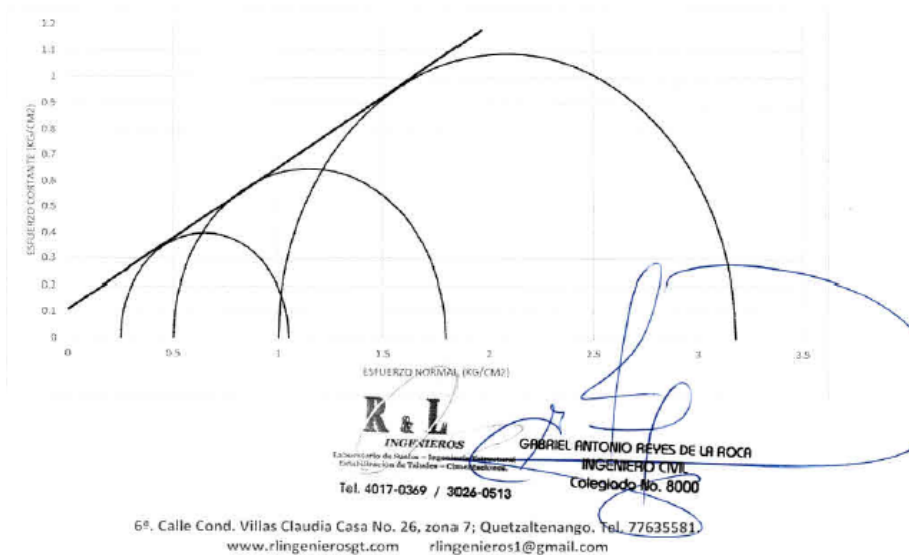
Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 13. Resultados de ensayo de laboratorio Compresión triaxial no consolidado no drenado.



**PROYECTO:** El Arenal.  
**UBICACION:** Zona 4, Salcajá, Quetzaltenango.  
**PRUEBA:** Compresión Triaxial, ASTM D2850-70.  
**No. POZO:** Talud 1.  
**PROFUNDIDAD:** 2361 MSNM  
**FECHA:** 26/11/2018.

<b>PARAMETROS DE CORTE:</b>			
<b>ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : <math>\phi = 28.61^\circ</math></b>		<b>COHESIÓN: <math>C_u = 0.11 \text{ Kg/cm}^2</math></b>	
<b>TIPO DE ENSAYO:</b>	No consolidado y no drenado.		
<b>DESCRIPCION DEL SUELO:</b>	Arena limosa		
<b>DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA:</b>	3.80 X 7.90 cm		
<b>OBSERVACIONES:</b>	Muestra tomada por el interesado.		
<b>PROBETA No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>PRESION LATERAL (Kg/m<sup>2</sup>)</b>	0.25	0.50	1.00
<b>PRESION INTERSTICIAL u(Kg/m<sup>2</sup>)</b>	x	x	x
<b>DENSIDAD SECA (Gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.49	1.49	1.49
<b>DENSIDAD HUMEDA (Gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.74	1.74	1.74
<b>HUMEDAD (%W)</b>	21.45	21.45	21.45



Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 14. Resultados de ensayo de laboratorio de valor soporte.



### CALCULO DE VALOR SOPORTE.

Datos	
Df	1.00
B	1.00
L	1.00
$\phi$	28.61
Cu	1.21
$\beta$	0
$\gamma_1$	1.64
$\gamma_2$	1.92
FS	3

Factores de Carga		
Nc	Nq	N $\gamma$
18.03	7.66	3.76

Factores de Forma		
Fcs	Fqs	F $\gamma_s$
1.42	1.55	0.60

Factores de Profundidad		
Fcd	Fqd	F $\gamma_d$
1.33	1.30	1.00

Factores de Inclinación		
Fci	Fqi	F $\gamma_i$
1.00	1.00	1.00

qu	68.37	T/m <sup>2</sup>
qa neta	22.79	T/m <sup>2</sup>
Módulo de Winkler:	4.14	Kg/cm <sup>3</sup>

Df = Profundidad de fundación de la cimentación (m).  
 B = Ancho cimentación (m).  
 L = Largo cimentación (m).  
 $\phi$  = Angulo de fricción interna (°)  
 Cu = Cohesión (Ton/m<sup>2</sup>).  
 $\beta$  = Angulo inclinación cimentación  
 $\gamma_1$  = Peso específico seco (Ton/m<sup>3</sup>).  
 $\gamma_2$  = Peso específico material humedo (Ton/m<sup>3</sup>).  
 FS = Factor de seguridad  
 qa neta = Valor soporte del suelo



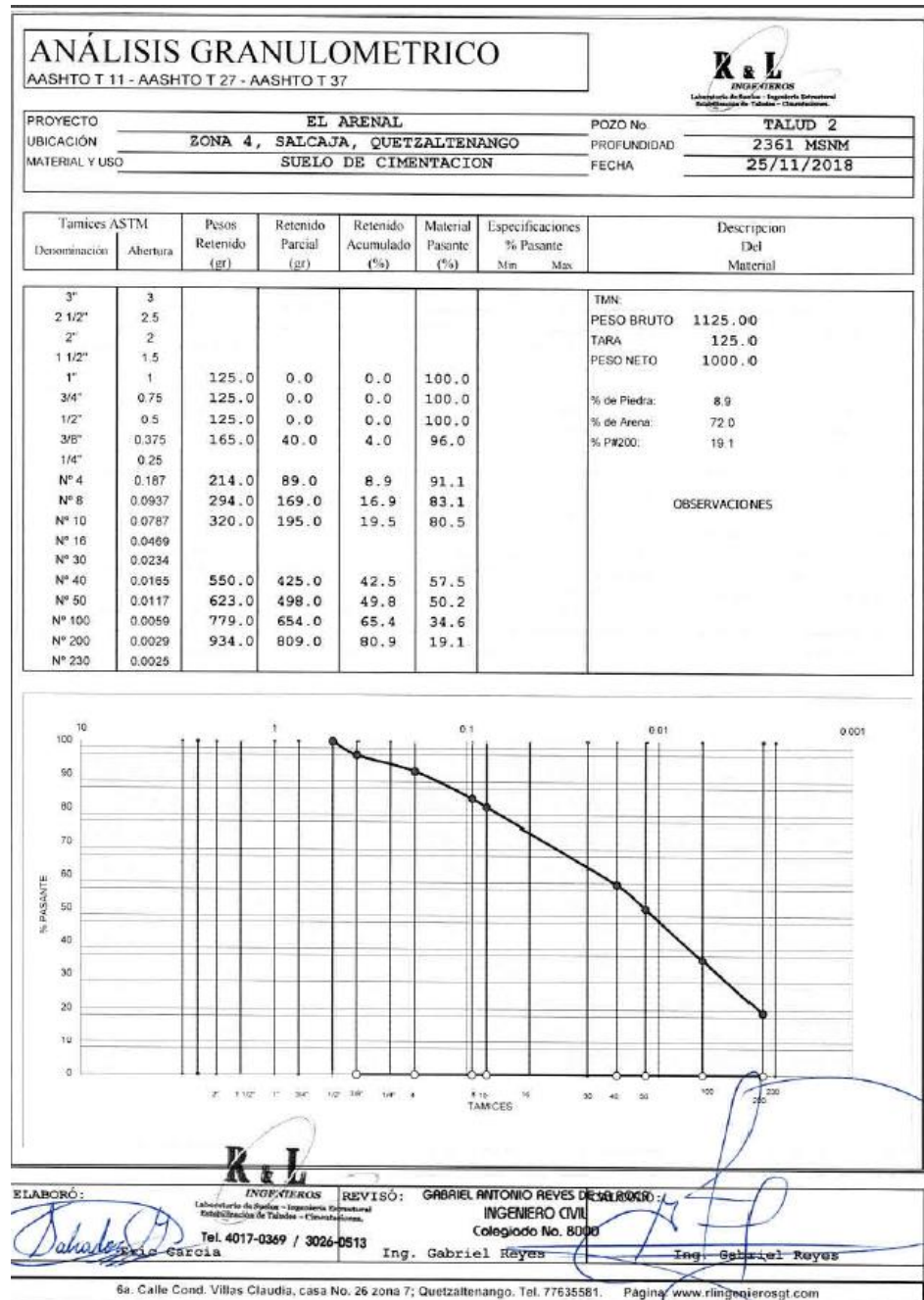
GABRIEL ANTONIO REYES DE LA ROCA  
 INGENIERO CIVIL  
 Colegiado No. 8000

6<sup>a</sup>. Calle Cond. Villas Claudia Casa No. 26, zona 7; Quetzaltenango. Tel. 77635581.  
 www.ringenierosgt.com rlingenieros1@gmail.com

Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*



## Anexo 15. Resultados de ensayo de laboratorio granulometría




Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 16. Resultados de ensayo de laboratorio de gravedad específica



### GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS DEL SUELO (ASTM D854).

Peso del suelo secado al horno =	155.9 gr
Peso del picnómetro + Agua =	163.7 gr
Peso del picnómetro + Agua + suelo =	219 gr
Gs =	1.550 gr/cm <sup>3</sup>



**R & L**  
INGENIEROS  
Laboratorio de Suelos - Ingeniería Estructural  
Estabilización de Taludes - Obras de Obras.  
Tel. 4017-0369 / 3026-0513

**GABRIEL ANTONIO REYES DE LA ROCA**  
INGENIERO CIVIL  
Colegiado No. 8000

6ª. Calle Cond. Villas Claudia Casa No. 26, zona 7; Quetzaltenango. Tel. 77635581.  
www.rlingenierosgt.com rlingenieros1@gmail.com

Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

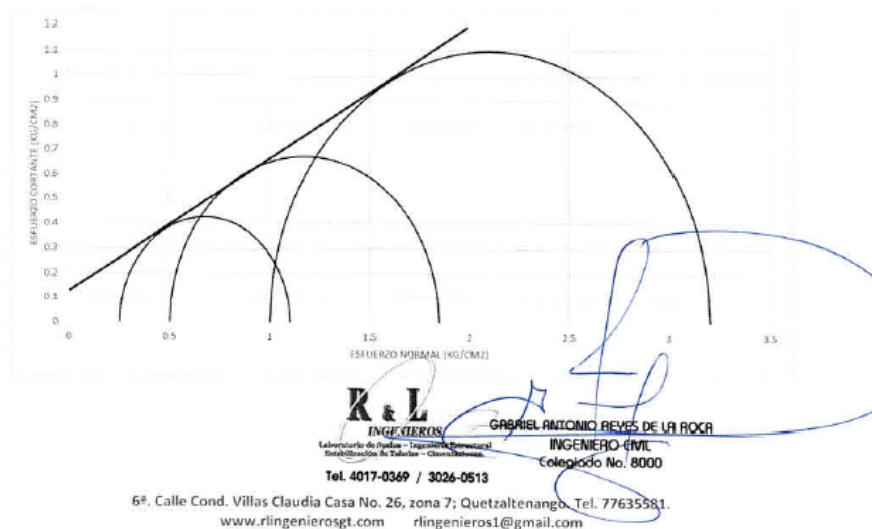


## Anexo 17. Resultados de ensayo de laboratorio Compresión triaxial no consolidado no drenado



**PROYECTO:** El Arenal.  
**UBICACION:** Zona 4, Salcajá, Quetzaltenango.  
**PRUEBA:** Compresión Triaxial, ASTM D2850-70.  
**No. POZO:** Talud 2.  
**PROFUNDIDAD:** 2369 MSNM  
**FECHA:** 26/11/2018.

<b>PARAMETROS DE CORTE:</b>			
<b>ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : <math>\phi = 28.89^\circ</math></b>		<b>COHESIÓN: <math>C_u = 0.14 \text{ Kg/cm}^2</math></b>	
TIPO DE ENSAYO:	No consolidado y no drenado.		
DESCRIPCION DEL SUELO:	Arena limosa		
DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA:	3.85 X 8.05 cm		
OBSERVACIONES:	Muestra tomada por el interesado.		
PROBETA No.	1	2	3
PRESION LATERAL (Kg/m <sup>2</sup> )	0.25	0.50	1.00
PRESION INTERSTICIAL u(Kg/m <sup>2</sup> )	x	x	x
DENSIDAD SECA (Gr/cm <sup>3</sup> )	1.52	1.52	1.52
DENSIDAD HUMEDA (Gr/cm <sup>3</sup> )	1.87	1.87	1.87
HUMEDAD (%W)	20.64	20.64	20.64



Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 18. Resultados de ensayo de laboratorio valor soporte



### CALCULO DE VALOR SOPORTE.

Datos	
Df	1.00
B	1.00
L	1.00
$\phi$	28.89
Cu	1.54
$\beta$	0
$\gamma_1$	1.68
$\gamma_2$	2.06
FS	3

Factores de Carga		
Nc	Nq	Ny
18.03	7.66	3.76

Factores de Forma		
Fcs	Fqs	Fys
1.42	1.55	0.60

Factores de Profundidad		
Fcd	Fqd	Fyd
1.32	1.29	1.00

Factores de Inclinación		
Fci	Fqi	Fyi
1.00	1.00	1.00

qu	80.19	T/m <sup>2</sup>
qa neta	26.73	T/m <sup>2</sup>
Módulo de Winkler:	4.85	Kg/cm <sup>3</sup>

Df = Profundidad de fundación de la cimentación (m).

B = Ancho cimentación (m).

L = Largo cimentación (m).

$\phi$  = Angulo de fricción interna (°)

Cu = Cohesión (Ton/m<sup>2</sup>).

$\beta$  = Angulo inclinación cimentación

$\gamma_1$  = Peso específico seco (Ton/m<sup>3</sup>).

$\gamma_2$  = Peso específico material húmedo (Ton/m<sup>3</sup>).

FS = Factor de seguridad

qa neta = Valor soporte del suelo

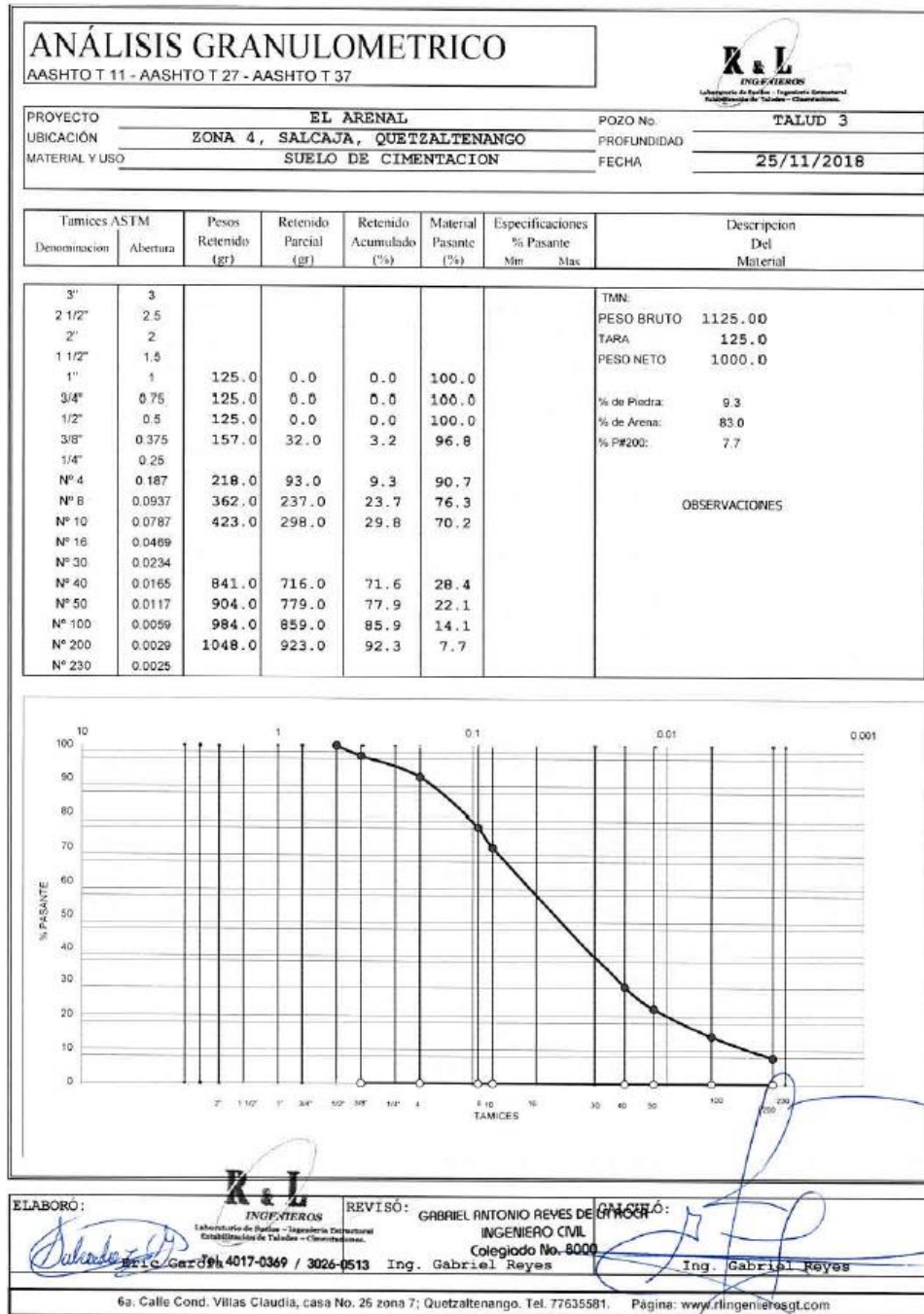


GABRIEL ANTONIO REYES DE LA ROCA  
INGENIERO CIVIL  
Colegiado No. 8000

6ª. Calle Cond. Villas Claudia Casa No. 26, zona 7; Quetzaltenango. Tel. 77635581.  
www.rlingenierosgt.com rlingenieros1@gmail.com

Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 19. Resultados de ensayo de laboratorio granulometría



Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 20. Resultados de ensayo de laboratorio de gravedad específica.



### GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS DEL SUELO (ASTM D854).

#### TALUD 3.

Peso del suelo secado al horno =	161 gr
Peso del picnómetro + Agua =	166.7 gr
Peso del picnómetro + Agua + suelo =	227.3 gr
Gs =	1.604 gr/cm <sup>3</sup>



**R & L**  
INGENIEROS  
Laboratorio de Suelos - Ingeniería Estructural  
Estabilización de Taludes - Obras de Obras.  
Tel. 4017-0369 / 3026-0513

GABRIEL ANTONIO REYES DE LA ROCHA  
INGENIERO CIVIL  
Colegiado No. 8000

6ª. Calle Cond. Villas Claudia Casa No. 26, zona 7; Quetzaltenango. Tel. 77635581.  
www.rlingeniosgt.com rlingenios1@gmail.com

Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

Anexo 21. **Fotografías muestras para ensayos de laboratorio**

**EL ARENAL ZONA 4 SALCAJA**

**POZO No. 1 2352 SNM.**

**FORMACION DE CILINDROS.**



**ENSAYO TRIAXIAL.**



**GRANULOMETRIA.**



Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

## Anexo 22. Fotografías muestras para ensayos de laboratorio

### EL ARENAL ZONA 4 SALCAJA

#### POZO No. 2

#### FORMACION DE CILINDROS.



#### ENSAYO TRIAXIAL.



#### GRANULOMETRIA.



Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*

Anexo 23. Fotografías muestras para ensayos de laboratorio

EL ARENAL ZONA 4 SALCAJA

TALUD No. 1

FORMACION DE CILINDROS.



ENSAYO TRIAXIAL.



GRANULOMETRIA.



Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*



Anexo 24. **Fotografías muestras para ensayos de laboratorio**

**EL ARENAL ZONA 4 SALCAJA**

**TALUD No. 2**

**FORMACION DE CILINDROS.**



**ENSAYO TRIAXIAL.**



**GRANULOMETRIA.**



**R & L**  
**INGENIEROS**  
Laboratorio de ensayos - Ingeniería Estructural  
Catastrificación de Taludes - Climatización  
Tel. 4017-0349 / 3026-0513

Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*



Anexo 25. **Fotografías muestras para ensayos de laboratorio**

**EL ARENAL ZONA 4 SALCAJA**

**TALUD No. 3**



**ARENA**

**GRANULOMETRIA.**



**R & L**  
**INGENIEROS**  
Laboratorio de Materiales - Ingeniería Estructural  
Especialización en Taludes - Construcciones.  
Tel. 4017-0369 / 3026-0513

Fuente: R&L Ingenieros (2018). *Análisis granulométrico.*