



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**ENSAYOS TRIAXIALES PARA SUELOS DE GRANOS FINOS EN  
DIFERENTES ESTADOS DE HUMEDAD**

**Sarah Michelle Iowa Cabrera Aguilar**

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ENSAYOS TRIAXIALES PARA SUELOS DE GRANOS FINOS EN  
DIFERENTES ESTADOS DE HUMEDAD**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**SARAH MICHELLE IOWA CABRERA AGUILAR**

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MENDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2023

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 Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **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:

### **ENSAYOS TRIAXIALES PARA SUELOS DE GRANOS FINOS EN DIFERENTES ESTADOS DE HUMEDAD**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha de noviembre de 2017.

**Sarah Michelle Iowa Cabrera Aguilar**

Guatemala, 04 de abril de 2022

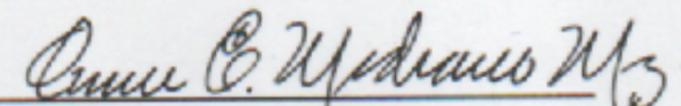
Ingeniero  
Hugo Montenegro  
Jefe del Área de Materiales de Construcción  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Estimado Ingeniero Montenegro:

Cumpliendo con lo resuelto con la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió a la asesoría y revisión del trabajo de graduación: **ENSAYOS TRIAXIALES PARA SUELOS DE GRANOS FINOS EN DIFERENTES ESTADOS DE HUMEDAD**, presentado por la estudiante Sarah Michelle Iowa Cabrera Aguilar, quien se identifica con número de CUI 2344 85477 0101 y registro académico 201222561.

Considero que el trabajo de graduación se ha desarrollado satisfactoriamente y cumple con los objetivos que motivaron la selección de dicho tema, por lo que hago de su conocimiento que apruebo el trabajo realizado. Sin otro particular, atentamente

Omar Enrique Medrano Méndez  
Ingeniero Civil  
Colegiado No. 6842



Omar Enrique Medrano Méndez  
Ingeniero Civil  
Colegiado No. 6842

Guatemala, 15 de julio de 2,022

Ingeniero  
Armando Fuentes Roca  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes, Le informo que he revisado el trabajo de graduación **“ENSAYOS TRIAXIALES PARA SUELOS DE GRANOS FINOS EN DIFERENTES ESTADOS DE HUMEDAD”**, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil, Sarah Michelle Iowa Cabrera Aguilar, quién contó con la asesoría del Ing. Omar Enrique Medrano Méndez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo, doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Civil Hugo Leonel Montenegro Franco  
**Jefe de área de materiales y construcciones civiles.**



LNG.DIRECTOR.017.EIC.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **ENSAYOS TRIAXIALES PARA SUELOS DE GRANOS FINOS EN DIFERENTES ESTADOS DE HUMEDAD**, presentado por: **Sarah Michelle Iowa Cabrera Aguilar**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Armando Fuentes Roca  
Director  
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, enero de 2023



LNG.DECANATO.OI.103.2023

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 Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ENSAYOS TRIAXIALES PARA SUELOS DE GRANOS FINOS EN DIFERENTES ESTADOS DE HUMEDAD**, presentado por: **Sarah Michelle Iowa Cabrera Aguilar**, 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 2023

AACE/gaac

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser mí guía, mi luz y mi fuente de sabiduría a lo largo de todos mis estudios.
<b>Mis padres</b>	Erickson Cabrera (q. e. p. d.) y Jeaqueline Aguilar, su amor será siempre mi inspiración.
<b>Mi esposo</b>	Freddy Fernández, por su comprensión y apoyo.
<b>Mis hijos</b>	Sophia y Sebastian Fernández, por ser la luz de mi vida.
<b>Mi tía</b>	Edna Aguilar (q. e. p. d.), por estar siempre a mi lado brindándome su apoyo.
<b>Mis hermanos</b>	Shanon, Erickson y Scarlett Cabrera, por ser una parte fundamental en mi carrera.
<b>Mis abuelos</b>	Ana María de León (q. e. p. d.), Rafael Aguilar (q. e. p. d.), Mauro Cabrera (q. e. p. d.), y Elizabeth Marroquín. Por estar siempre conmigo.
<b>Mis cuñados</b>	Por sus palabras de ánimo y todo el apoyo brindado.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme todos los conocimientos.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Omar Medrano, por su apoyo y asesoría en este trabajo de graduación.
<b>Mis profesores</b>	Por todo su esfuerzo en transmitir sus conocimientos, y en especial al Ing. Corzo por su peculiar motivación en sus cursos.
<b>Mis amigos</b>	Por ser siempre un apoyo y compartir momentos de angustia y alegría.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1.    Reseña histórica del cambio y la variabilidad climática en Guatemala.....	1
1.2.    Reseña histórica de la Mecánica de Suelos.....	6
2. EL CAMBIO CLIMÁTICO .....	9
2.1.    Conceptos básicos .....	9
2.1.1.    Tiempo .....	9
2.1.2.    Efecto invernadero .....	10
2.1.3.    Calentamiento global.....	13
2.2.    Variabilidad climática.....	17
2.2.1.    Escalas de variabilidad.....	17
2.2.1.1.    Escala intraestacional .....	17
2.2.1.2.    Escala Interanual .....	18
2.2.1.3.    Escala Interdecadal.....	19
2.2.2.    Variabilidad climática en Guatemala .....	19
2.2.3.    Clasificación climática en Guatemala.....	21
2.2.4.    Regiones climáticas de Guatemala .....	26

3.	EL SUELO Y LA HUMEDAD .....	31
3.1.	Geología del suelo en Guatemala.....	31
3.2.	La infiltración en el suelo .....	35
3.3.	Movimiento del agua en el suelo.....	36
3.4.	Conductividad hidráulica .....	37
3.5.	Humedad por capilaridad.....	38
3.6.	Humedad según su profundidad .....	41
3.7.	Medición de humedad en el suelo .....	43
3.8.	Sondas de resistencia eléctrica .....	43
3.9.	Sonda de neutrones.....	45
3.10.	Reflectómetro de ondas electromagnéticas .....	46
3.10.1.	Reflectancia en el dominio del tiempo .....	46
3.10.2.	Reflectancia en el dominio de frecuencia .....	47
3.11.	Método tensiómetro .....	48
3.12.	La succión en el suelo .....	49
3.13.	Relación succión y humedad .....	53
3.14.	Densidad del suelo .....	55
3.15.	Densidad real.....	56
3.16.	Densidad aparente.....	57
4.	ENSAYOS TRIAXIALES .....	59
4.1.	Ensayo triaxial No consolidado – No drenado (UU).....	59
4.2.	Ensayo triaxial Consolidado – Drenado (CD) .....	60
4.3.	Ensayo triaxial Consolidado – No drenado (CU).....	65
5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	71
5.1.	Equipo de ensayos triaxiales .....	71
5.2.	Materiales para ensayos triaxiales.....	78
5.3.	Datos obtenidos de ensayos triaxiales.....	80

5.4.	Resultados obtenidos de ensayos triaxiales .....	92
5.5.	Comparación y análisis de resultados obtenidos según ensayos.....	102
CONCLUSIONES .....		105
RECOMENDACIONES.....		107
BIBLIOGRAFÍA.....		109
APÉNDICES .....		115
ANEXOS .....		125



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Movimiento de los vientos .....	2
2.	Incidencia de pobreza .....	4
3.	Cambios en el uso del suelo y deforestación .....	5
4.	Efecto invernadero natural .....	11
5.	Emisión de GEI anuales global, 1970-2010 .....	12
6.	Emisión de CO2 en América Latina, 2007 .....	13
7.	Concentraciones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso .....	14
8.	Temperatura media en la superficie (1986-2005 a 2081-2100) .....	16
9.	Temperatura media en Centroamérica, 1950 a 2000.....	16
10.	Condiciones de los fenómenos El Niño y la Niña.....	19
11.	Frecuencia promedio de frentes fríos por mes.....	21
12.	Clasificación de zonas climáticas en Guatemala según el sistema de Thornthwaite .....	23
13.	Clasificación de zonas climáticas en Guatemala según el sistema de Koppen.....	25
14.	Regiones climáticas de Guatemala.....	27
15.	Clasificación taxonómica de los suelos en Guatemala.....	34
16.	Curvas de infiltración según textura .....	35
17.	Curvas de infiltración según textura .....	38
18.	Comportamiento de la capilaridad en suelos .....	39
19.	Contracción en suelos de granos finos .....	40
20.	Contracción en suelos de granos finos .....	42
21.	Diagrama de bloques de resistencia eléctrica.....	44

22.	Sonda de neutrones.....	46
23.	Diagrama de un tensiómetro.....	49
24.	Efecto de capilaridad .....	50
25.	Efecto de difusión de sales .....	52
26.	Efecto de la fuerza gravitacional.....	53
27.	Curva característica de la succión del suelo.....	54
28.	Curva característica de la succión para diferentes tipos de suelo .....	55
29.	Cámara de compresión triaxial .....	71
30.	Indicador de deformación .....	72
31.	Dispositivo de presión y medición de vacíos .....	72
32.	Tanque Desaireador de agua .....	73
33.	Membrana de látex .....	73
34.	Papel filtro.....	74
35.	Disco poroso.....	74
36.	Aros de goma para sellar.....	75
37.	Dispositivo de medición de poro .....	75
38.	Compresor de aire .....	76
39.	Bomba de vacíos .....	76
40.	Tapa y base de la muestra .....	77
41.	Equipo para tallar la muestra .....	77
42.	FSuelo 1 .....	78
43.	Suelo 2.....	79
44.	Suelo 3.....	80
45.	Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 1 (suelo 1).....	93
46.	Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 2 (suelo 1).....	94
47.	Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 3 (suelo 1).....	95

48.	Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 1 (suelo 2) .....	96
49.	Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 2 (suelo 2) .....	97
50.	Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 3 (suelo 2) .....	98
51.	Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 1 (suelo 3) .....	99
52.	Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 2 (suelo 3) .....	100
53.	Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 3 (suelo 3) .....	101

## TABLAS

I.	Límites de separación de suelos .....	7
II.	Instrumentos meteorológicos .....	10
III.	Clasificación de zonas climáticas en Guatemala según el sistema de Thornthwaite .....	22
IV.	Clasificación de zonas climáticas en Guatemala según el sistema de Koppen .....	24
V.	Clasificación de órdenes de suelos en Guatemala.....	33
VI.	Densidad real en diferentes suelos .....	56
VII.	Densidad aparente en diferentes suelos .....	57
VIII.	Datos de humedad de la muestra 1 (suelo 1) .....	80
IX.	Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 1).....	81
X.	Datos de humedad de la muestra 2 (suelo 1) .....	81
XI.	Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 1).....	82
XII.	Datos de humedad de la muestra 2 (suelo 1) .....	83

XIII.	Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 3 (suelo 1) .....	83
XIV.	Datos de humedad de la muestra 1 (suelo 2) .....	84
XV.	Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 2) .....	84
XVI.	Datos de humedad de la muestra 2 (suelo 2) .....	85
XVII.	Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 2) .....	85
XVIII.	Datos de humedad de la muestra 3 (suelo 2) .....	86
XIX.	Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 3 (suelo 2) .....	86
XX.	Datos de humedad de la muestra 1 (suelo 3) .....	87
XXI.	Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 3) .....	87
XXII.	Datos de humedad de la muestra 2 (suelo 3) .....	88
XXIII.	Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 3) .....	88
XXIV.	Datos de humedad de la muestra 3 (suelo 3) .....	89
XXV.	Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 3 (suelo 3) .....	90
XXVI.	Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 1) .....	93
XXVII.	Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 1) .....	94
XXVIII.	Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 1) .....	96
XXIX.	Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 2) .....	97
XXX.	Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 2) .....	98
XXXI.	Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 3 (suelo 2) .....	99
XXXII.	Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 3) .....	100
XXXIII.	Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 3) .....	101

XXXIV.	Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 3 (suelo 3) .....	102
XXXV.	Resultados de ensayos realizados.....	103



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$e$	Relación de vacíos del suelo
$\psi_m$	Succión matricial
$\pi$	Succión osmótica
$\psi_T$	Succión total
$\eta$	Viscosidad del fluido
$V_s$	Volumen ocupado
$V_t$	Volumen total ocupado



## GLOSARIO

<b>Bioma</b>	Unidad ecológica que se extiende por una superficie de gran amplitud que presenta iguales condiciones.
<b>Capacidad de campo</b>	Cantidad de agua que el suelo puede retener en contra del efecto de la gravedad.
<b>Ciclón</b>	Viento intenso que gira en grandes círculos acompañado de tormenta.
<b>Cohesión</b>	Acción y efecto de adherirse.
<b>Cóncava</b>	Superficie más deprimida en el centro, respecto del punto desde el que se observa.
<b>Conductividad</b>	Magnitud característica de cada cuerpo.
<b>Ecosistema</b>	Comunidad de seres vivos, cuyos procesos vitales se relación entre si y en un mismo ambiente.
<b>Esfuerzo</b>	Fuerza que al actuar sobre otro cuerpo tiende a deformarlo.
<b>Estepa</b>	Ecosistema semiárido, formada por terrenos planos y escasa vegetación.

<b>Evaporación</b>	Proceso físico lento de un estado líquido a un estado gaseoso.
<b>Fluctuaciones</b>	Variación de medida o de cualidad.
<b>Heterogéneo</b>	Compuesto de parte de distinta naturaleza.
<b>Higrometría</b>	Estudio de las causas y variaciones de la humedad atmosférica.
<b>Intersticio</b>	Espacio pequeño entre dos partes de un mismo cuerpo.
<b>Isotrópico</b>	Cuerpo que posee las mismas propiedades en todas sus direcciones.
<b>Lítica</b>	Relativo a la piedra.
<b>Lixiviación</b>	Proceso de arrastre por la lluvia de sustancias solubles de un suelo hacia capas más profundas.
<b>Parámetro</b>	Dato que se considera fijo en un estudio.
<b>Pastizal</b>	Campo con pastos.
<b>Permeabilidad</b>	Que puede ser traspasado por un líquido.
<b>Pistón</b>	Instrumento pesado con el cual se golpea el suelo.

<b>Polarizar</b>	Hacer que las posiciones se hagan extremas.
<b>Porosidad</b>	Espacio hueco en las moléculas de los cuerpos.
<b>Precipitación</b>	Cantidad total de agua que cae de la atmósfera.
<b>Radiación</b>	Energía que se libera en forma de ondas electromagnéticas.
<b>Saturación</b>	Resultado de haber llenado un cuerpo hasta su máxima capacidad.
<b>Sequia</b>	Falta de lluvia.
<b>Talud</b>	Inclinación del parámetro de un muro o de un terreno.



## RESUMEN

El presente trabajo contiene conceptos necesarios para que toda persona interesada tenga un amplio conocimiento de cómo los suelos de granos finos en diferentes estados de humedad varían sus parámetros de corte y esfuerzos con ensayos triaxiales no consolidados y no drenados.

En el primer capítulo, se expone los antecedentes históricos del cambio y la variabilidad climática en Guatemala, así como los suelos de granos finos.

En el segundo capítulo, se describen conceptos del cambio climático tales como tiempo, efecto invernadero y calentamiento global; y generalidades sobre variabilidad climática en Guatemala, fenómenos que se presentan y las tendencias de clima según la región.

El tercer capítulo, describe conceptos del suelo como su densidad, los movimientos que el agua efectúa en ellos y la relación con la succión; también se describen características tales como la capilaridad y profundidad de la humedad, y tipos de medición.

El cuarto capítulo, muestra el procedimiento de los tres tipos de ensayos triaxiales a los cuales se puede someter un suelo.

El quinto capítulo, se refiere al desarrollo experimental en este se explica el equipo y material utilizado en los ensayos, tablas de datos con base en los resultados y el análisis correspondiente a los suelos.



# OBJETIVOS

## General

Determinar la capacidad de soporte del suelo para tres diferentes estados de humedad.

## Específicos

1. Establecer el grado de humedad adecuado para la capacidad de soporte del suelo.
2. Proporcionar información sobre el cambio y la variabilidad climática en Guatemala.
3. Presentar algoritmo que permita obtener resultados para una mejor toma de decisión.



## INTRODUCCIÓN

El suelo de grano fino esta difícilmente en equilibrio debido al cambio y variabilidad climática, porque continuamente sufre de alteraciones en sus características físicas y propiedades mecánicas como expansión y contracción, variaciones térmicas, entre otras. Este tipo de alteraciones se debe principalmente al contenido de humedad.

Se han presentado en la actualidad diversos fenómenos debido al exceso de agua en el suelo, esto debido a las obras civiles en mal estado de manera subterránea que ocasionan la saturación del suelo, provocando socavamientos y deslaves en distintos puntos.

En este trabajo, se realizarán estudios de los cambios en los suelos de granos finos por medio de ensayo triaxiales, en diferentes estados de humedad e investigación sobre el cambio climático en Guatemala.

El conocer el contenido de humedad en el suelo y los efectos en sus propiedades físicas, es de gran importancia para la cimentación en obras civiles, para adaptarse según sea la vulnerabilidad.



# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Reseña histórica del cambio y la variabilidad climática en Guatemala

El cambio y variabilidad climática son fenómenos que han surgido como consecuencia del daño que la humanidad ha provocado con la generación de gases contaminantes. Estos gases en su mayoría producidos por la industria son llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI). Los GEI producen partículas dañinas a la atmósfera que provocan cambios en el clima, a su vez teniendo repercusiones en los sectores económico, productivo y salubrista.

La influencia del ser humano es la causa dominante en el calentamiento de la atmósfera y el océano, en alteraciones en el ciclo del agua, en reducciones de la cantidad de nieve y hielo, y en la elevación del nivel medio global del mar.<sup>1</sup>

En América Central, en particular Guatemala es uno de los más vulnerables al cambio climático, debido a que se encuentra expuesto a diversos fenómenos meteorológicos y sísmicos, esto debido a su ubicación geográfica.

Guatemala, con una extensión territorial de 108 889 km<sup>2</sup>. Limitada al noreste con el Mar Caribe, al sur él con el Océano Pacífico, al norte y oeste con México y al este con Belice, Honduras y El Salvador. Según sus rasgos geográficos presenta un relieve accidentado y variado, con altas sierras montañosas y un cinturón volcánico, que alternan entre valles y depresiones; contando con un gran recurso hidrográfico de 38 cuencas provenientes de las vertientes del Océano Pacífico y Atlántico y del Golfo de México. Según su

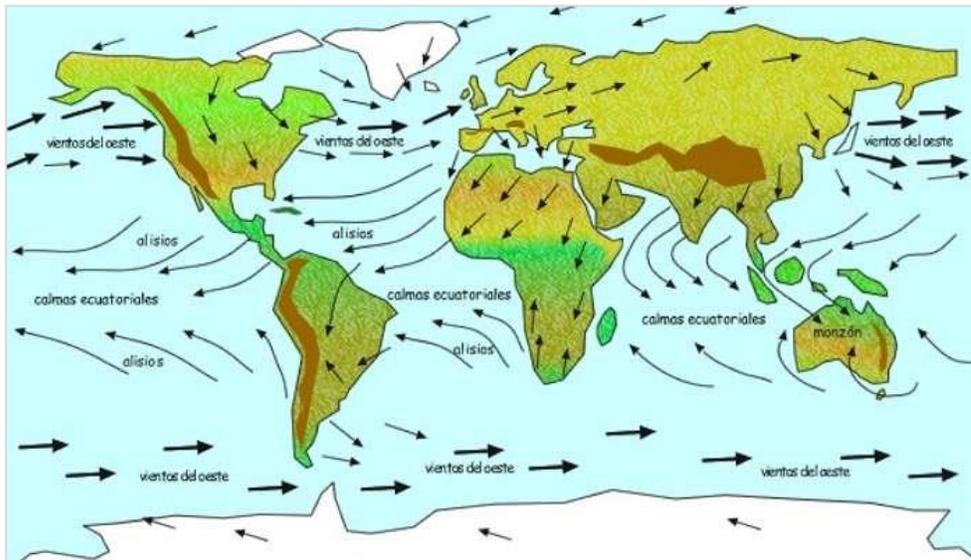
---

<sup>1</sup> Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *Cambio Climático*. p. 50.

altitud, puede variar desde climas cálidos, templados y fríos. Presenta dos estaciones a lo largo del año que abarca la época de verano en los meses de abril a noviembre y la época de invierno en los meses de octubre a mayo.

La ocurrencia de los vientos alisios, en la zona que se conoce como Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Esta zona se desplaza hacia el sur o arriba del ecuador durante el invierno del hemisferio norte, cuando se establece la época seca de noviembre a marzo en el país. En el verano del hemisferio norte entre abril y octubre, la ZCIT se desplaza hacia el norte provocando la mayor parte de desplazamiento de vientos húmedos hacia el país, las variaciones en la posición de la ZCIT delimitan la presencia o ausencia de precipitaciones, dichas regiones influenciadas poseen precipitaciones con más de 200 días al año informa el MARN.

Figura 1. **Movimiento de los vientos**



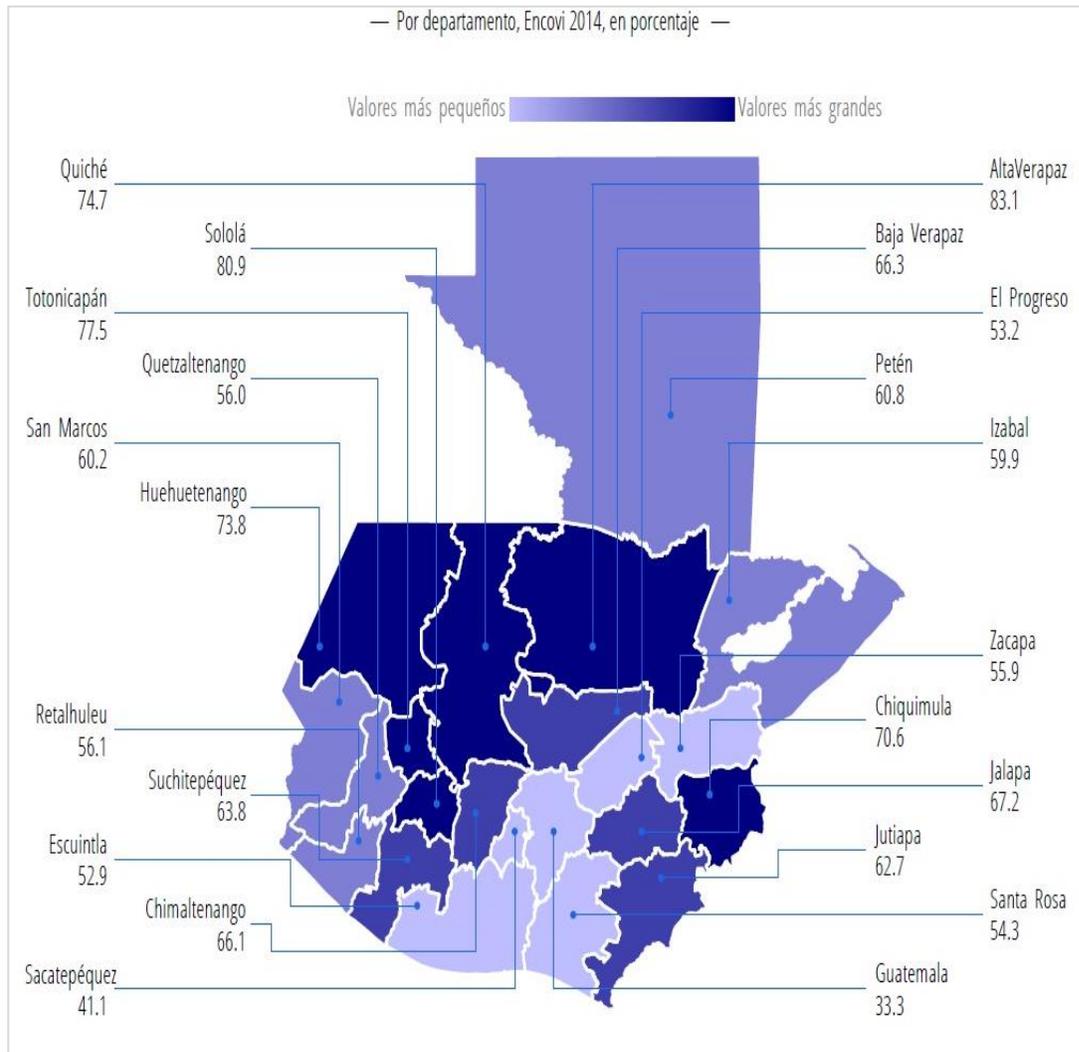
Fuente: Náutica y Deportes Tenerife. *Vientos alisios*. [www.nauticaydeportes.com](http://www.nauticaydeportes.com).

Consulta: febrero de 2019.

La pobreza es un aspecto que influye, debido a que por la falta de servicios y en consecuencia de los mismos provocan cambios en el estilo de vida. Según datos del INE del año 2015, indican que el 59,3 % de la población guatemalteca viven en condiciones de pobreza, de los cuales en su mayoría se localizan en zonas rurales careciendo de los servicios necesarios de salud, agua potable e infraestructura.

Esto lleva a que a la población más afectada es la indígena, localizados en su mayoría en los departamentos de Alta Verapaz, Huehuetenango, Quiché, Totonicapán, Chiquimula, Sololá y Chimaltenango.

**Figura 2. Incidencia de pobreza**

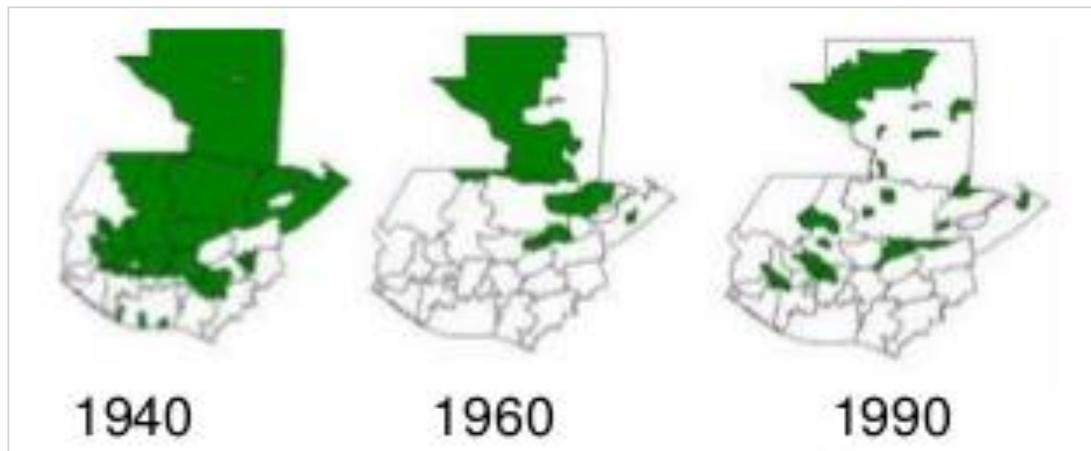


Fuente: Instituto Nacional de Estadística. *Mapa de pobreza*. [www.icop.org.gt](http://www.icop.org.gt). Consulta: febrero de 2019.

Otro de los aspectos importantes que tiene influencia en el cambio climático son los recursos naturales. Guatemala se caracteriza por ser territorio boscoso, la población elimina este recurso diariamente ocasionando un desequilibrio en los suelos y sus poblaciones naturales de flora y fauna.

En los últimos años el sector de Agroindustria ha acabado con las zonas utilizando los suelos para cultivos de banano, plátano, caña de azúcar y palma africana.

Figura 3. **Cambios en el uso del suelo y deforestación**



Fuente: GARZONA ESTRADA, Erwin. *Causas y consecuencias del cambio climático*.  
[www.es.slideshare.net](http://www.es.slideshare.net). Consulta: febrero de 2019.

El recurso más importante es el agua, este carece de un manejo apropiado, ya que por la contaminación con desechos sólidos y aguas negras de origen industrial y doméstico afectan los cuerpos receptores.

En el año de 1,970 los niveles de claridad en el agua de los lagos eran altos; sin embargo, en la actualidad han disminuido en un 75 %. Según Marco Vinicio Cerezo Blandón, director de la Fundación para la Conservación y el Ecodesarrollo, se han secado las lagunas de Ordoñez, en Santos Cuchumatán, y Magdalena, en Chiantla, Huehuetenango, esto debido al cambio climático y la deforestación.

## **1.2. Reseña histórica de la Mecánica de Suelos**

El estudio de los suelos se ha realizado en la antigüedad, con la construcción de monumentos en Egipto y Mesopotamia presentando grandes desafíos relacionados con las cimentaciones. Torres y muros de grandes dimensiones que desafiaron a la ingeniería y a la capacidad del hombre. Estas construcciones se derivan esencialmente del conocimiento empírico, el conocimiento y la práctica provenientes de la experiencia, el ensayo y el error, o de experimentación en campo.

En el siglo XVII se reconoció la Mecánica de Suelos por los ingenieros militares franceses, introdujeron una serie de análisis de empujes sobre muros de contención y taludes de tierra para el mejoramiento de fortalezas. La construcción de caminos y canales que resistieran las piezas de artillerías eran el enfoque, mas no tomaban en cuenta la presión que la tierra. A mediados del siglo XVIII, se elaboraron publicaciones científicas sobre empujes laterales de tierra, estos estudios ya no eran exclusivos de Francia.

El ingeniero Alexandre Collin, en el siglo XIX, proporciono variedad de detalles sobre deslizamientos profundos en las laderas de arcilla, cortes y terraplenes. Según su teoría, la falla se llevaba a cabo cuando la cohesión movilizada excede la cohesión existente del suelo. En 1857, la primera publicación de William Rankine, fue una teoría sobre el empuje y el equilibrio de las masas de la tierra. Henri Philibert Gaspard Darcy, en 1856 realizó un estudio sobre la permeabilidad de los filtros de arena. En base a estas pruebas define el término de coeficiente de permeabilidad del suelo.

A principios del siglo XX, se realizaron estudios donde se establecieron propiedades y parámetros de la arcilla. En 1908, Albert Mauritz Atterberg realizo

estudios donde define las fracciones de arcilla de tamaño natural como porcentaje de peso de partículas; explicando a su vez la importancia de los suelos cohesivos a través de la definición de límite líquido, plástico y de contracción, y el índice de estabilidad, como aporte adicional a estos suelos. Arthur Langley Bell, en 1915, se basó en la construcción de un dique para desarrollar relaciones de presión lateral y resistencia de la arcilla, así como la capacidad de carga en cimentaciones superficiales en arcilla.

En 1924, Karl Terzaghi, desarrolló la teoría de consolidación de las arcillas, usada hasta hoy en día. Terzaghi marco una nueva era la Mecánica de Suelos, nombrándolo como el padre de la Mecánica de Suelos Moderna. Terzaghi juntos al pionero Ralph B. Peck, hicieron grandes aportes a la Mecánica de los Suelos y a la Ingeniería Geotécnica, realizando publicaciones de proyectos de consultoría hasta sus últimos días de vida.

Los suelos independientemente de su origen, pueden clasificarse según el tamaño de las partículas en gravas, arenas, limos o arcillas. Varias organizaciones mediante ensayos determinaron límites para separar los suelos.

Tabla I. **Límites de separación de suelos**

Organización	Tamaño de grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
MIT	>2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
USDA	>2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
AASHTO	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	<0,075	

Fuente: BRAJA, Das. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Límites de separación de tamaño de suelo.* p. 28.



## **2. EL CAMBIO CLIMÁTICO**

De acuerdo a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), lo define como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), se entiende como cualquier cambio en el clima con el tiempo debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas.

### **2.1. Conceptos básicos**

Los conceptos básicos del cambio climático presentan información al respecto, dando detalles de este y cómo afecta a la naturaleza y al mundo en general.

#### **2.1.1. Tiempo**

El tiempo se refiere a las características atmosféricas en un período de uno o dos días. La observación del tiempo se realiza a través de estaciones meteorológicas, la base de todas las observaciones se obtiene de los instrumentos meteorológicos que se utilizar para la toma de medidas.

Tabla II. Instrumentos meteorológicos

Instrumento de medida	Variable meteorológica	Unidad de medida
Termómetro	Temperatura	°C
Barómetro	Presión atmosférica	hPa
Pluviómetro	Precipitación	l/m <sup>2</sup>
Veleta	Dirección del viento	°
Higrómetro	Humedad relativa	Porcentaje
Evaporímetro	Evaporación	mm de agua
Anemómetro	Velocidad del viento	m/s=km/h
Heliógrafo	Horas de sol	h
Radiómetro	Radiación	W/m <sup>2</sup>

Fuente: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. *Observación del tiempo. Meteorología y climatología*. p. 41.

### 2.1.2. Efecto invernadero

El planeta tierra, como cualquier otro cuerpo se calienta y emite radiaciones, este calentamiento de la tierra que recibe se debe a la radiación solar que se transmite por medio de ondas cortas, la temperatura de estas ondas es mayor al que puede contener la tierra, por lo que emite radiación infrarroja de una longitud de onda más larga. El efecto invernadero es un fenómeno natural, del cual se necesita para el balance energético de la atmósfera. La influencia del ser humano ha provocado que el efecto invernadero tenga un desequilibrio, con la emisión de gases antropológicos de efecto invernadero.

El efecto invernadero natural es un proceso, de absorción de gases que calienta la atmósfera; la estratosfera y mesosfera aumentan su temperatura con

la ayuda del gas de ozono, que les transmite energía. El 62,5 % de la energía queda alojada en la superficie de la tierra, y el 37,5 % es liberada hacia el espacio. Este efecto natural es el que mantiene la temperatura promedio entre 14 °C, pero si no existiera se tendría una temperatura de 22 °C bajo cero.

Figura 4. Efecto invernadero natural



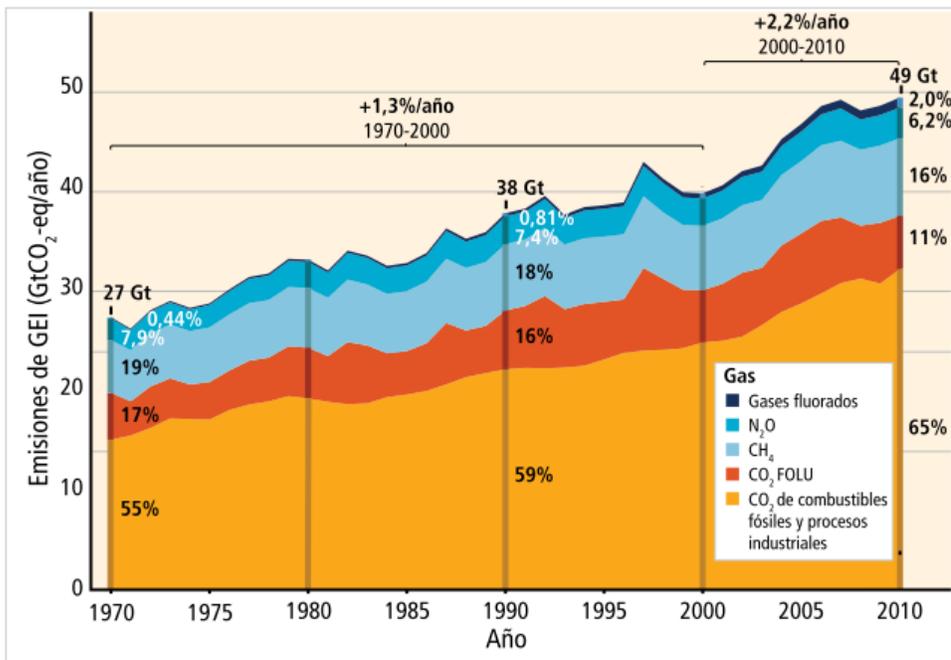
Fuente: Línea Verde Cauta. *Efecto invernadero natural*.

[www.lineaverdeceutatrace.com/lv/guias-buenas-practicas-ambientales/cambio-climatico/que-es-el-efecto-invernadero.asp](http://www.lineaverdeceutatrace.com/lv/guias-buenas-practicas-ambientales/cambio-climatico/que-es-el-efecto-invernadero.asp). Consulta: marzo de 2019.

Las actividades humanas han provocado un efecto invernadero dañino, provocando un aumento en la emisión de gases a estos se les denomina Gases de Efecto Invernadero (GEI), como dióxido de carbono, óxido nitroso, metano, halocarbono y el ozono troposférico. Estos GEI absorben la mayor cantidad de

radiación infrarroja, provocando cambios en la atmósfera, radiación solar y en las propiedades superficiales del suelo; afectando la absorción, dispersión y emisión de radiación en la atmosfera y superficie de la tierra.

Figura 5. **Emisión de GEI anuales global, 1970-2010**

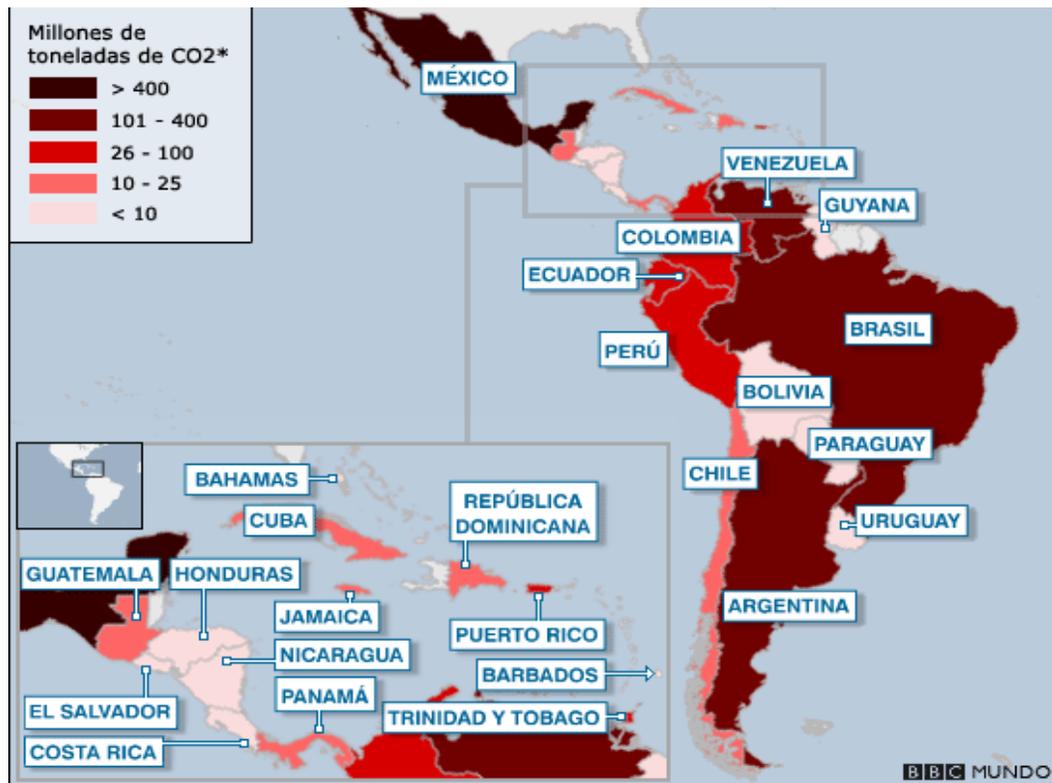


Fuente: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, IPCC. Cambio Climático 2014. *Gases de efecto invernadero*. p. 5.

Según el IPCC, las emisiones de gases de efecto invernadero dependen principalmente del tamaño de la población, la actividad económica, el estilo de vida, el uso de la energía, los patrones de uso del suelo, la tecnología y la política climática. La emisión radiactiva del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), se aumentó en un 20 % en un periodo de 10 años (1995-2005), teniendo a esa fecha un 75 % de CO<sub>2</sub> en la atmosfera. A nivel mundial China emite la mayor cantidad de CO<sub>2</sub>. En el caso de Guatemala se enfoca en el dióxido de carbono

como principal fuente de emisión el cambio de uso de la tierra (57,7 %), el transporte (22,9 %), industria energética (10,9 %), procesos industriales (6,1 %) y otros (2,2 %) según el MARN, para el año 2012.

Figura 6. **Emisión de CO<sub>2</sub> en América Latina, 2007**



Fuente: BBC. *Emisiones de CO<sub>2</sub> en América Latina.*

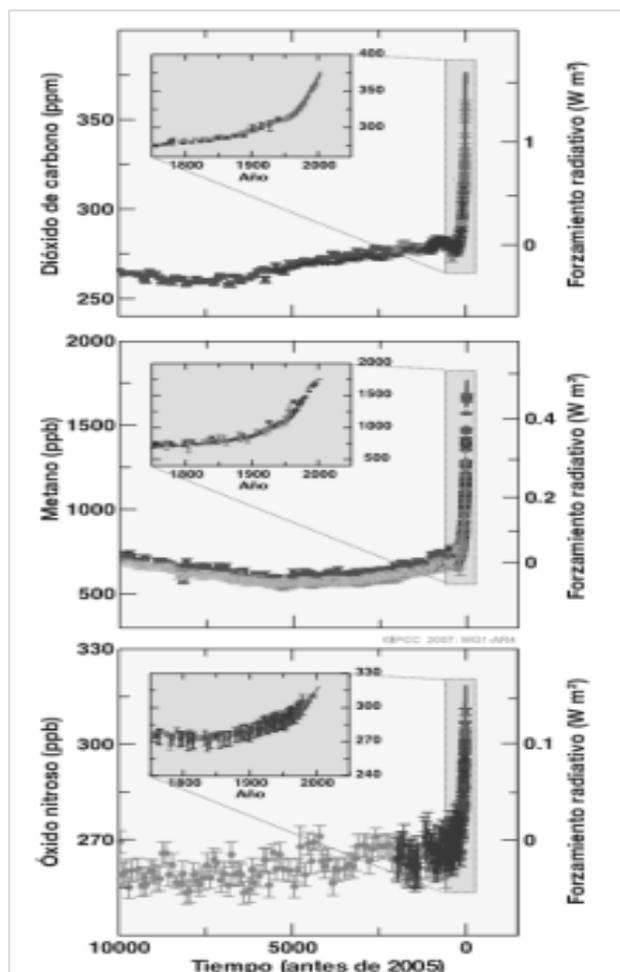
[www.bbc.com/mundo/ciencia\\_tecnologia/2009/12/091125\\_copenhague\\_mapa\\_emisiones\\_jmp.shtml](http://www.bbc.com/mundo/ciencia_tecnologia/2009/12/091125_copenhague_mapa_emisiones_jmp.shtml). Consulta: marzo de 2019.

### 2.1.3. Calentamiento global

Se entiende como Calentamiento global, al incremento gradual de la temperatura del planeta como consecuencia de la emisión de gases de efecto

invernadero, estos gases crean una capa gruesa que retiene los rayos infrarrojos, impidiendo que la radiación salga del planeta tierra al espacio. Los incrementos de dióxido de carbono indicaron IPCC en el 2014, que son debidos fundamentalmente a los combustibles fósiles, el uso y cambio de uso del suelo, y el aumento de concentraciones de metano y óxido nitroso se deben principalmente a la agricultura.

Figura 7. **Concentraciones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso**



Fuente: LARIOS MARTON, José. *Calentamiento global al borde del límite*. p. 13.

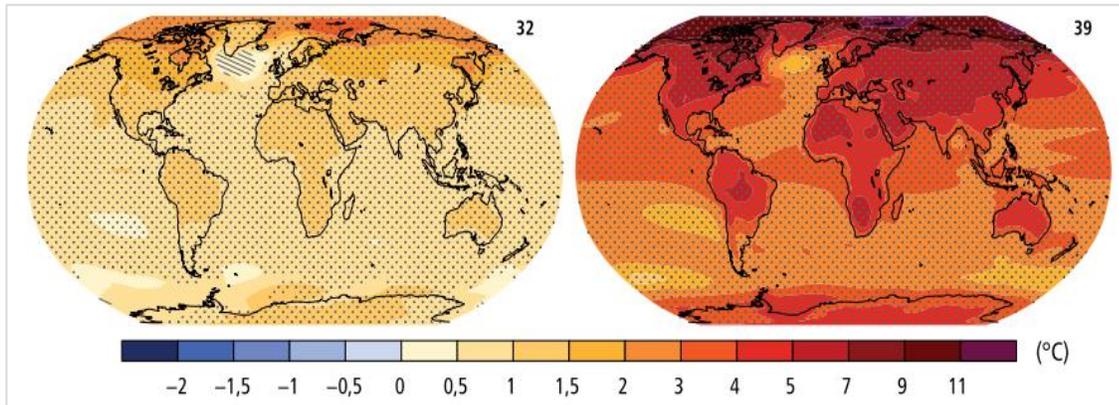
Los aumentos de temperatura global de 4 °C o más por encima de los niveles del siglo XX, combinados con una mayor demanda de alimentos, pondría la seguridad alimentaria en situaciones de riesgo a nivel mundial. Las proyecciones según estudios indican que el cambio climático hará que se reduzcan los recursos de agua superficiales y aguas subterráneas renovables en la mayoría de regiones secas subtropicales, por lo que se creara competencia por el agua en los sectores.

La inestabilidad de la temperatura tiene consecuencias en distintos aspectos del clima. Los biomas, ecosistemas, el carbono del suelo, los mantos de hielo, las temperaturas de los océanos y la elevación del nivel del mar dan lugar a cambios continuos y abruptos.

El IPCC 2 014, dice que el calentamiento del océano domina sobre el incremento de la energía almacenada en el sistema climático y representa más del 90 % de la energía acumulada entre 1 971 y 2 010, siendo únicamente en torno al 1 % la energía almacenada en la atmosfera.

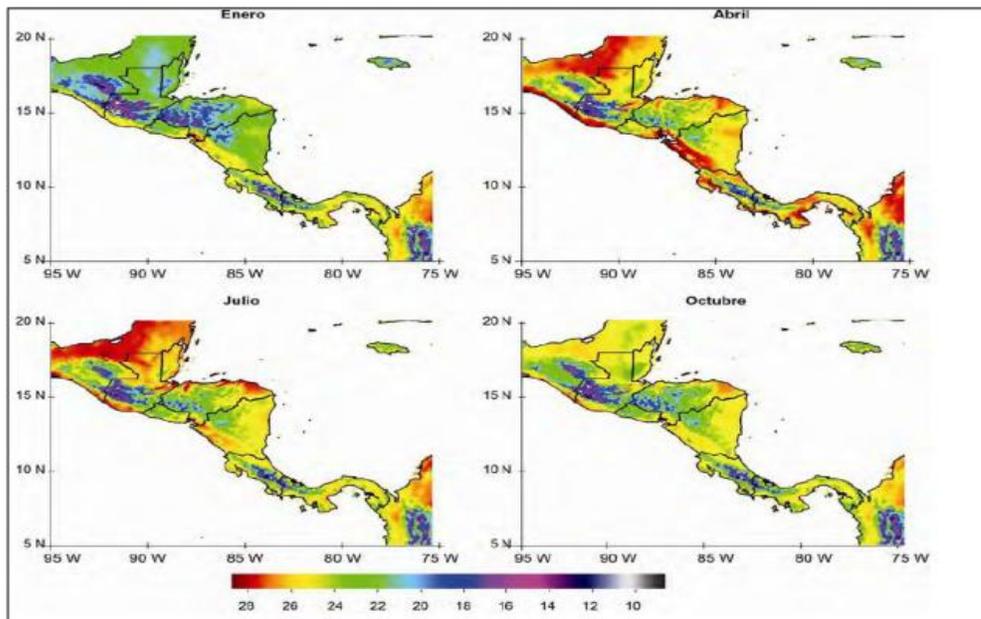
A escala global, el calentamiento del océano es mayor cerca de la superficie. Los 75 m superiores se han calentado 0,11 °C por decenio, durante el periodo comprendido entre 1 971 y 2 010. La temperatura se sigue incrementando en un ritmo más acelerado de lo normal, científicos han realizado estudios que un aumento de solo 2 °C puede crear condiciones peligrosas para la vida humana.

Figura 8. **Temperatura media en la superficie (1986-2005 a 2081-2100)**



Fuente: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, IPCC. Cambio Climático 2014. *Calentamiento global*. p. 12.

Figura 9. **Temperatura media en Centroamérica, 1950 a 2000**



Fuente: CEPAL. La economía del cambio climático en Centroamérica. *Tendencias regionales del clima y del nivel del mar*. p. 16.

## **2.2. Variabilidad climática**

La variabilidad climática se refiere a fluctuaciones que se observan en el clima, de diversas duraciones. Las variables climatológicas (temperatura, precipitación, entre otras), varían por encima o por debajo de lo normal, generalmente representada por un valor promedio en un periodo establecido.

Los impactos de los recientes fenómenos extremos conectados al clima, como olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios forestales, ponen en vulnerabilidad y exposición de algunos ecosistemas y al ser humano indica IPCC.

### **2.2.1. Escalas de variabilidad**

Al analizar las secuencias de una variable en un lugar determinado, se puede observar una serie de ciclos interpuestos que tienen periodos de meses, años y decenios, los que muestran la variabilidad climática en escalas intraestacional, interanual e interdecadal. Estas variaciones se originan por procesos en los distintos componentes climáticos, como océanos, en la atmósfera y por oscilaciones en la radiación solar.

#### **2.2.1.1. Escala intraestacional**

En el transcurso de una estación, ya sea verano o invierno, se presentan fluctuaciones que por días controlan las actividades que generan las condiciones de tiempo. Según investigaciones muestran que las oscilaciones de duración van de 30 a 60 días, teniendo más variaciones en la presión atmosférica, vientos y precipitación.

### **2.2.1.2. Escala Interanual**

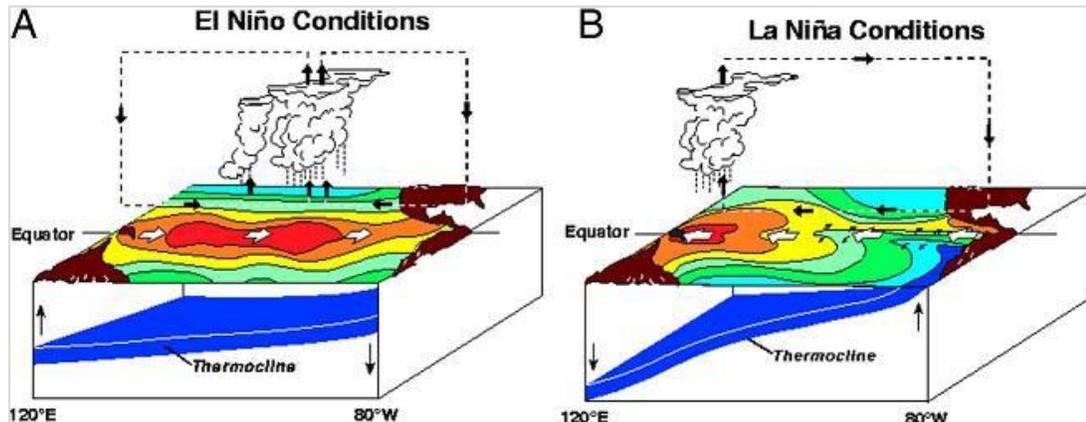
Corresponden las fluctuaciones con periodos de más de un año. La variabilidad en la precipitación se puede percibir con años más lluviosos de lo normal y años con deficiencia de lluvias. En esta escala se pueden identificar los fenómenos de El Niño y La Niña.

Según Fernández y Ramírez, El Niño se refiere a una corriente marina tibia que se traslada hacia el este en el Océano Pacífico Ecuatorial, fenómeno que por lo general se manifiesta en el verano del hemisferio sur. Durante la ocurrencia de El Niño la precipitación decrece significativamente sobre América Central en el periodo de julio a diciembre.

El fenómeno de La Niña se caracteriza por tener periodos en los que las temperaturas superficiales del mar son usualmente bajas en el Pacífico central y oriental y los vientos alisios son fuertes.

El Niño y La Niña generan cambios de presión atmosférica en el Pacífico tropical, a esto se le conoce como Oscilación del Sur, lo que altera la circulación en la atmósfera e induce anomalías.

Figura 10. Condiciones de los fenómenos El Niño y la Niña



Fuente: NAUKAS, Francis. *Efectos impredecibles del cambio climático: El Niño y La Niña*. [www.francis.naukas.com/2008/12/26/los-efectos-impredecibles-del-cambio-climatico-el-nino-y-la-nina/](http://www.francis.naukas.com/2008/12/26/los-efectos-impredecibles-del-cambio-climatico-el-nino-y-la-nina/). Consulta: marzo de 2019.

### 2.2.1.3. Escala Interdecadal

Esta variabilidad tiene periodos duraderos de más de diez años. Estas pueden estar asociadas a las detecciones en el número de manchas solares, a oscilaciones decadales en los océanos o el ciclo lunar de 18,6 años.

### 2.2.2. Variabilidad climática en Guatemala

La Dirección General de Docencia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, realizó un estudio donde el Ingeniero José Miguel Leiva Pérez enfatizó que en el año 2015 el país había tenido un incremento de la temperatura de un 0,75 °C y si continúa con la tendencia se podría alcanzar los 5,5 °C, lo que significaría un deterioro en la agricultura, desplazamiento de animales y de grupos sociales, también efectos en la biodiversidad por las

lluvias, erosión, inundaciones, tormentas, deslizamientos, sequías, terremotos, erupciones volcánicas e incendios.

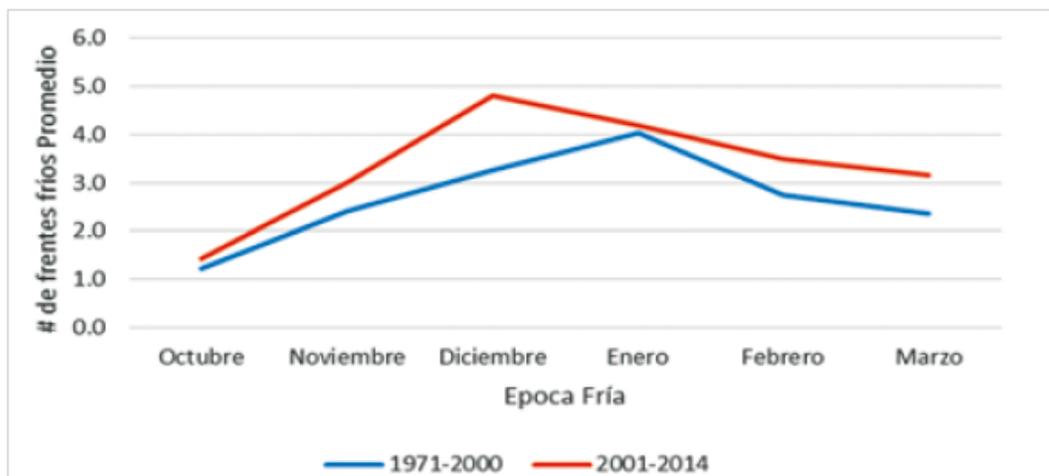
Guatemala por su ubicación geográfica se expone a un cambio de clima de origen marítimo, al presentar actividades en el Océano Pacífico, Mar Caribe y el Golfo de México, ocasiona periodos de sequías o periodos de lluvia prolongados. La variabilidad climática da lugar a eventos de El Niño y La Niña, frentes fríos y canícula.

El fenómeno de El Niño se declara presente cuando el océano Pacífico Ecuatorial muestra un calentamiento por arriba de los  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y el fenómeno de La Niña cuando ocurre un enfriamiento de por debajo de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , cuando la temperatura superficial del mar se encuentra en  $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  está en una fase neutra. En el país en un período de 1950 a 2014 se han registrado 24 años con fenómenos de El Niño, 25 años de fenómenos de La Niña y 16 años neutros (según datos del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos – NHC- por sus siglas en inglés).

La época fría en Guatemala inicia a finales del mes de octubre y concluye en marzo, durante este ciclo se ve afectada por masas de aire frío procedentes de zonas de latitudes altas y medias.

Los efectos de los frentes fríos se asocian a colisiones de masas de aire frío y caliente en la parte frontal, originando baja humedad atmosférica y temperatura ambiente.

Figura 11. Frecuencia promedio de frentes fríos por mes



Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2015. Segunda Comunicación Nacional sobre cambio climático en Guatemala. *Eventos de variabilidad climática en Guatemala*. p. 93.

La canícula es el periodo en el que no suceden precipitaciones en un tiempo no menor de 6 días hasta 15 días consecutivos, o con precipitación inefectiva con valores menores o iguales a 5mm por día. En Guatemala suele presentarse en los meses de julio y agosto.

### 2.2.3. Clasificación climática en Guatemala

En Guatemala se presentan varios sistemas de medición para clasificar el clima en una región, dependiendo de los ecosistemas, jerarquías de humedad y temperatura. El sistema de Thornthwaite y el de Koppen, son los más utilizados para Guatemala.

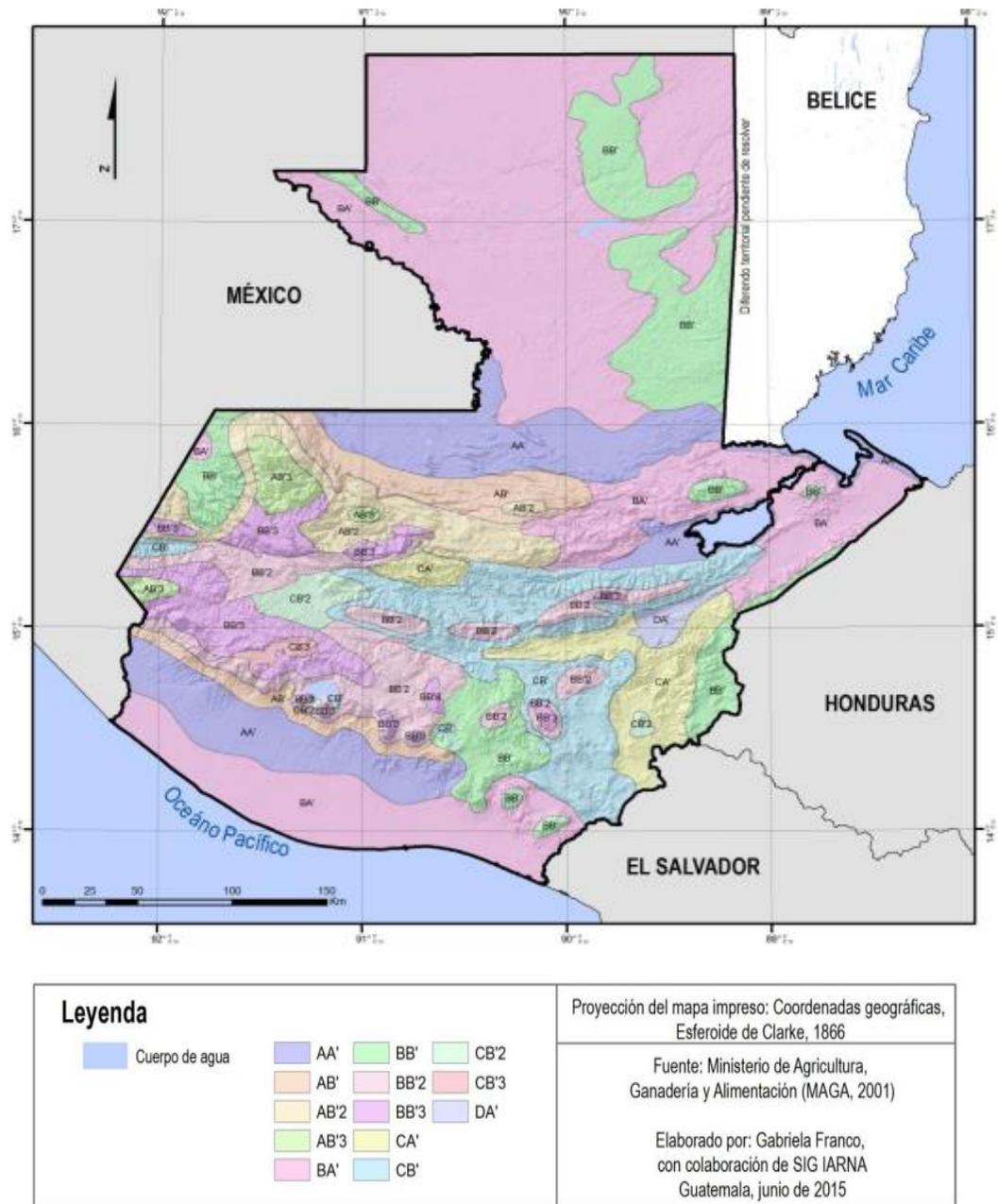
El sistema de Thornthwaite, designa 13 tipos de climas en Guatemala.

Tabla III. **Clasificación de zonas climáticas en Guatemala según el sistema de Thornthwaite**

Símbolo	Jerarquía de Humedad	Jerarquía de Temperatura	Característica
AA'	Muy húmedo	Cálido	Selva
AB'	Muy húmedo	Semi-cálido	Selva
AB'2	Muy húmedo	Templado	Selva
AB'3	Muy húmedo	Semi-frío	Selva
BA'	Húmedo	Cálido	Bosque
BB'	Húmedo	Semi-cálido	Bosque
BB'2	Húmedo	Templado	Bosque
BB'3	Húmedo	Semi-frío	Bosque
CA'	Semi-seco	Cálido	Pastizal
CB'	Semi-seco	Semi-cálido	Pastizal
CB'2	Semi-seco	Templado	Pastizal
CB'3	Semi-seco	Semi-frío	Pastizal
DA'	Seco	Cálido	Estepa

Fuente: elaboración propia, con base en datos del MAGA.

Figura 12. Clasificación de zonas climáticas en Guatemala según el sistema de Thornthwaite



Fuente: FRANCO, Gabriela. *Elaboración de un mapa de clasificación climática para Guatemala.*

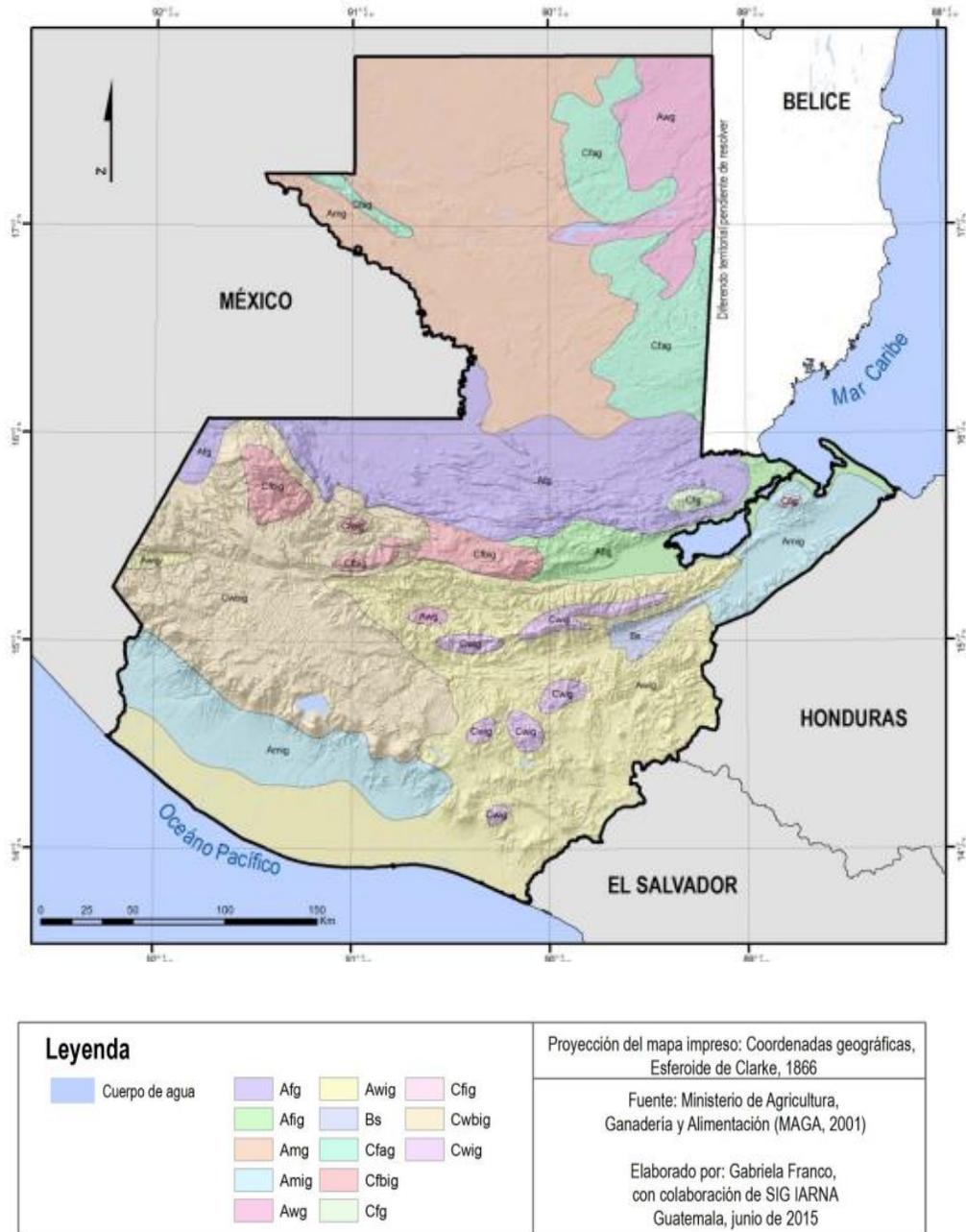
La clasificación del sistema de Koppen, toma como base las estaciones de red del INSIVUMEH.

Tabla IV. **Clasificación de zonas climáticas en Guatemala según el sistema de Koppen**

Símbolo	Descripción
Af	Cálido-húmedo, la temperatura y precipitación permanecen altas durante todo el año.
Am	Cálido-húmedo, abundante lluvia durante el verano.
Aw	Cálido-húmedo, precipitación media durante el verano.
Bs	Seco, la evaporación excede la precipitación (semiárido).
Cf	Templado-húmedo, sin estación seca definida.
Cw	Templado-subhúmedo, con lluvias en el verano.

Fuente: elaboración propia, con base en datos del MAGA.

Figura 13. Clasificación de zonas climáticas en Guatemala según el sistema de Koppen



Fuente: FRANCO, Gabriela. *Elaboración de un mapa de clasificación climática para Guatemala.*

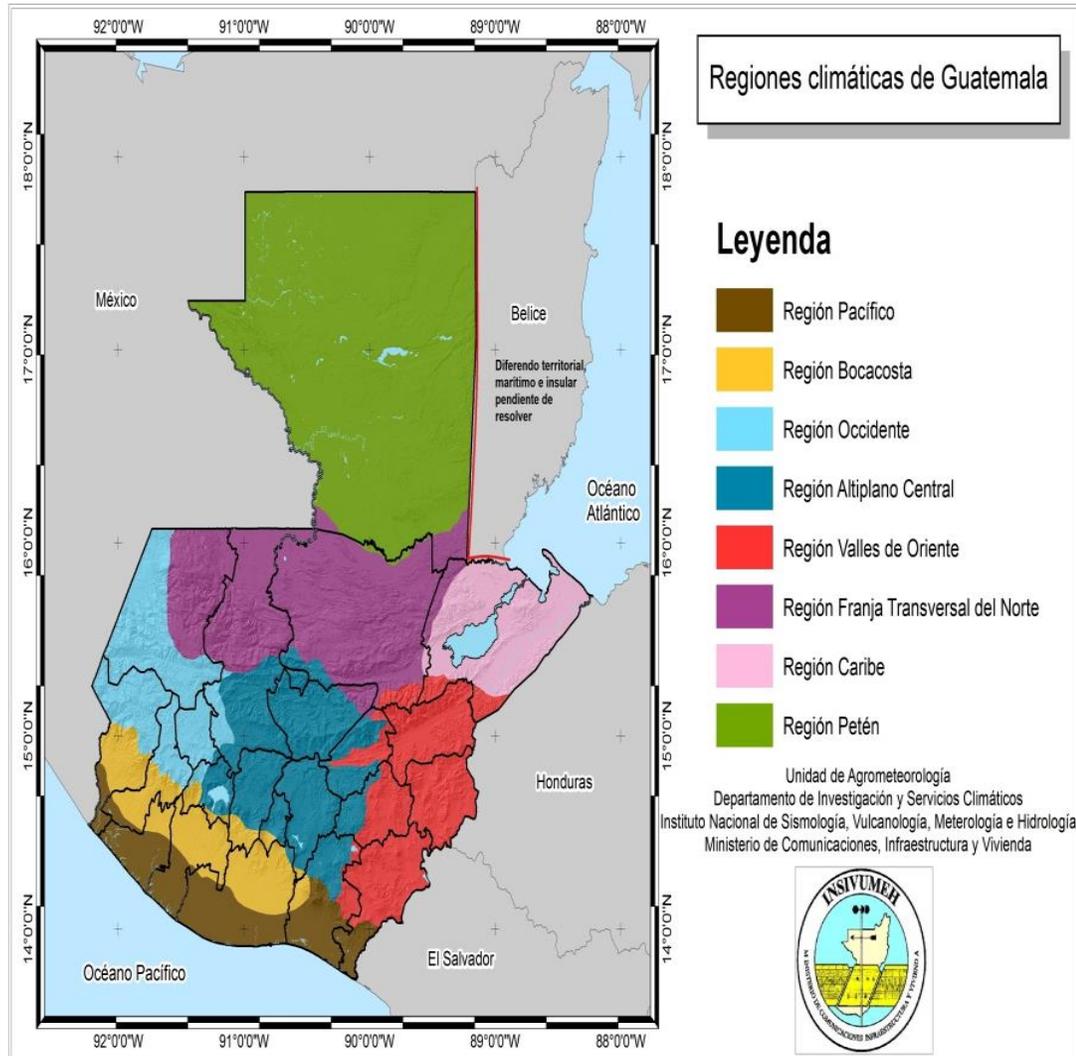
#### **2.2.4. Regiones climáticas de Guatemala**

La época lluviosa y época seca se produce por fenómenos que se originan por efecto de la circulación general de la atmósfera y por la posición geográfica del país.

Cada región posee sus propias características climáticas locales, debido a diversos factores como su topografía, geología y tipos de suelo, vegetación, reconociendo 8 regiones definidas, que son:

- Región Caribe
- Región de Valles de Oriente
- Región de Occidente
- Región Boca Costa
- Región Pacífico
- Región del Altiplano Central
- Región Franja Transversal del Norte
- Región Norte

Figura 14. **Regiones climáticas de Guatemala**



Fuente: INSIVUMEH. *Regiones climáticas en Guatemala*. [www.insivumeh.gob.gt/regiones-climaticas/](http://www.insivumeh.gob.gt/regiones-climaticas/). Consulta: marzo de 2019.

- **Región Caribe:** presenta lluvias durante todo el año. Tiene un periodo seco que dura de dos o tres semanas y se da a finales del mes de mayo; noviembre se caracteriza por la influencia de frentes fríos y a la

finalización de la temporada ciclónica. Su temperatura promedio anual oscila entre los 25,8 °C a 26,6 °C.

- Región Valles del Oriente: se caracteriza por la deficiencia de lluvia. Esta característica se define por la Sierra de las Minas, que la deja sin humedad, filtrando únicamente aire cálido. Su clima varía de semiseco sin estación definida hasta seco con invierno seco. Su temperatura promedio anual se encuentra entre 26,5 °C a 28 °C.
- Región del Occidente: es la región más montañosa del país. Estos accidentes geográficos forman diferentes climas, que varían de templados y semifríos con inviernos benignos, de carácter húmedo y semisecos con invierno seco. Las lluvias son de baja a media intensidad, los registros más altos se dan en un periodo de mayo a octubre. La temperatura promedio anual oscila entre 13 °C a 15,3 °C.
- Región Boca Costa: presenta los índices más altos de precipitación. La lluvia es escasa en los primeros meses del año y se incrementa a partir de mayo. El clima generalizado es semicálido y sin estación fría, y su vegetación se caracteriza por la selva. Los niveles de temperatura aumentan a medida que desciende hacia el litoral, la temperatura promedio anual es de 27,3 °C.
- Región Costa del Pacífico: tiene lluvias menos intensas que la Boca Costa, que tienen a disminuir conforme se acerca al litoral marítimo. Su clima es de género cálido, con carácter húmedo variando a semiseco. La vegetación varía de bosques a pastizales. La temperatura es muy alta, el dato promedio anual es de 27,8 °C.

- Región del Altiplano Central: en esta región las lluvias no son tan intensas, y sus registros más altos se obtienen de mayo a octubre. Su clima varía de templados y semifríos, de carácter húmedo y semiseco. La temperatura promedio anual es de 20,75 °C.
- Región Franja Transversal del Norte: es muy lluviosa y sus mayores registros se presentan de junio a octubre. Su clima cálido con inviernos benignos, y su carácter varía de muy húmedo sin estación seca definida. Su vegetación es de selva y bosque. La temperatura desciende conforme aumenta la altitud, y los registros más altos se ubican en los meses de mayo y septiembre.
- Región del Norte: es una región muy lluviosa durante todo el año, y sus registros más altos se dan en el periodo de junio a octubre. Su clima es de género cálido con carácter muy húmedo, húmedo y semiseco. Su vegetación natural varía entre selva y bosque. La temperatura promedio anual oscila entre los 20 °C y 30 °C.



### 3. EL SUELO Y LA HUMEDAD

Según Crespo en su libro de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, da una definición muy completa sobre la definición de Suelo que dice: “Suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan.”<sup>2</sup>

La humedad del suelo es muy variada y depende del clima, vegetación, la profundidad del suelo, y de las características y condiciones físicas del perfil.

#### 3.1. Geología del suelo en Guatemala

Guatemala se encuentra entre tres placas tectónicas, dos de origen continental “Norteamérica y Caribe” y una de origen oceánica “Cocos”. La interacción de estas placas ocasiona fallas en la corteza terrestre, debido a que la placa de Cocos y la de Caribe se encuentran en una zona de subducción, y la de Caribe y Norteamérica se encuentran en zona de convergencia, dando lugar a la actividad volcánica y relieves montañosos que cubren el 60 % de la superficie del país.

Los suelos en este país son heterogéneos, debido a la diversidad de las condiciones geológicas, orográficas, líticas y de procesos de formación. Se

---

<sup>2</sup> CRESPO VILLALAZ, Carlos. *El suelo y su origen. Mecánica de suelos y cimentaciones.* p. 18.

agrupan en siete órdenes que son producto de variedad de climas y procesos de formación geológica. Los órdenes son:

- Entisoles: suelos jóvenes con un desarrollo limitado que exhiben propiedades de materia mineral meteorizada. La productividad oscila entre niveles muy altos para algunos suelos formados en depósitos fluviales recientes a niveles muy bajos para los que se forman en la arena voladora o en laderas rocosas.
- Mollisoles: suelos oscuros y suaves que se han desarrollado bajo una vegetación herbosa y en general se encuentran en áreas de pradera. La fertilidad del suelo es excelente y también se encuentran en bosques de madera dura, con estaciones secas normales.
- Inceptisoles: suelos jóvenes poco desarrollados en los que el comienzo o principio del desarrollo del perfil es evidente. Más habituales en los climas húmedos, la vegetación nativa suele ser bosque.
- Vertisoles: suelos que contienen grandes cantidades de arcillas, que tienen procesos de contracción e hinchamiento con la adición de agua. se debe disponer de suministros adecuados de agua para saturar el suelo después de períodos de sequía. La expansión y la contracción del suelo ejercen presión sobre las estructuras humanas.
- Alfisoles: suelos moderadamente meteorizados que se forman debajo de los bosques boreales o los bosques de almendros tropicales caducifolios. Las partículas de arcilla se acumulan en una capa subterránea en respuesta a la lixiviación de los ambientes húmedos. Estos suelos no son ni demasiado secos ni con exceso de humedad.

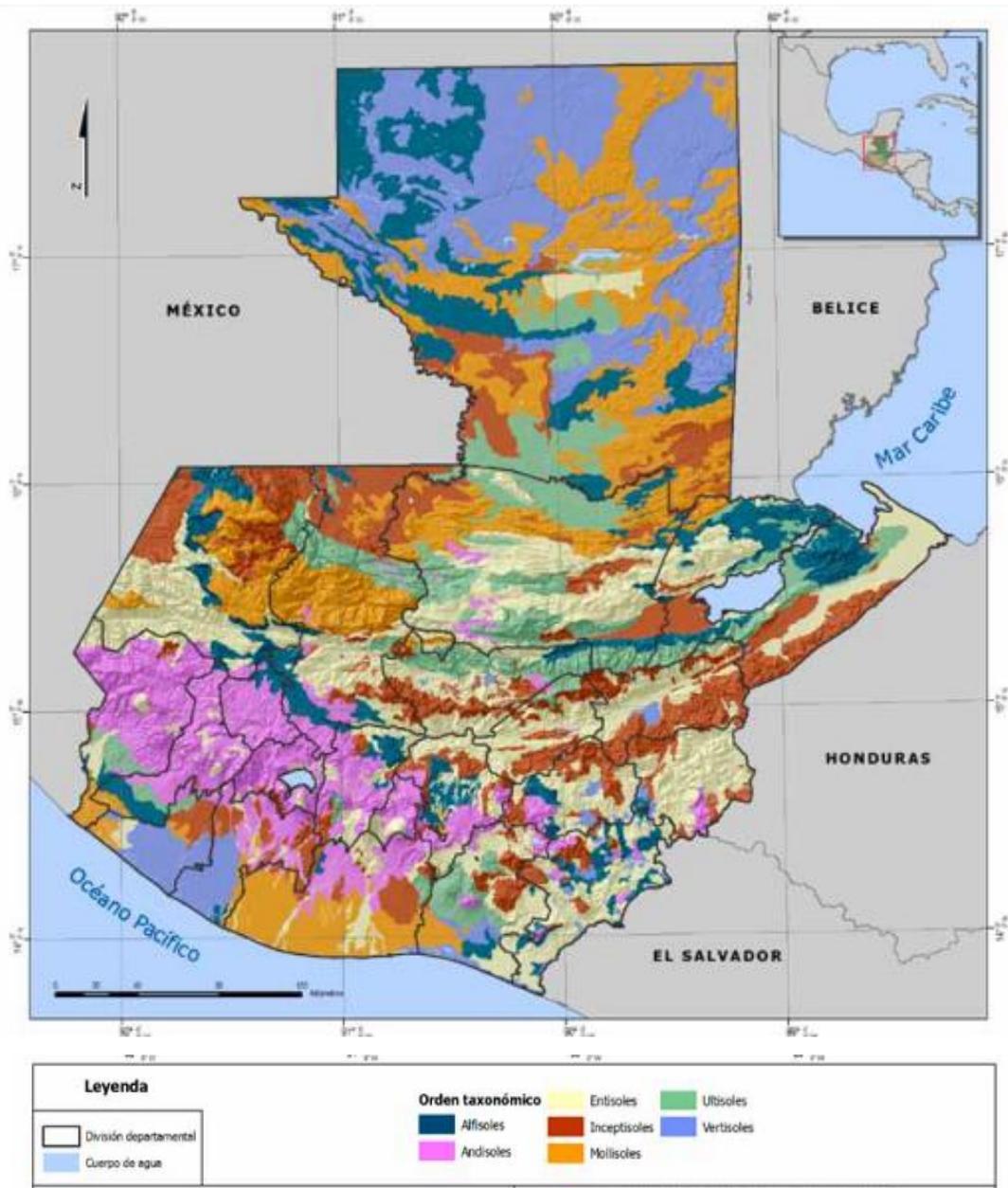
- Andisoles: suelos jóvenes en los que la roca mineral meteorizada es la ceniza volcánica, depositada por la actividad volcánica reciente.
- Ultisoles: suelos que representan los productos de largos periodos de meteorización. El agua que percola a través del suelo se concentra en partículas de arcilla en las superficies inferiores. El agua abundante y un periodo largo sin congelación contribuyen a una calidad de suelo pésima.

Tabla V. **Clasificación de órdenes de suelos en Guatemala**

Capacidad	Porcentaje del territorio
Entisoles	20
Mollisoles	18
Inceptisoles	15
Vertisoles	15
Alfisoles	12
Andisoles	10
Ultisoles	10

Fuente: GEO Guatemala 2009. *Clasificación de órdenes de suelos en Guatemala*. p. 44.

Figura 15. Clasificación taxonómica de los suelos en Guatemala



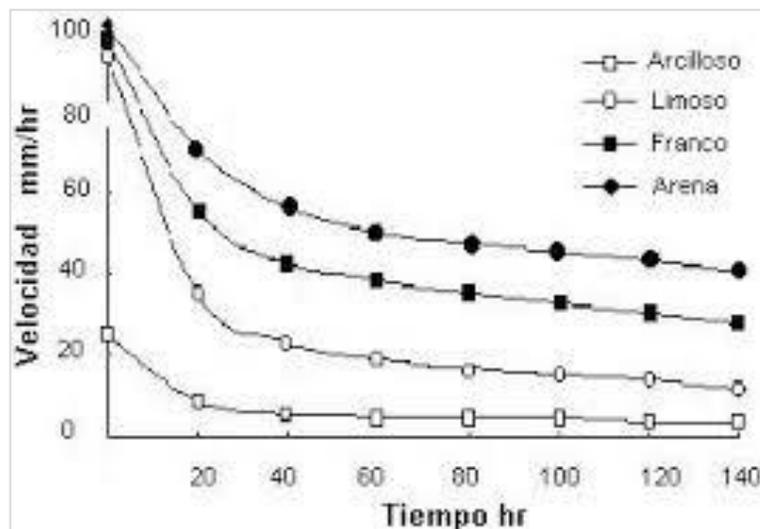
Fuente: Informe Ambiental del Estado de Guatemala, GEO Guatemala 2009. *Clasificación taxonómica de los suelos en Guatemala*. p. 46.

### 3.2. La infiltración en el suelo

La infiltración es un proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo, depende principalmente del tiempo de infiltración, la conductividad hidráulica, contenido base de agua en el suelo y la superficie.

Al inicio de la infiltración, el suelo seco absorbe agua rápidamente, y a medida que transcurre el tiempo, el suelo se va saturando progresivamente y la velocidad de infiltración va disminuyendo hasta un valor constante, a este proceso se le denomina Velocidad de infiltración básica. Según el tipo de suelo, varían en la velocidad de infiltración, teniendo una mayor velocidad los suelos arenosos de granos gruesos, y una velocidad baja para los suelos arcillosos.

Figura 16. **Curvas de infiltración según textura**



Fuente: Sociedad Estándares de Ingeniería para aguas y suelos LTDA. *Curvas de infiltración, según textura del suelo.* p. 2.

### **3.3. Movimiento del agua en el suelo**

El suelo como un material con orden variado de sus partículas que dejan entre sí una serie de cavidades o poros conectados unos con otros para formar una compleja red de conductos de diferentes magnitudes que se comunican tanto con la superficie del terreno como con las fisuras y grietas de la masa del mismo.

En el estado saturado del suelo el agua tiene un movimiento preferencialmente horizontal y una pequeña componente de flujo vertical, y en el estado no saturado el agua se dirige hacia la zona freática, es decir en dirección vertical.

Fuerzas que rijan el movimiento del agua en el suelo:

- Por acción de la gravedad
- Por atracción capilar partículas suelo (Potencial de matriz)
- Por acción de la presión hidrostática

El agua queda retenida sobre la superficie de las partículas por atracción capilar, por lo que la velocidad de circulación decrece, lo mismo ocurre a medida que el espacio poroso está ocupado por agua. La acción de la gravedad y la presión hidrostática asociada al encharcamiento del terreno producen el efecto contrario: su aumento acelera el desplazamiento.

La movilidad en un suelo no saturado está limitada entre la superficie del suelo y la zona freática. Allí el contenido de agua es menor que la porosidad del medio, es decir que no todos los poros están llenos de agua, este movimiento

es producido por la combinación de efectos gravitacionales, térmicos y potenciales químicos.

### 3.4. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica representa la capacidad de un medio poroso de dejar pasar un fluido. Los suelos con una conductividad hidráulica por debajo de los 0,25 cm/h tienden a tener una movilidad muy lenta (ocasionando un mal drenaje); por el contrario, aquellos que se encuentran por encima de los 0,25 cm/h no retienen el agua por demasiado tiempo.

En el caso de un suelo saturado la conductividad hidráulica ( $K_s$ ) está en función de la densidad, viscosidad del fluido ( $\eta$ ) y la permeabilidad intrínseca del suelo ( $k$ ):

$$K_s = \frac{1}{\eta} \rho g k \quad (\text{Ecuación 1})$$

En un suelo no saturado la conductividad hidráulica ( $K(S)$ ), depende del potencial de succión:  $k$

$$\psi_m = \rho g h \quad (\text{Ecuación 2})$$

Con una integración analítica obteniendo como resultado la conductividad hidráulica para suelos no saturados:

$$K(S) = K_s S^{1/2} (1 - (1 - S^{1/m})^m)^2 \quad (\text{Ecuación 3})$$

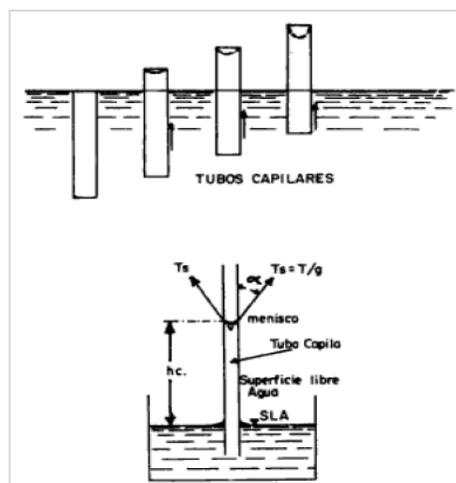
Los suelos con una alta porosidad y una deficiente interconectividad entre los poros, tienen pequeños valores de  $K_s$ .

### 3.5. Humedad por capilaridad

Es el agua que se adhiere a los poros del suelo por el efecto de tensión superficial. La tensión superficial es un fenómeno por el cual la superficie de un líquido tiende a comportarse como una delgada película elástica; mientras que, en la superficie, el líquido forma curvas cóncavas provocando así contener el mínimo posible de energía.

La capilaridad es una característica física de los líquidos, que se estudia por medio de tubos capilares. Si se introduce un tubo capilar en el agua de modo que al inicio el extremo superior del tubo coincida con la superficie del agua y se comienza a levantar el tubo, se puede observar que el menisco se va haciendo más curvo a medida que se vaya levantando el tubo, alcanzando su máxima curvatura cuando se tenga el valor máximo de la tensión superficial desarrollada.

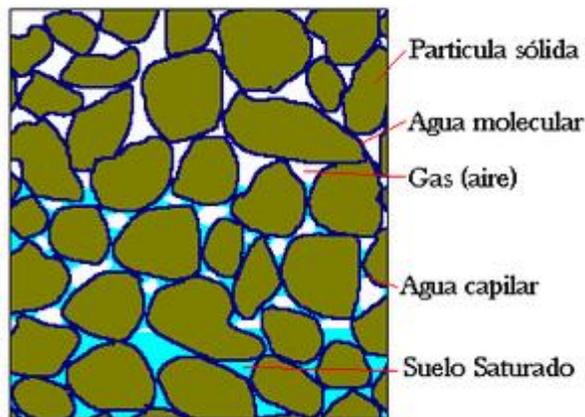
Figura 17. Curvas de infiltración según textura



Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p. 152.

La capilaridad en los suelos, tiene un comportamiento contrario a los tubos capilares porque los vacíos en los suelos tienen anchos variables y se comunican entre sí formando una rejilla. Si esta rejilla se comunica por abajo con el agua, su parte inferior se satura completamente; más arriba el agua solo ocupa los vacíos pequeños y los mayores quedan con aire.

Figura 18. **Comportamiento de la capilaridad en suelos**

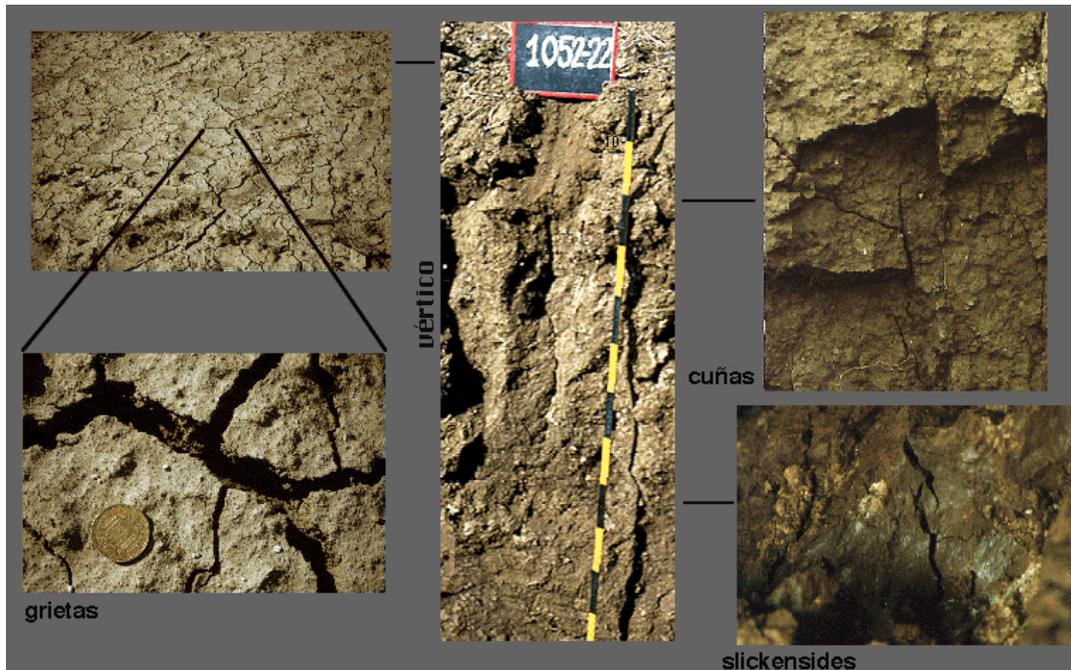


Fuente: *Tips y temas agronómicos. Relación agua – suelo.*

<https://www.tipsytemasagronomicos.com/tipos-de-agua-en-el-suelo-agricola/>. Consulta: mayo de 2019.

La contracción de los suelos de granos finos es un proceso que ocurre por la capilaridad, si el suelo está saturado, el agua ejerce una fuerza de separación entre las partículas sólidas del suelo. Luego el suelo comienza a secarse debido al calentamiento por el sol, y el agua existente en el suelo se evapora, la masa de suelo trata de tomar su nivel freático normal, de esta manera el agua empieza a bajar, creando una presión capilar dentro del suelo, lo que provoca esfuerzos de compresión en el suelo, en un esfuerzo de tensión superficial, entrando el suelo en un proceso de contracción.

Figura 19. **Contracción en suelos de granos finos**



Fuente: Edafología. *Cartografía de suelos*.

[www.google.com.gt/search?q=contraccion+de+suelos+finos&tbn=isch&tbs=rimg](http://www.google.com.gt/search?q=contraccion+de+suelos+finos&tbn=isch&tbs=rimg). Consulta:  
mayo de 2019.

El agua capilar es aquella que se eleva sobre el nivel de agua libre gravitacionalmente, es decir por encima del nivel en el que la presión es igual a la atmosférica, hasta la zona de aireación no saturada. Permanece en el suelo debido a las fuerzas de la tensión superficial del agua.

Crespo en su libro de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, hace mención de que la ascensión capilar en un suelo se mide por la altura existente desde la fuente de abastecimiento de agua hasta dónde llega la humedad, y esa altura está en razón inversa del diámetro de las partículas, y la velocidad de ascensión está en razón directa del diámetro de las partículas.

La ascensión capilar se estima por medio de la altura capilar en el suelo. La altura capilar en el suelo ( $h_c$ ) se puede determinar gracias a la siguiente ecuación:

$$h_c = \frac{C}{e D_{10}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

C: Constante empírica que depende de la forma de los granos y de las impurezas de sus superficies. El valor varía de 0,1 a 0,5 cm<sup>2</sup>.

e: Relación de vacíos del suelo.

D<sub>10</sub>: Diámetro efectivo expresado en centímetros.

La altura capilar típica para diferentes suelos es: para arenas gruesas es de 2 a 5 cm, arenas 12 a 35 cm, arena fina 35 a 70 cm, limo 70 a 150 cm, arcilla 200 a 400 cm, esto según Alberto Benítez en su libro Captación de Aguas Subterráneas.

### **3.6. Humedad según su profundidad**

La entrada y salida de agua produce cambios continuos en la humedad del suelo. Cuando la precipitación es abundante, todos los poros se encuentran llenos de agua, a lo que se le denomina nivel de saturación. Este nivel afecta a una capa profunda de suelo, la cual está delimitada por la permeabilidad.

La capacidad de retención de agua o capacidad de campo, corresponde a la máxima cantidad de agua que puede retener el suelo después de haber

drenado el agua gravitacional. En esta etapa se puede clasificar los suelos en saturados y secos.

Los suelos saturados y los suelos secos, se constituyen de 2 fases: partículas sólidas-agua y partículas sólidas-aire, respectivamente. Y en un caso intermedio, donde el suelo está parcialmente saturado, se comprenden 3 fases partículas sólidas- agua- aire.

Figura 20. **Contracción en suelos de granos finos**



Fuente: MEZA OCHOA, Victoria Elena. *Suelos parcialmente saturados*. p. 5.

Los suelos que se encuentran por debajo del nivel freático se consideran suelos saturados, debido a que los espacios vacíos están ocupados totalmente por agua. De acuerdo a las leyes de la hidráulica, el agua en los poros se encuentra a una presión positiva, es decir que ejerce una fuerza positiva de igual magnitud en todas las direcciones y se le denomina presión de poro debido al agua.

Los suelos que se encuentran por encima del nivel freático, pueden ser suelos en estado seco o parcialmente saturado. El suelo seco es que se encuentra más cercano a la superficie del terreno, y en la mayoría de los vacíos se encuentran llenos de aire, y puede tener una fase líquida con diminutas gotas aisladas.

El límite más cercano al nivel freático, es la franja capilar, donde la mayor parte de los vacíos están llenos de agua, pero también puede existir una zona gaseosa, es decir, que presenta burbujas de aire.

La zona de dos fases, es la que existe entre la zona de suelo seco y la franja capilar. En esta zona, el agua y el aire ocupan los poros, ambos de manera continua. La presión es negativa, debido a la diferencia entre ambas fases.

### **3.7. Medición de humedad en el suelo**

Cuando el perfil del suelo está saturado de agua y alcanza su capacidad de campo, se dice que el suelo está al 100 % de su contenido de humedad disponible. Las moléculas de agua son retenidas debido a la tensión, que es una medida que establece el valor de la fuerza de retención de las partículas del suelo; la tensión es directamente proporcional a la retención de humedad.

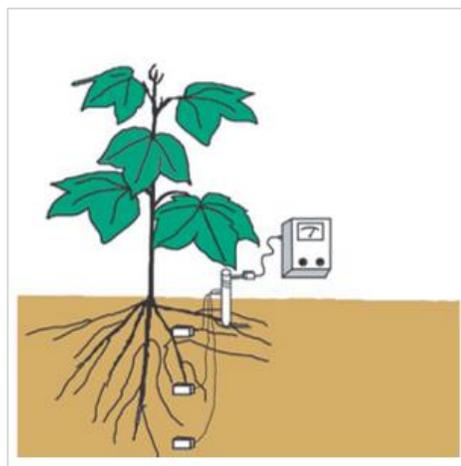
### **3.8. Sondas de resistencia eléctrica**

La resistencia eléctrica permite medir el contenido de humedad del suelo por mediación de un bloque de material poroso en equilibrio higrométrico con el suelo. Dicho bloque puede ser de yeso, nylon o fibra de vidrio.

Al bloque se fijan dos electrodos, para que la resistencia permanezca constante; se coloca el bloque en el suelo y se alcanza el equilibrio higrométrico, los cambios en el contenido de humedad causan una variación de la resistencia eléctrica, que se ve reflejada en un instrumento de medida instalado en la superficie. Los datos registrados de la resistencia eléctrica según las variaciones del contenido de humedad, presentan retrasos en el tiempo, y se corrige mediante una curva de calibración. La idea general para la calibración es fijar ciertos contenidos de humedad de suelos e introducirles los sensores saturados para que se sequen hasta que la humedad del suelo sea la misma que en la sonda.

Los bloques para mediciones higrométricas son muy eficaces en la gama más baja de valores de humedad. Sus posibilidades para medir el contenido de la humedad se ven limitadas por los efectos de histéresis y porque la calibración depende de la densidad y la temperatura del suelo.

Figura 21. **Diagrama de bloques de resistencia eléctrica**



Fuente: MARTIN, Edward. *Método para medir la humedad del suelo para la programación del riego*. p. 4.

### **3.9. Sonda de neutrones**

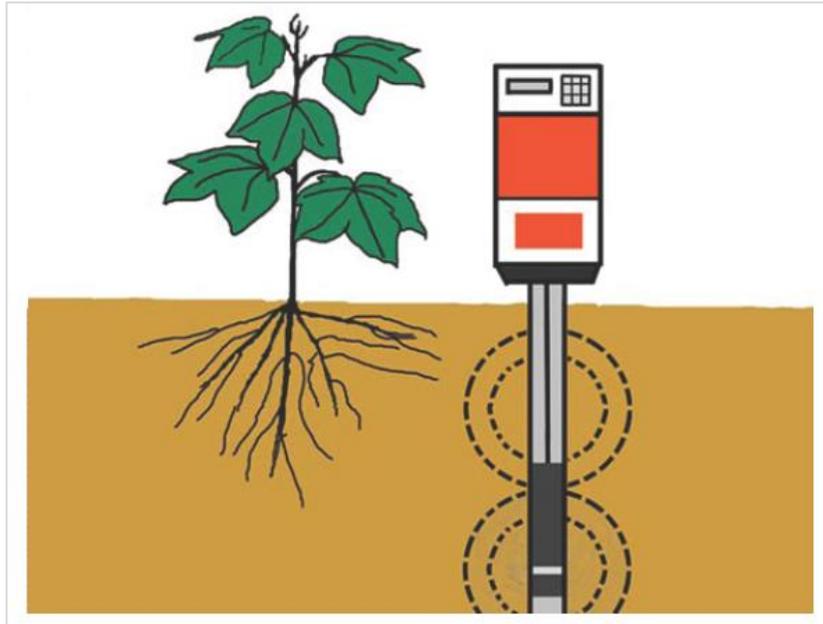
Este método se base en el principio de medición de la disminución de la velocidad de los neutrones emitidos al suelo por una fuente de neutrones rápidos. La pérdida de energía, debido a las colisiones de neutrones con átomos de bajo peso atómico, es muy elevada, siendo proporcional al número de dichos átomos presentes en el terreno.

Estas colisiones tienen por efecto transformar los neutrones rápidos en neutrones lentos. El hidrógeno, que es el principal elemento de bajo peso atómico presente en el suelo, está contenido en gran cantidad en las moléculas del agua del suelo.

Un detector dentro de la sonda mide la proporción de los neutrones rápidos que salen y de los neutrones lentos que regresan. Esta relación se usa para determinar el contenido de humedad en el suelo. Debido a que cada suelo tiene fuentes de hidrogeno que no están relacionadas con el agua, es importante calibrar la sonda para cada suelo.

Este método neutrónico indica la cantidad de agua por unidad de volumen de suelo. El volumen se presenta en forma de una ampolla de un radio de uno a cuatro metros, de acuerdo al contenido de humedad y a la actividad de la fuente.

Figura 22. **Sonda de neutrones**



Fuente: MARTIN, Edward. *Método para medir la humedad del suelo para la programación del riego*. p. 2.

### **3.10. Reflectómetro de ondas electromagnéticas**

El método del Reflectómetro de ondas electromagnéticas puede realizarse de en dos métodos según sea su dominio, a continuación, se muestran según sus características.

#### **3.10.1. Reflectancia en el dominio del tiempo**

El método del Reflectómetro de dominio de tiempo (TDR, Time Domain Reflectometry), funciona bajo el principio de que la presencia de agua en el suelo afecta la velocidad de propagación de una onda electromagnética (volviéndola más lenta), el TDR envía una onda electromagnética por medio de

una guía, generalmente un par de puntas paralelas de metal, colocada en el suelo a la profundidad deseada, entonces mide el tiempo que le toma a la onda en viajar por la guía hacia el suelo y regresar.

El TDR registra el tiempo y lo convierte a una lectura de la humedad del suelo, si el suelo se encuentra en una fase de saturación, le tomara más tiempo a la onda magnética viajar por el suelo y regresar por la guía.

Esta técnica puede ser aplicada utilizando:

- Ondas verticales de diferentes longitudes
- Ondas horizontales enterradas en el suelo a diferentes profundidades
- Ondas TDR simples insertadas verticales en el suelo

Entre estas tres modalidades los sistemas de ondas verticales presentan mayores ventajas con respecto al sistema de ondas horizontales, ya que permiten la realización de medidas con una alteración mínima del suelo. Puede ser aplicada en un amplio rango de textura y porosidad del suelo, pero posee limitaciones en suelos donde presentan alto contenido de sales y materia orgánica, alterando los resultados.

### **3.10.2. Reflectancia en el dominio de frecuencia**

El método del Reflectómetro de dominio de frecuencia (FDR, Frequency Domain Reflectometry), es también llamado Método de Capacitancia, se basa en la medición de la constante dieléctrica para determinar el contenido de agua del suelo, midiendo el tiempo de carga de un condensador que utiliza el suelo como medio dieléctrico.

El FDR consiste en ondas que determinan el contenido de agua en el suelo mediante la medida de la capacitancia, donde el sensor actúa como parte de un capacitor en el que los dipolos permanentes de las moléculas de agua en un medio dieléctrico se polarizan y alinean en un campo eléctrico.

Los dipolos eléctricos de cualquier naturaleza, contribuyen a la constante dieléctrica, estos deben responder a la frecuencia del campo eléctrico. La libertad de los dipolos para responder es determinada por las fuerzas locales de unión a nivel molecular, de forma que la respuesta global es resultado de la inercia molecular, las fuerzas de unión y la frecuencia del campo eléctrico. Determinando la capacitancia se obtiene la constante dieléctrica y, en consecuencia, la estimación del contenido de humedad del suelo.

Las medidas son rápidas y fáciles, pero son muy sensibles a las condiciones de instalación debido a que la esfera de influencia del condensador es relativamente pequeña. La calibración debe ejecutarse cuidadosamente para cada onda y suelo, con el fin de obtener datos exactos del contenido de humedad.

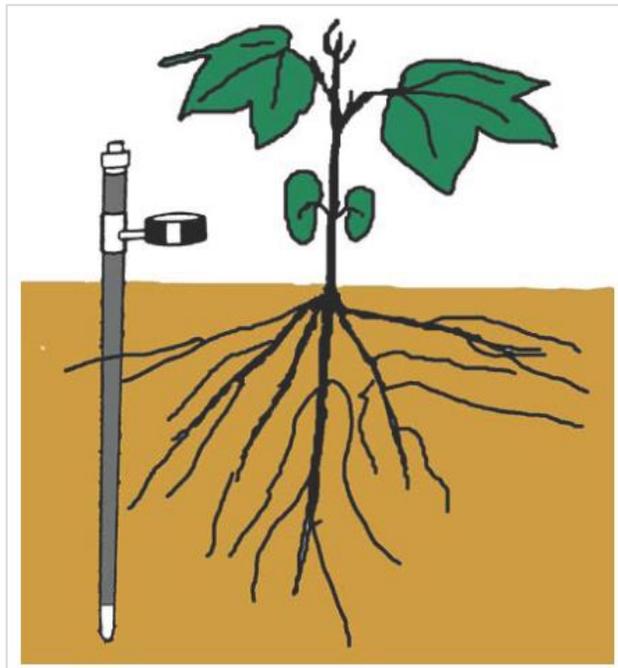
### **3.11. Método tensiómetro**

A medida que el suelo se seca, las partículas del suelo retienen el agua con mayor fuerza. El tensiómetro mide la intensidad de la fuerza con la que el suelo retiene el agua.

El método consiste en un tensiómetro que tiene una punta de cerámica o porosa conectada a una columna de agua. A medida que el suelo se seca, comienza a succionar agua de la columna de agua a través del bulbo de cerámica. La fuerza que se determina es por medio de la succión. Este método

funciona bien en suelos con alto contenido de humedad, y tienden a perder contacto con el suelo cuando se encuentra muy seco.

Figura 23. **Diagrama de un tensiómetro**



Fuente: MARTIN, Edward. *Método para medir la humedad del suelo para la programación del riego.* p. 4.

### **3.12. La succión en el suelo**

La succión en el suelo está relacionada con la capacidad de movilizar el agua existente en el suelo. La principal causa de la succión en el suelo se debe a la presión del gas. Cuando un suelo se encuentra en un estado donde todos los poros están ocupados por agua (estado de saturación), no existe succión.

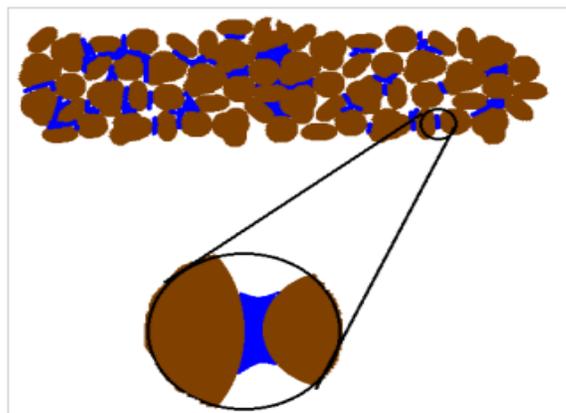
Entre el suelo y el agua existen tres tipos de fuerzas: químicas, térmicas y gravitacionales. La combinación de dichas fuerzas, genera la succión total ( $\psi_T$ ).

La succión total es la energía necesaria para remover una molécula de agua de la matriz de suelo mediante la evaporación. La energía consta de tres componentes: una asociada al efecto de la capilaridad denominada succión matricial ( $\psi_m$ ), una debida a la presencia de sales disueltas en el agua denominada succión osmótica ( $\pi$ ), y otra correspondiente a la gravedad denominada succión gravitacional.

- **Succión matricial**

Es la componente de la succión asociada a la capilaridad, debido a la tensión superficial en la interfase agua-aire y a la absorción desarrollada en la superficie de las partículas.

Figura 24. **Efecto de capilaridad**



Fuente: ZAMORA CARDONA, Juan Carlos. y CRISTANCHO, Fernando. *La humedad en las propiedades físicas del suelo.* p. 3.

En la figura 24, se muestra el efecto de capilaridad, donde el agua se adhiere al suelo en los poros capilares debido a una diferencia de presiones.

La succión matricial se expresa como:

$$\psi_m = U_a - U_w \quad (\text{Ecuación 5})$$

Dónde:

$U_a$  = la presión de aire en los poros

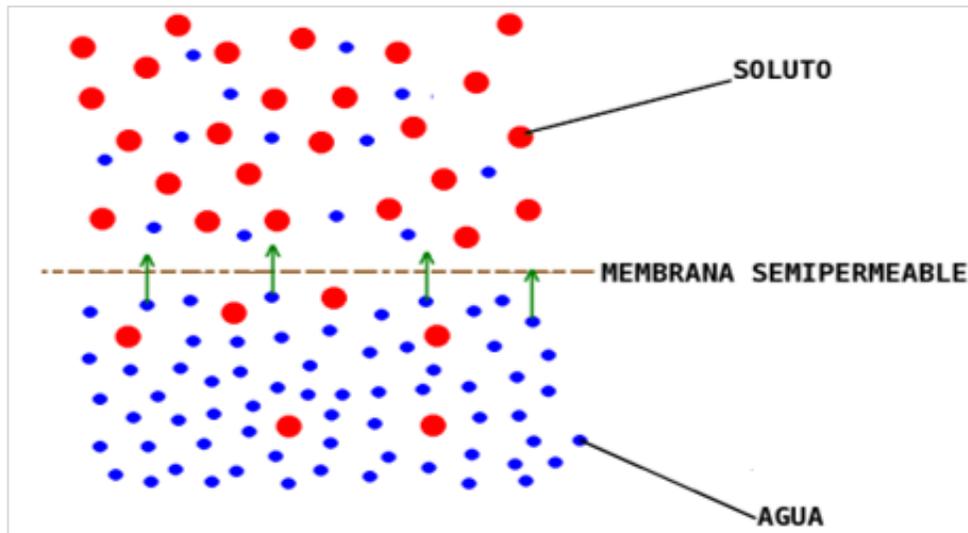
$U_w$  = la presión del agua en los poros

El valor de la succión matricial depende de la distribución de las partículas y el tamaño, grado de saturación y tamaño de los poros.

- Succión osmótica

La succión osmótica es la componente de la succión asociada a la presencia de sales disueltas en el agua (solutos). La presión de vapor se reduce en la zona por encima de la interfase agua-aire, debido a la presencia de sales, por lo cual se requiere de una mayor energía para remover una molécula de agua, y es independiente de los efectos por capilaridad.

Figura 25. Efecto de difusión de sales



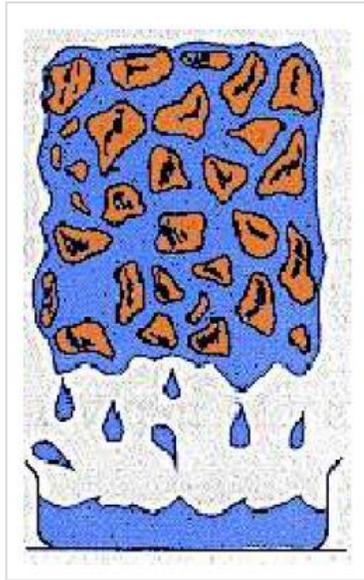
Fuente: ZAMORA CARDONA, Juan Carlos. y CRISTANCHO, Fernando. *La humedad en las propiedades físicas del suelo.* p. 3.

- **Succión gravitacional**

La succión gravitacional es la componente asociada a la energía necesaria para desplazar el agua desde un punto de referencia a otro de interés, bajo el efecto de la fuerza gravitacional.

Este tipo de succión es de mayor importancia en condiciones de saturación, ya que en este estado las otras succiones son nulas.

Figura 26. **Efecto de la fuerza gravitacional**



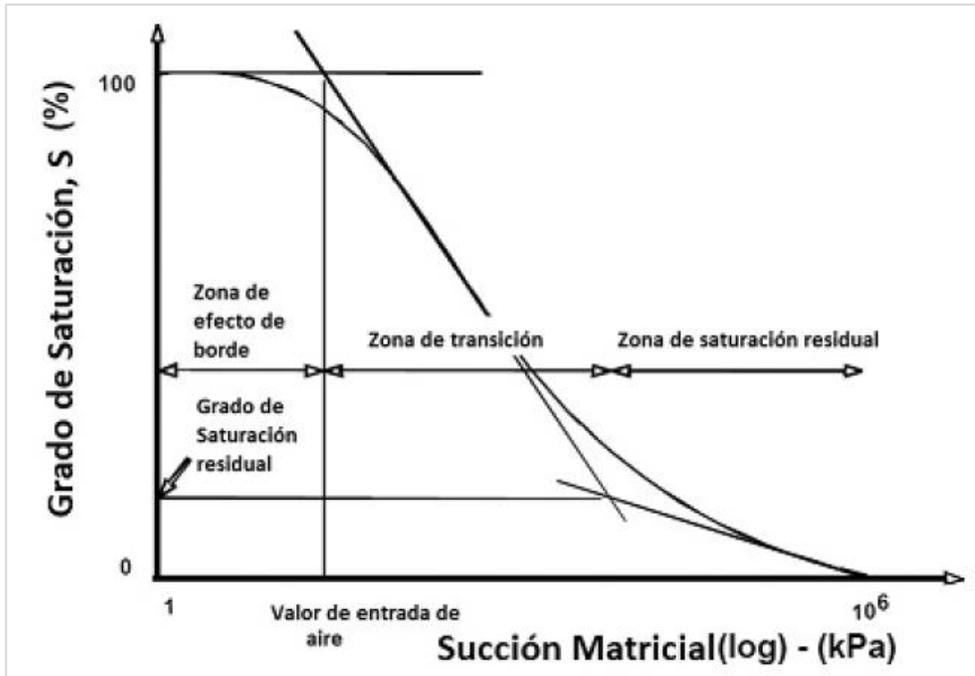
Fuente: ZAMORA CARDONA, Juan Carlos. y CRISTANCHO, Fernando. *La humedad en las propiedades físicas del suelo.* p. 3.

### 3.13. **Relación succión y humedad**

La relación que existe entre la succión y la humedad en un suelo, se define mediante la Curva característica de succión en el suelo (SWCC, Soil Water Characteristic Curve), esta también es conocida como Curva de retención de agua.

La curva característica de succión del suelo puede expresarse en términos de humedad gravimétrica, grado de saturación o humedad volumétrica vrs. La succión total, o en casos específicos de interés en términos de la succión matricial.

Figura 27. **Curva característica de la succión del suelo**

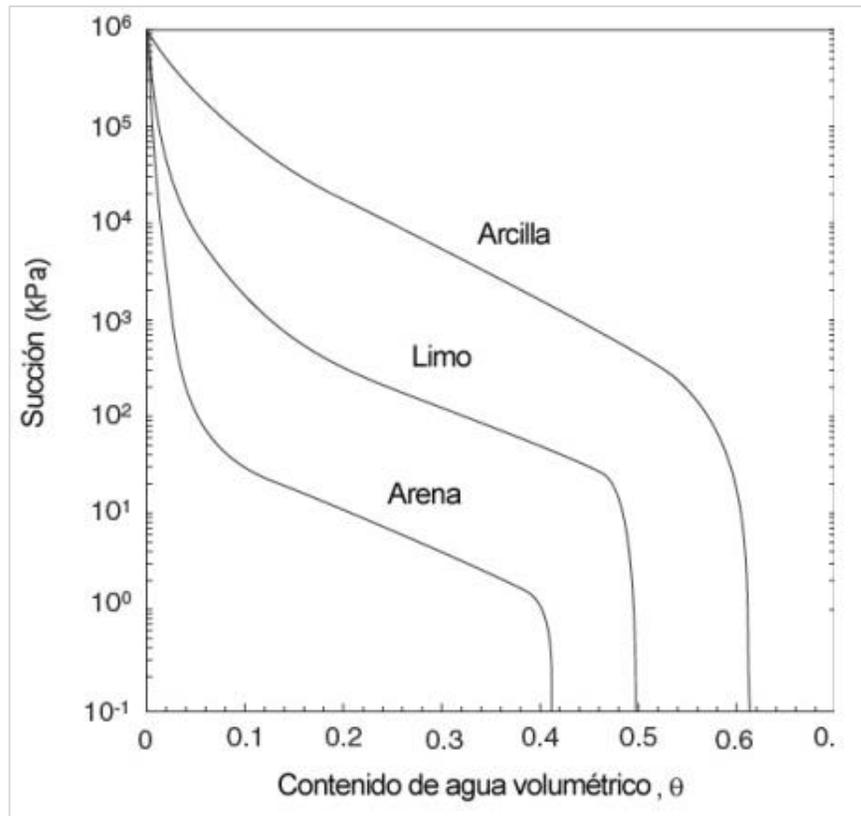


Fuente: MEZA OCHOA, Victoria Elena. *Suelos parcialmente saturados*. p. 8.

En la figura se observa que inicialmente es horizontal, esto significa que el suelo se encuentra saturado. La succión requerida para que el aire entre en los poros más grandes del suelo y se inicie la pérdida de saturación.

En este punto se inicia la zona de transición en la cual existe una interfase aire-agua, pero el agua se encuentra de manera continua. Por último, al seguir disminuyendo el contenido de agua dentro de los poros, se llega al grado de saturación residual. El grado de saturación residual corresponde al contenido de agua para el que, la zona líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados principalmente por aire.

Figura 28. **Curva característica de la succión para diferentes tipos de suelo**



Fuente: MEZA OCHOA, Victoria Elena. *Suelos parcialmente saturados*. p. 8.

### 3.14. Densidad del suelo

El suelo presenta dos razones principales que afectan la densidad:

- Densidad Real, relación de aire-agua en los poros
- Densidad Aparente, disminución del volumen total de los poros

### 3.15. Densidad real

La densidad real se refiere a la relación de la masa (peso), del material sólido y el volumen ocupado por dicho suelo. Se define como:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde:

$\rho_s$ = densidad real

$m_s$ = masa del material solido

$V_s$ = volumen ocupado

La densidad real en un suelo depende principalmente de la composición y la cantidad de minerales, y de la proporción de materia orgánica e inorgánica que contenga.

Tabla VI. **Densidad real en diferentes suelos**

Tipo de suelo	$\rho_s$ (gr/cm <sup>3</sup> )
Arenosos	2,6
Arcillosos	2,4
Orgánicos	2,4 – 1,5

Fuente: BUCKMAN, Harry. y BRADY, Nyle. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. p. 590.

La cantidad contenida de materia orgánica en un suelo afecta marcadamente a la densidad de las partículas. Como consecuencia, los suelos

superficiales poseen generalmente una densidad de partículas más bajas que la del subsuelo.

### 3.16. Densidad aparente

La densidad aparente muestra el contenido total de porosidad en un suelo, refleja la compactación y la facilidad de circulación de agua y aire. Se define como:

$$\rho = \frac{m_t}{V_t} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Dónde:

$\rho$  = densidad aparente

$m_t$  = masa total (sólido, líquido y aire)

$V_t$  = volumen total ocupado

La densidad aparente es una magnitud aplicada en materiales porosos, que forman cuerpos heterogéneos con intersticios de aire u otra sustancia normalmente más ligera, de forma que la densidad total del cuerpo es menor que la densidad del material poroso si se compactase.

Tabla VII. **Densidad aparente en diferentes suelos**

<b>Tipo de suelo</b>	<b><math>\rho</math> (gr/cm<sup>3</sup>)</b>
Arenosos	1,4 -1,7
Arcillosos	1,0 – 1,5
Orgánicos	0,8 -0,9

Fuente: SHOJI & NANZYO. *Volcanic Ash Soils*. p. 288.

La densidad aparente del suelo es un indicador de varias características (porosidad, grado de aireación y capacidad de infiltración), principalmente para calcular la porosidad total del suelo y por ende estudios de relación suelo-agua.

## 4. ENSAYOS TRIAXIALES

El ensayo triaxial es una de las pruebas más confiables para determinar parámetros de esfuerzo-deformación y de resistencia al cortante, como el ángulo de fricción interna y la cohesión del suelo.

La prueba triaxial permite controlar condiciones de consolidación, drenado, presión de confinamiento y de poros; permitiendo mediciones de cambios de volumen y estados de tensión durante ensayo.

Los ensayos se pueden realizar por tres métodos:

### 4.1. Ensayo triaxial No consolidado – No drenado (UU)

ASTM D 2850-3<sup>a</sup> “Standard Test Method for Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.

#### Procedimiento

1. Situar la membrana sobre la tapa o base, y colocar la muestra en la base. Colocar la membrana de caucho alrededor del espécimen y sellarlo en la tapa y la base u otros sellos positivos en cada extremo.
2. Con la muestra encerrada en la membrana, colocar y ensamblar a la cámara triaxial. Cargar el pistón en contacto con la tapa de la muestra varias veces para permitir un asentamiento y alineación adecuados con la tapa. Cuando el pistón se ponga en contacto por última vez, registrar la lectura en el indicador de deformación, tener cuidado de no aplicar una carga axial en el espécimen que exceda aproximadamente el 0,5% de la resistencia a compresión estimada.
3. Posicionar el dispositivo de medición y mantenimiento de presión y llenar la cámara con el líquido de confinamiento. Ajustar la presión del dispositivo a la cámara y aplicar la presión al fluido de la cámara. Espere aproximadamente 10 minutos después de la aplicación de la presión de la cámara para permitir que la

muestra se estabilice bajo la presión de la cámara antes de la aplicación de carga axial.

4. Si el dispositivo de medición de carga axial se encuentra fuera de la cámara triaxial, la presión de la cámara producirá una fuerza hacia arriba sobre el pistón que reaccionará contra el eje del dispositivo de carga. En este caso, comenzar la prueba con el pistón ligeramente por encima de la tapa del espécimen, y antes de que llegue el pistón en contacto con la tapa de la muestra, ya sea: (I) medir y registrar la fricción inicial del pistón y empuje hacia arriba del pistón producido por la presión de la cámara y luego corrija la carga axial medida, o (II) ajuste la carga axial del dispositivo de medición de carga para compensar la fricción y empuje. Si el dispositivo de medición de carga axial está ubicado dentro de la cámara, no será necesario corregir o compensar la fuerza de elevación que actúa sobre el dispositivo de carga axial o para el pistón de fricción. En ambos casos se debe registrar la lectura del indicador de deformación cuando el pistón tiene contacto con la muestra.

5. Se aplica la carga axial para producir deformación axial a una velocidad en los materiales frágiles que logran el máximo esfuerzo de desviación en aproximadamente 3 a 6% de deformación. El tiempo transcurrido para alcanzar el esfuerzo desviador máximo será de aproximadamente 15 a 20 minutos. Continuar la carga al 15% de deformación axial, la carga puede detenerse cuando el esfuerzo del desviador alcance su punto máximo o la carga axial haya alcanzado un 5% más allá de la tensión a la que se produjo el pico en el esfuerzo del desviador.

6. Registrar los valores de carga y deformación aproximadamente 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5% de deformación; se pueden requerir lecturas más frecuentes en las primeras etapas de la prueba.

7. Una vez completa la prueba, retire la muestra de la cámara. Determine el contenido de agua de la muestra.<sup>3</sup>

## 4.2. Ensayo triaxial Consolidado – Drenado (CD)

ASTM D 7181-11 “Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils.

### Procedimiento

1. Antes de la saturación: después de ensamblar la cámara triaxial, realice las siguientes operaciones:

---

<sup>3</sup> Normas ASTM. *ASTM D 2850-3<sup>a</sup> “Standard Test Method for Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. s/p.*

1.1 Ponga el pistón de carga axial en contacto con la cubierta de la muestra varias veces para permitir el asentamiento y la alineación del pistón con la parte superior. Durante este procedimiento, tener cuidado de no aplicar una carga axial a la muestra que exceda el 0.5% de la carga axial estimada en caso de falla. Cuando el pistón entra en contacto, registre la lectura del medidor de deformación.

1.2 Llenar la cámara con el líquido en la cámara, teniendo cuidado de evitar atrapar aire o dejar un espacio de aire en la cámara.

2. Saturación: el objeto de la fase de saturación de la prueba es llenar todos los huecos de la muestra con agua sin un pretensado indeseable de la muestra o permitir que la muestra se hinche. La saturación se logra generalmente aplicando contrapresión al agua de los poros de la muestra para conducir el aire a la solución después de saturar el sistema: (I) aplicando vacío a la muestra y al sistema de drenaje seco (líneas, discos porosos, dispositivos de presión de poro, filtros o jaula y discos) y luego permitir que el agua liberada fluya a través del sistema y se mantenga mientras se mantiene el vacío; (II) saturar el sistema de drenaje sumergiendo los discos porosos en agua y permitiendo que el agua fluya a través del sistema antes de montar la muestra. Cabe señalar que colocar el aire en solución es una función tanto del tiempo como de la presión. En consecuencia, eliminar la mayor cantidad de aire posible antes de aplicar la contrapresión disminuirá la cantidad de aire que deberá colocarse en solución y también disminuirá la contrapresión necesaria para la saturación. Además, el aire que quede en la muestra y el sistema de drenaje justo antes de aplicar la contrapresión entrará en solución mucho más fácilmente si se usa agua desaireada para la saturación. El uso de agua desaireada también disminuirá el tiempo y la contrapresión necesaria para la saturación. Se han desarrollado muchos procedimientos para lograr la saturación. Los siguientes son procedimientos sugeridos:

2.1 Comenzar con un sistema de drenaje inicialmente seco: aumentar el vacío parcial que actúa sobre la muestra hasta el vacío máximo disponible. Si el esfuerzo de consolidación efectivo bajo el cual se determinara la resistencia es menor que el vacío parcial máximo, aplicar un vacío parcial más bajo a la cámara. La diferencia entre el vacío parcial aplicado a la muestra y la cámara nunca debe exceder el esfuerzo de consolidación efectivo para la prueba y no debe ser inferior a 35 KPa (5 lb/in<sup>2</sup>). Después de aproximadamente 10 minutos, permita que el agua desahogada se filtre desde el fondo hasta la parte superior de la muestra.

2.2 Comenzar el sistema de drenaje inicialmente saturado: después de llenar la bureta conectada a la parte superior de la muestra con agua desaireada, aplique una presión de cámara de 35 kPa (5 lb/in<sup>2</sup>) o menos y abra las válvulas de drenaje de la muestra. Cuando la presión de poro en el fondo de la muestra se estabilice, de acuerdo con el método descrito en 2.1, o cuando la lectura de la bureta se estabiliza, su puede iniciar la contrapresión del agua de poro de muestra.

2.3 Aplicación de contrapresión: aumentar simultáneamente la cámara y la contrapresión en pasos con las válvulas de drenaje de la muestra abiertas para que el agua desaireada de la bureta conectada a la parte superior e inferior de la muestra pueda fluir hacia la muestra. Para evitar el pretensado indeseable de la muestra mientras se aplica la contrapresión, las presiones deben darse de forma

incremental con un tiempo adecuado entre los incrementos para permitir la igualación de la presión del agua de poro en toda la muestra. El tamaño de cada incremento puede variar desde 35 kPa (5 lb/in<sup>2</sup>). Se debe realizar un mínimo de tres mediciones de altura (120° de separación y al menos tres mediciones de diámetro en los puntos de un cuarto de la altura para determinar el promedio de altura y diámetro de la muestra hasta 140 kPa (20 lb/in<sup>2</sup>), dependiendo de la magnitud del esfuerzo de consolidación efectivo deseado, y el porcentaje de saturación de la muestra antes de la adición del incremento. La diferencia entre la presión de la cámara y la contrapresión durante la contrapresión no debe exceder los 35 kPa a menos que se considere necesario para controlar la hinchazón de la muestra durante el procedimiento. La diferencia entre la cámara y la contrapresión también debe permanecer dentro del 5% cuando las presiones aumentan y dentro de 2% cuando las presiones son constantes. Para verificar las ecuaciones después de la aplicación de un incremento de contrapresión o después de que se haya aplicado el valor total de la contrapresión, cierre las válvulas de drenaje de la muestra y mida el cambio en la presión de los poros durante un intervalo de 1 minuto. Si el cambio en la presión de poro es inferior al 5% de la diferencia entre la presión de la cámara y la presión de retroceso, se puede agregar otro incremento de contrapresión o se puede tomar una medida de la presión de poro (parámetro B, ver 2.4) para determinar si se completa la saturación. Las muestras se consideran saturadas si el valor de B es igual o mayor a 0.95, o si B permanece sin cambios con la adición de incrementos de contrapresión.

2.4 Medición del parámetro de presión de poro B: el valor del parámetro de presión de poro se debe determinar de acuerdo con 2.4.1 a 2.4.4. El parámetro de presión de poro B se define mediante la siguiente ecuación:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Dónde:

$\Delta u$  = cambio en la presión de poro de la muestra que se produce como resultado de un cambio en la presión de la cámara cuando las válvulas de drenaje de la muestra están cerradas, y

$\Delta \sigma_3$  = cambio isotrópico en la presión de la cámara.

2.4.1 Cerrar las válvulas de drenaje de la muestra, registrar la presión de corte y aumente la presión de la cámara. Comúnmente, se usa un aumento de 70 kPa (10 lb/in<sup>2</sup>).

2.4.2 Después de aproximadamente 2 minutos, determinar y registrar el valor máximo de la presión de poro inducida. Para varias muestras, la presión de poro puede disminuir después de la respuesta inmediata y luego aumentar ligeramente con el tiempo. Si esto ocurre los valores de  $\Delta u$  deben trazarse con el tiempo y la presión de poro asintótica utilizada con el cambio en la presión de poro. Un gran aumento de  $\Delta u$  con el tiempo o valores de  $\Delta u$  mayores que  $\Delta \sigma_3$  indican una fuga de fluido de la cámara en la muestra. La disminución de los valores de  $\Delta u$  con el tiempo puede indicar una fuga en esa parte del sistema de medición de la presión de poro ubicada fuera de la cámara.

2.4.3 Calcular el valor de B utilizando la ecuación 8.

2.4.4 Vuelva a aplicar el mismo esfuerzo de consolidación efectivo que existía antes del valor B reduciendo la presión de la cámara, alternamente, aumentando

la contrapresión. Si  $B$ , continúa aumentando con el aumento de la contrapresión, continuar con la saturación de la contrapresión. Si  $B$  es igual o mayor que 0.95 o si una gráfica de  $B$  versus presión de retroceso indica que no hay más aumento en  $B$  al aumentar la presión de retroceso, inicie la consolidación.

3. Consolidación: el objetivo de la fase de consolidación de la prueba es permitir que la muestra alcance el equilibrio en un estado drenado en el esfuerzo de consolidación efectivo para el que se requiere una determinación de resistencia. Durante la consolidación, se obtienen datos para determinar cuándo se completa la consolidación y para calcular una tasa de deformación que se utilizara para la parte de corte de la prueba. El procedimiento de consolidación es el siguiente:

3.1 Cuando se complete la fase de saturación de la prueba, ponga el pistón de carga axial en contacto con la tapa de la muestra y registre la lectura en el indicador de deformación. Durante este procedimiento, tenga cuidado de no aplicar una carga axial a la muestra que exceda el 0.5% de la carga axial estimada en caso de falla. Después de registrar la lectura, levante el pistón una pequeña distancia por encima de la tapa de la muestra y bloquee el pistón en su lugar.

3.2 Con las válvulas de drenaje de muestras cerradas, mantenga constante la contrapresión máxima y aumente la presión de la cámara hasta que la diferencia entre la presión de la cámara y la contrapresión sea igual a la presión de consolidación efectiva deseada. Se puede realizar la consolidación a las condiciones finales de tensión. Si se está monitoreando continuamente la deformación  $d$ , se deben aplicar cargas al pistón para mantenerlo en contacto con la tapa de la muestra.

3.3 Obtenga una lectura inicial en el dispositivo de cambio de volumen, y, luego, abra las válvulas de drenaje apropiadas para que la muestra pueda drenar desde ambos extremos hacia el dispositivo de cambio de volumen. A intervalos crecientes de tiempo transcurrido (0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos y a 1, 2, 4 y 8 horas, y así sucesivamente) observe y registre las lecturas de cambio de volumen, y, si aún no lo ha hecho después de la lectura de 15 minutos, registre las lecturas del indicador de deformación que se obtienen al colocar cuidadosamente el pistón en contacto con la tapa de la muestra. Si las lecturas del indicador de cambio de volumen y deformación se van a trazar contra la raíz cuadrada del tiempo, los intervalos de tiempo en los que se toman las lecturas se pueden ajustar a aquellos que han obtenido raíces cuadradas fácilmente, por ejemplo, 0.09, 0.25, 0.49, 1, 4 y 9 minutos, y así sucesivamente. Dependiendo del tipo de suelo, los intervalos de tiempo convenientes que permiten una definición adecuada de cambio de volumen versus tiempo.

3.4 Grafique las lecturas del indicador de cambio de volumen y deformación versus el logaritmo o la raíz cuadrada del tiempo transcurrido. Permita que la consolidación continúe durante al menos un ciclo de registro o un periodo de una noche después de que se haya logrado una consolidación primaria del 100%. Una desviación marcada entre las pendientes de cambio de volumen y las curvas del indicado de deformación hacia el final de la consolidación basadas en las lecturas del indicador de deformación indican una fuga de fluidos de la cámara al espécimen, y la prueba debe finalizar. El grafico también se puede utilizar para determinar  $t_{50}$  o  $t_{90}$ .

4. Cizallamiento: durante el cizallamiento, la presión de la cámara se mantendrá constante mientras se avanza el pistón de carga axial hacia abajo contra la tapa de muestra utilizando la deformación axial controlada como criterio de carga. Se permite el drenaje de muestras durante el corte, y los cambios de volumen se leerán en la bureta. La falla se alcanza lentamente para que el exceso de presión de poro se disipe en condiciones de drenaje.

4.1 Antes de la carga axial: antes de iniciar el corte, realice lo siguiente:

4.1.1 Coloque la cámara en posición en el dispositivo de carga axial. Tenga cuidado de alinear el dispositivo de carga axial, el dispositivo de medición de carga axial y la cámara triaxial para evitar la aplicación de una fuerza lateral al pistón durante el corte.

4.1.2 Ponga el pistón de carga axial en contacto con la tapa del espécimen para permitir el asentamiento y la realineación adecuados del pistón tomando para no aplicar una carga axial a la muestra que excede 0.5% de la carga axial estimada en la falla. Si el dispositivo de medición de carga axial está ubicado fuera de la cámara triaxial, la presión de la cámara producirá una fuerza hacia arriba sobre el pistón que reaccionará contra el dispositivo de carga axial. En este caso comience a cortar con el pistón ligeramente por encima de la tapa de la muestra, y antes de que el pistón entre en contacto con la tapa de la muestra, (1) medir y registrar la fricción inicial del pistón y el empuje hacia arriba del pistón producido por la presión de la cámara y luego corrija la carga axial medida o (2) ajustar el dispositivo de medición de carga axial para compensar la fricción y el empuje. La variación en la carga axial durante este procedimiento, se debe tener cuidado al medir que la lectura del dispositivo no debe exceder el 0.1% de la carga de falla estimada cuando el pistón se mueve hacia abajo antes de tocar la tapa de la muestra. Si el dispositivo de medición de carga axial está ubicado dentro de la cámara no será necesario corregir o compensar la fuerza de elevación que actúa sobre el dispositivo de carga axial o la fricción del pistón. Sin embargo, si se usa un dispositivo interno de medición de carga de flexibilidad significativa en combinación con un indicador de deformación externo, puede ser necesaria la corrección de las lecturas de deformación. En ambos casos, registre la lectura inicial en el dispositivo de medición de la presión inmediatamente antes de que el pistón contacte la tapa de la muestra y la lectura en el indicador de deformación cuando el pistón entra en contacto con la tapa de la muestra.

4.1.3 Verifique la estabilización de la presión de poro. Registrar la presión de poro. Cerrar las válvulas de drenaje de la muestra y mida el cambio hasta que esté estable. Si el cambio es inferior al 5% de la tensión efectiva, se puede suponer que la presión de poro está estabilizada.

4.2 Carga axial: Abra las válvulas de drenaje antes de aplicar la carga axial para disipar el exceso de presión de poro en toda la muestra en caso de falla. Determinar la tasa de carga que permitirá que se disipe la presión de poro. Asumiendo que ocurrirá una falla después del 4%, se puede determinar una tasa adecuada de deformación,  $\dot{\epsilon}$ , a partir de la siguiente ecuación:

Con drenaje lateral

$$\dot{\epsilon} = \frac{4\%}{16 t_{90}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Sin drenaje lateral

$$\dot{\epsilon} = \frac{4\%}{10 t_{90}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Dónde:

$t_{90}$  = valor de tiempo obtenido en 3.4

Si, sin embargo, se estima que la falla ocurrirá a un valor de deformación diferente al 4%, se puede determinar una tasa de deformación adecuada utilizando la ecuación 9 reemplazando el 4% con la deformación de falla estimada. Esta tasa de deformación permitirá que la muestra acumule una presión de poro mínima durante el cizallamiento.

4.2.1 Como mínimo, registre la carga, la deformación, y cambio de volumen en incrementos de 0.1% de deformación hasta 1% de deformación y, a partir de entonces, en cada 1%. Tomar suficientes lecturas para definir la curva de esfuerzo-deformación; por lo tanto, se pueden requerir lecturas más frecuentes en las primeras etapas de la prueba y a medida que se aborda el fracaso. Continuar la carga al 15% de tensión, excepto que la carga puede detenerse cuando la diferencia de tensión principal (tensión del desviador) ha caído un 20% o cuando se produce una tensión axial adicional del 5% después de un pico en la diferencia de tensión principal (tensión del desviador).<sup>4</sup>

### 4.3. Ensayo triaxial Consolidado – No drenado (CU)

ASTM D 4767-02 “Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.

#### Procedimiento

1. Antes de la saturación: después de ensamblar la cámara triaxial, realice las siguientes operaciones:

1.1 Ponga el pistón de carga axial en contacto con la cubierta de la muestra varias veces para permitir el asentamiento y la alineación del pistón con la parte superior. Durante este procedimiento, tener cuidado de no aplicar una carga axial a la muestra que exceda el 0.5% de la carga axial estimada en caso de falla. Cuando el pistón entra en contacto, registre la lectura del medidor de deformación.

1.2 Llenar la cámara con el líquido en la cámara, teniendo cuidado de evitar atrapar aire o dejar un espacio de aire en la cámara.

2. Saturación: el objeto de la fase de saturación de la prueba es llenar todos los huecos de la muestra con agua sin un pretensado indeseable de la muestra o permitir que la muestra se hinche. La saturación se logra generalmente aplicando contrapresión al agua de los poros de la muestra para conducir el aire a

---

<sup>4</sup> Normas ASTM. *ASTM D 7181-11 “Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils.* s/p.

la solución después de saturar el sistema: (I) aplicando vacío a la muestra y al sistema de drenaje seco (líneas, discos porosos, dispositivos de presión de poro, filtros o jaula y discos) y luego permitir que el agua liberada fluya a través del sistema y se mantenga mientras se mantiene el vacío; (II) saturar el sistema de drenaje sumergiendo los discos porosos en agua y permitiendo que el agua fluya a través del sistema antes de montar la muestra. Cabe señalar que colocar el aire en solución es una función tanto del tiempo como de la presión. En consecuencia, eliminar la mayor cantidad de aire posible antes de aplicar la contrapresión disminuirá la cantidad de aire que deberá colocarse en solución y también disminuirá la contrapresión necesaria para la saturación. Además, el aire que quede en la muestra y el sistema de drenaje justo antes de aplicar la contrapresión entrará en solución mucho más fácilmente si se usa agua desaireada para la saturación. El uso de agua desaireada también disminuirá el tiempo y la contrapresión necesaria para la saturación. Se han desarrollado muchos procedimientos para lograr la saturación. Los siguientes son procedimientos sugeridos:

2.1 Comenzar con un sistema de drenaje inicialmente seco: aumentar el vacío parcial que actúa sobre la muestra hasta el vacío máximo disponible. Si el esfuerzo de consolidación efectivo bajo el cual se determinara la resistencia es menor que el vacío parcial máximo, aplicar un vacío parcial más bajo a la cámara. La diferencia entre el vacío parcial aplicado a la muestra y la cámara nunca debe exceder el esfuerzo de consolidación efectivo para la prueba y no debe ser inferior a 35 kPa (5 lb/in<sup>2</sup>) después de aproximadamente 10 minutos, permita que el agua desahogada se filtre desde el fondo hasta la parte superior de la muestra bajo un vacío diferencia de menos de 20 kPa (3 lb/in<sup>2</sup>).

2.2 Comenzar el sistema de drenaje inicialmente saturado: después de llenar la bureta conectada a la parte superior de la muestra con agua desaireada, aplique una presión de cámara de 35 kPa (5 lb/in<sup>2</sup>) o menos y abra las válvulas de drenaje de la muestra. Cuando la presión de poro en el fondo de la muestra se estabilice, de acuerdo con el método descrito en 2.1, o cuando la lectura de la bureta se estabiliza, su puede iniciar la contrapresión del agua de poro de muestra.

2.3 Aplicación de contrapresión: aumentar simultáneamente la cámara y la contrapresión en pasos con las válvulas de drenaje de la muestra abiertas para que el agua desaireada de la bureta conectada a la parte superior e inferior de la muestra pueda fluir hacia la muestra. Para evitar el pretensado indeseable de la muestra mientras se aplica la contrapresión, las presiones deben darse de forma incremental con un tiempo adecuado entre los incrementos para permitir la igualación de la presión del agua de poro en toda la muestra. El tamaño de cada incremento puede variar desde 35 kPa (5 lb/in<sup>2</sup>) hasta 140 kPa (20 lb/in<sup>2</sup>), dependiendo de la magnitud del esfuerzo de consolidación efectivo deseado, y el porcentaje de saturación de la muestra antes de la adición del incremento. La diferencia entre la presión de la cámara y la contrapresión durante la contrapresión no debe exceder los 35 kPa a menos que se considere necesario para controlar la hinchazón de la muestra durante el procedimiento. La diferencia entre la cámara y la contrapresión también debe permanecer dentro del 5% cuando las presiones aumentan y dentro de 2% cuando las presiones son constantes. Para verificar las ecuaciones después de la aplicación de un incremento de contrapresión o después de que se haya aplicado el valor total de la contrapresión, cierre las

válvulas de drenaje de la muestra y mida el cambio en la presión de los poros durante un intervalo de 1 minuto. Si el cambio en la presión de poro es inferior al 5% de la diferencia entre la presión de la cámara y la presión de retroceso, se puede agregar otro incremento de contrapresión o se puede tomar una medida de la presión de poro (parámetro B, ver 2.4) para determinar si se completa la saturación. Las muestras se consideran saturadas si el valor de B es igual o mayor a 0.95, o si B permanece sin cambios con la adición de incrementos de contrapresión.

2.4 Medición del parámetro de presión de poro B: el valor del parámetro de presión de poro se debe determinar de acuerdo con 2.4.1 a 2.4.4. El parámetro de presión de poro B se define mediante la siguiente ecuación:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Dónde:

$\Delta u$  = cambio en la presión de poro de la muestra que se produce como resultado de un cambio en la presión de la cámara cuando las válvulas de drenaje de la muestra están cerradas, y

$\Delta \sigma_3$  = cambio en la presión de la cámara.

2.4.1 Cerrar las válvulas de drenaje de la muestra, registrar la presión al 0.7 kPa (0.1 psi) más cercano y aumente la presión de la cámara en 70 kPa (10 lb/in<sup>2</sup>).

2.4.2 Después de aproximadamente 2 minutos, determinar y registrar el valor máximo de la presión de poro inducida al 0.7 kPa más cercano (0.1 psi). Para varias muestras, la presión de poro puede disminuir después de la respuesta inmediata y luego aumentar ligeramente con el tiempo. Si esto ocurre los valores de  $\Delta u$  deben trazarse con el tiempo y la presión de poro asintótica utilizada con el cambio en la presión de poro. Un gran aumento de  $\Delta u$  con el tiempo o valores de  $\Delta u$  mayores que  $\Delta \sigma_3$  indican una fuga de fluido de la cámara en la muestra. La disminución de los valores de  $\Delta u$  con el tiempo puede indicar una fuga en esa parte del sistema de medición de la presión de poro ubicada fuera de la cámara.

2.4.3 Calcular el valor de B utilizando la ecuación 11.

2.4.4 Vuelva a aplicar el mismo esfuerzo de consolidación efectivo que existía antes del valor B reduciendo la presión de la cámara en 70 kPa (10 lb/in<sup>2</sup>) o, alternamente, aumentando la contrapresión en 70 kPa. Si B, continúa aumentando con el aumento de la contrapresión, continuar con la saturación de la contrapresión. Si B es igual o mayor que 0.95 o si una gráfica de B versus presión de retroceso indica que no hay más aumento en B al aumentar la presión de retroceso, inicie la consolidación.

3. Consolidación: el objetivo de la fase de consolidación de la prueba es permitir que la muestra alcance el equilibrio en un estado drenado en el esfuerzo de consolidación efectivo para el que se requiere una determinación de resistencia. Durante la consolidación, se obtienen datos para determinar cuándo se completa la consolidación y para calcular una tasa de deformación que se utilizara para la parte de corte de la prueba. El procedimiento de consolidación es el siguiente:

3.1 Cuando se complete la fase de saturación de la prueba, ponga el pistón de carga axial en contacto con la tapa de la muestra y registre la lectura en el indicador de deformación en tres dígitos significativos. Durante este procedimiento, tenga cuidado de no aplicar una carga axial a la muestra que exceda el 0.5% de la carga axial estimada en caso de falla. Después de registrar la lectura, levante el pistón una pequeña distancia por encima de la tapa de la muestra y bloquee el pistón en su lugar.

3.2 Con las válvulas de drenaje de muestras cerradas, mantenga constante la contrapresión máxima y aumente la presión de la cámara hasta que la diferencia entre la presión de la cámara y la contrapresión sea igual a la presión de consolidación efectiva deseada. Se requiere la consolidación en etapas cuando se usan tiras de filtro para drenaje radial, y la relación de incremento de carga no debe exceder dos.

3.3 Obtenga una lectura inicial de la bureta y, luego, abra las válvulas de drenaje apropiadas para que la muestra pueda drenar desde ambos extremos hacia la bureta. A intervalos crecientes de tiempo transcurrido (0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos y a 1, 2, 4 y 8 horas, y así sucesivamente) observe y registre las lecturas de la bureta, y, después de la lectura de 15 minutos, registre las lecturas del indicador de deformación que se obtienen al colocar cuidadosamente el pistón en contacto con la tapa de la muestra. Si las lecturas del indicador de bureta y deformación se van a trazar contra la raíz cuadrada del tiempo, los intervalos de tiempo en los que se toman las lecturas se pueden ajustar a aquellos que han obtenido raíces cuadradas fácilmente, por ejemplo, 0.09, 0.25, 0.49, 1, 4 y 9 minutos, y así sucesivamente. Dependiendo del tipo de suelo, los intervalos de tiempo convenientes que permiten una definición adecuada de cambio de volumen versus tiempo.

3.4 Grafique las lecturas del indicador de bureta y deformación versus el logaritmo o la raíz cuadrada del tiempo transcurrido. Permita que la consolidación continúe durante al menos un ciclo de registro o un periodo de una noche después de que se haya logrado una consolidación primaria del 100%. Una desviación marcada entre las pendientes de la bureta y las curvas del indicado de deformación hacia el final de la consolidación basadas en las lecturas del indicador de deformación indican una fuga de fluidos de la cámara al espécimen, y la prueba debe finalizar.

3.5 Determine el tiempo para la consolidación primaria del 50%, de acuerdo con uno de los procedimientos descritos en el método de prueba D 2435.

4. Cizallamiento: durante el cizallamiento, la presión de la cámara se mantendrá constante mientras se avanza el pistón de carga axial hacia abajo contra la tapa de muestra utilizando tensión axial controlada como criterio de carga. No se permite el drenaje de muestras durante el corte.

4.1 Antes de la carga axial: antes de iniciar el corte, realice lo siguiente:

4.1.1 Al abrir o cerrar las válvulas apropiadas, aislé la muestra de modo que durante el corte se mida la presión de agua de poro de la muestra con el dispositivo de medición de presión de poro y no se producirá drenaje.

4.1.2 Coloque la cámara en posición en el dispositivo de carga axial. Tenga cuidado de alinear el dispositivo de carga axial, el dispositivo de medición de carga axial y la cámara triaxial para evitar la aplicación de una fuerza lateral al pistón durante el corte.

4.1.3 Ponga el pistón de carga axial en contacto con la tapa del espécimen para permitir el asentamiento y la realineación adecuados del pistón tomando para no aplicar una carga axial a la muestra que excede 0.5% de la carga axial estimada en la falla. Si el dispositivo de medición de carga axial está ubicado fuera de la cámara triaxial, la presión de la cámara producirá una fuerza hacia arriba sobre el pistón que reaccionará contra el dispositivo de carga axial. En este caso comience a cortar con el pistón ligeramente por encima de la tapa de la muestra, y antes de que el pistón entre en contacto con la tapa de la muestra, (1) medir y registrar la fricción inicial del pistón y el empuje hacia arriba del pistón producido por la presión de la cámara y luego corrija la carga axial medida o (2) ajustar el dispositivo de medición de carga axial para compensar la fricción y el empuje. La variación en la carga axial durante este procedimiento, se debe tener cuidado al medir que la lectura del dispositivo no debe exceder el 0.1% de la carga de falla estimada cuando el pistón se mueve hacia abajo antes de tocar la tapa de la muestra. Si el dispositivo de medición de carga axial está ubicado dentro de la cámara no será necesario corregir o compensar la fuerza de elevación que actúa sobre el dispositivo de carga axial o la fricción del pistón. Sin embargo, si se usa un dispositivo interno de medición de carga de flexibilidad significativa en combinación con un indicador de deformación externo, puede ser necesaria la corrección de las lecturas de deformación. En ambos casos, registre la lectura inicial en el dispositivo de medición de la presión 0.7 kPa (0.1 psi) más cercano inmediatamente antes de que el pistón contacte la tapa de la muestra y la lectura en el indicador de deformación a tres dígitos significativos cuando el pistón entra en contacto con la tapa de la muestra.

4.1.4 Verifique la estabilización de la presión de poro. Registrar la presión de poro al 0.7 kPa más cercano. Cerrar las válvulas de drenaje de la muestra y mida el cambio hasta que esté estable. Si el cambio es inferior al 5% de la presión de la cámara, se puede suponer que la presión de poro está estabilizada.

4.2 Carga axial: aplicar carga axial a la muestra utilizando una tasa de deformación axial que producirá una igualación aproximada de las presiones de poro en toda la muestra en caso de falla. Asumiendo que ocurrirá una falla después del 4%, se puede determinar una tasa adecuada de deformación,  $\dot{\epsilon}$ , a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{\epsilon} = 4\% (10 t_{50}) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Dónde:

$t_{50}$  = valor de tiempo obtenido en 3.5

Si, sin embargo, se estima que la falla ocurrirá a un valor de deformación inferior al 4%, se puede determinar una tasa de deformación adecuada utilizando la ecuación 12 reemplazando el 4% con la deformación de falla estimada. Esta tasa de deformación proporcionará la determinación de rutas de tensión efectivas precisas en el rango necesario para definir envolturas de resistencia efectiva.

4.2.1 Como mínimo, registre la carga y la deformación en tres dígitos significativos, y los valores de presión de agua de poro al 0.7 kPa (0.1 psi) más cercano, en incrementos de 0.1 a 1% de deformación y, a partir de entonces, en cada 1%. Tomar suficientes lecturas para definir la curva de esfuerzo-deformación; por lo tanto, se pueden requerir lecturas más frecuentes en las primeras etapas de la prueba y a medida que se aborda el fracaso. Continuar la carga al 15% de tensión, excepto que la carga puede detenerse cuando la diferencia de tensión principal (tensión del desviador) ha caído un 20% o cuando se produce una tensión axial adicional del 5% después de un pico en la diferencia de tensión principal (tensión del desviador).<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Normas ASTM. *ASTM D 4767-02 "Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive.* s/p.

## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 5.1. Equipo de ensayos triaxiales

La prueba triaxial se realiza con diferentes equipos necesarios para los procedimientos, tomando en cuenta el correcto conocimiento y manejo de los mismos. A continuación, se muestra el equipo a utilizar en los ensayos:

Figura 29. **Cámara de compresión triaxial**



Fuente: HUMBOLTD. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 77.

Figura 30. **Indicador de deformación**



Fuente: HUMBOLDT. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 83.

Figura 31. **Dispositivo de presión y medición de vacíos**



Fuente: HUMBOLDT. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 75.

Figura 32. **Tanque Desaireador de agua**



Fuente: HUMBOLDT. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 76.

Figura 33. **Membrana de látex**



Fuente: HUMBOLDT. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 79.

Figura 34. **Papel filtro**



Fuente: HUMBOLTD. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 79.

Figura 35. **Disco poroso**



Fuente: HUMBOLTD. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 79.

Figura 36. **Aros de goma para sellar**



Fuente: HUMBOLTD. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 79.

Figura 37. **Dispositivo de medición de poro**



Fuente: HUMBOLTD. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 76.

Figura 38. **Compresor de aire**



Fuente: HUMBOLTD. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 75.

Figura 39. **Bomba de vacíos**



Fuente: HUMBOLTD. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 75.

Figura 40. **Tapa y base de la muestra**



Fuente: HUMBOLTD. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 79.

Figura 41. **Equipo para tallar la muestra**



Fuente: HUMBOLTD. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012.* p. 78.

## 5.2. Materiales para ensayos triaxiales

Para los ensayos triaxiales se recopilieron muestras de suelo de distintos lugares donde se tenía conocimiento de la existencia de suelo cohesivo, se tomaron 3 diferentes suelos los cuales se describen a continuación:

- Suelos 1: lugar Hacienda Nueva, San José Pínula, Ruta nacional 18; muestra extraída a 1.50 metros de profundidad desde la superficie del suelo. Descripción del suelo: Arena limosa color café claro.

Figura 42. **Suelo 1**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Suelo 2: lugar 11 avenida 8-75 zona 10, Ciudad de Guatemala; muestra extraída a 2.50 metros de profundidad desde la superficie del suelo. Descripción del suelo: Arena arcillosa color café oscuro.

Figura 43. **Suelo 2**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Suelo 3: lugar 10<sup>a</sup>. Calle, Colonia El Compromiso, zona 3, Mazatenango, Suchitepéquez; muestra extraída a 3.30 metros de profundidad desde la superficie del suelo. Descripción del suelo: Arena arcillosa color café amarillento.

Figura 44. **Suelo 3**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

### 5.3. **Datos obtenidos de ensayos triaxiales**

Los siguientes datos se obtienen de los ensayos triaxiales realizados en laboratorio para los correspondientes cálculos de parámetros definidos.

Tabla VIII. **Datos de humedad de la muestra 1 (suelo 1)**

PNH	619,67 g
PNS	539,99 g
DIF.	79,68 g
Porcentaje H	14,76

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla IX. **Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 1)**

Presión de confinamiento $\sigma_3$ T/m <sup>2</sup>	Lectura deform. 0.001"	Lectura Carga X	$\epsilon$ porcentaje	F Kg	Factor K	$\sigma$ T/m <sup>2</sup>	q <sub>máx.</sub> T/m <sup>2</sup>
5	0	0	0,0	-1,880	0,316	- 0,594	4,70
5	5	2	0,1	7,459	0,315	2,35	6,17
5	10	3	0,2	12,128	0,315	3,82	6,91
5	15	5	0,3	21,467	0,315	6,76	8,38
5	20	7	0,4	30,807	0,314	9,67	9,84
5	25	10	0,5	44,815	0,314	14,07	12,04
5	50	22	1,0	100,851	0,313	31,57	20,78
5	75	28	1,5	128,868	0,311	40,08	25,04
5	100	33	2,0	152,216	0,310	47,19	28,59
5	125	32	2,5	147,547	0,308	45,44	27,72
5	150	31	3,0	142,877	0,306	43,72	26,86
10	175	39	3,5	180,234	0,305	54,97	37,49
10	200	41	4,0	189,573	0,303	57,44	38,72
10	225	42	4,5	194,243	0,302	58,66	39,33
20	250	53	5,0	245,608	0,300	73,68	56,84
20	275	57	5,5	264,287	0,299	79,02	59,51
20	300	59	6,0	273,626	0,297	81,27	60,63
20	325	60	6,5	278,295	0,295	82,10	61,05

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla X. **Datos de humedad de la muestra 2 (suelo 1)**

PNH	743,32 g
PNS	593,17 g
DIF.	150,15 g
Porcentaje H	25,31

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XI. Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 1)

Presión de confinamiento $\sigma_3$ T/m <sup>2</sup>	Lectura deform. 0.001"	Lectura Carga X	$\epsilon$ porcentaje	F Kg	Factor K	$\sigma$ T/m <sup>2</sup>	Q <sub>máx.</sub> T/m <sup>2</sup>
5	0	0	0,0	-1,880	0,316	0,594	4,70
5	5	2	0,1	7,459	0,315	2,35	6,17
5	10	5	0,2	21,467	0,315	6,76	8,38
5	15	7	0,3	30,807	0,315	9,70	9,85
5	20	10	0,4	44,815	0,314	14,07	12,04
5	25	12	0,5	54,155	0,314	17,00	13,50
5	50	17	1,0	77,503	0,313	24,26	17,13
5	75	20	1,5	91,511	0,311	28,46	19,23
5	100	23	2,0	105,520	0,310	32,71	21,36
5	125	24	2,5	110,190	0,308	33,94	21,97
5	150	25	3,0	114,859	0,306	35,15	22,57
10	175	28	3,5	128,868	0,305	39,30	29,65
10	200	29	4,0	133,538	0,303	40,46	30,23
10	225	30	4,5	138,207	0,302	41,74	30,87
20	250	32	5,0	147,547	0,300	44,26	42,13
20	275	34	5,5	156,886	0,299	46,91	43,45
20	300	35	6,0	161,555	0,297	47,98	43,99
20	325	36	6,5	166,225	0,295	49,04	44,52
20	350	37	7,0	170,895	0,294	50,24	45,12
20	375	38	7,5	175,564	0,292	51,26	45,63

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XII. **Datos de humedad de la muestra 2 (suelo 1)**

PNH	688,31 g
PNS	515,39g
DIF.	172,92 g
Porcentaje H	33,55

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XIII. **Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 3 (suelo 1)**

Presión de confinamiento $\sigma_3$ T/m <sup>2</sup>	Lectura deform. 0.001"	Lectura Carga X	$\epsilon$ Porcentaje	F Kg	Factor K	$\sigma$ T/m <sup>2</sup>	q <sub>máx.</sub> T/m <sup>2</sup> .
5	0	0	0,0	-8,34	0,316	-2,64	3,68
5	5	9	0,1	4,89	0,315	1,54	5,77
5	10	15	0,2	13,71	0,315	4,32	7,16
5	15	19	0,3	19,59	0,315	6,17	8,09
5	20	24	0,4	26,94	0,314	8,46	9,23
5	25	28	0,5	32,82	0,314	10,31	10,15
5	50	39	1,0	48,99	0,313	15,33	12,67
5	75	44	1,5	56,34	0,311	17,52	13,76
5	100	45	2,0	57,81	0,310	17,92	13,96
5	125	47	2,5	60,75	0,308	18,71	14,36
5	150	49	3,0	63,69	0,306	19,49	14,74
5	175	50	3,5	65,16	0,305	19,87	14,94
10	200	55	4,0	72,51	0,303	21,97	20,99
10	225	58	4,5	76,92	0,302	23,23	21,61
10	250	59	5,0	78,39	0,300	23,52	21,76
10	275	61	5,5	81,33	0,299	24,32	22,16
10	300	63	6,0	84,27	0,297	25,03	22,51
10	325	65	6,5	87,21	0,295	25,73	22,86
10	350	67	7,0	90,15	0,294	26,50	23,38
10	375	68	7,5	91,62	0,292	26,75	23,25
10	400	69	8,0	93,09	0,291	27,09	23,54
20	425	71	8,5	96,03	0,289	27,75	33,88

Continuación de la tabla XIII.

20	450	76	9,0	103,38	0,288	29,77	34,89
20	475	79	9,5	107,79	0,286	30,83	35,41
20	500	82	10,0	112,20	0,284	31,86	35,93
20	525	84	10,5	115,14	0,283	32,58	36,29
20	550	86	11,0	118,08	0,281	33,18	36,59
20	575	88	11,5	121,02	0,280	33,89	36,94
20	600	90	12,0	123,96	0,278	34,46	37,23
20	625	92	12,5	126,90	0,276	35,02	37,51
20	650	93	13,0	128,37	0,275	35,30	37,65

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XIV. **Datos de humedad de la muestra 1 (suelo 2)**

PNH	591,37 g
PNS	459,38 g
DIF.	131,99 g
Porcentaje H	28,73

Fuente: elaboración propia con base en resultados del ensayo.

Tabla XV. **Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 2)**

Presión de confinamiento $\sigma_3$ T/m <sup>2</sup>	Lectura deform. 0.001"	Lectura Carga X	$\epsilon$ Porcentaje	F Kg	Factor K	$\sigma$ T/m <sup>2</sup>	Q <sub>máx.</sub> T/m <sup>2</sup> .
5	0	0	0,0	-1,880	0,316	-0,59	4,70
5	5	5	0,1	21,468	0,315	6,76	8,38
5	10	8	0,2	35,477	0,315	11,18	10,59
5	15	10	0,3	44,816	0,315	14,12	12,06
5	20	13	0,4	58,825	0,315	18,47	14,24
5	25	15	0,5	68,164	0,314	21,40	15,70
5	50	24	1,0	110,190	0,313	34,49	22,24
5	75	30	1,5	138,208	0,311	42,98	26,49
5	100	33	2,0	152,217	0,310	47,19	28,59

Continuación de la tabla XV.

5	125	33	2,5	152,217	0,308	46,88	28,44
5	150	33	3,0	152,217	0,306	46,58	28,29
10	175	36	3,5	166,226	0,305	50,70	35,35
10	200	37	4,0	170,895	0,303	51,78	35,89
10	225	38	4,5	175,565	0,302	53,02	36,51
10	250	38	5,0	175,565	0,300	52,67	36,33
20	275	45	5,5	208,252	0,299	62,27	51,13
20	300	48	6,0	222,261	0,297	66,01	53,01
20	325	50	6,5	231,600	0,295	68,32	54,16
20	350	51	7,0	236,270	0,294	69,46	54,73
20	375	51	7,5	236,270	0,292	68,99	54,50

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XVI. **Datos de humedad de la muestra 2 (suelo 2)**

PNH	527,90 g
PNS	388,17 g
DIF.	139,73 g
Porcentaje H	36,00

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XVII. **Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 2)**

Presión de confinamiento $\sigma_3$ T/m <sup>2</sup>	Lectura deform. 0.001"	Lectura Carga X	$\epsilon$ Porcentaje	F Kg	Factor K	$\sigma$ T/m <sup>2</sup>	q <sub>máx.</sub> T/m <sup>2</sup> .
5	0	0	0,0	-1,880	0,316	-0,594	4,70
5	5	2	0,1	7,459	0,315	2,35	6,17
5	10	3	0,2	12,129	0,315	3,82	6,91
5	15	4	0,3	16,798	0,315	5,29	7,65

Continuación de la tabla XVII.

5	20	5	0,4	21,468	0,314	6,74	8,37
5	25	6	0,5	26,138	0,314	8,21	9,10
5	50	8	1,0	35,477	0,313	11,10	10,55
5	75	10	1,5	44,816	0,311	13,94	11,97
5	100	11	2,0	49,486	0,310	15,34	12,67
10	125	12	2,5	54,155	0,308	16,68	18,34
10	150	14	3,0	63,494	0,306	19,43	19,71
10	175	15	3,5	68,164	0,305	20,79	20,39
10	200	15	4,0	68,164	0,303	20,65	20,33
20	225	16	4,5	72,834	0,302	22,00	31,00
20	250	18	5,0	82,173	0,300	24,65	32,33
20	275	20	5,5	91,512	0,299	27,36	33,68
20	300	21	6,0	96,182	0,297	28,57	34,28
20	325	22	6,5	100,851	0,295	29,75	34,88
20	350	22	7,0	100,851	0,294	29,65	34,83

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XVIII. **Datos de humedad de la muestra 3 (suelo 2)**

PNH	671,03 g
PNS	459,85 g
DIF.	211,18 g
Porcentaje H	45,92

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XIX. **Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 3 (suelo 2)**

Presión de confinamiento $\sigma_3$ T/m <sup>2</sup>	Lectura deform. 0.001"	Lectura Carga X	$\epsilon$ Porcentaje	F Kg	Factor K	$\sigma$ T/m <sup>2</sup>	q <sub>máx.</sub> T/m <sup>2</sup> .
5	0	0	0,0	-1,880	0,316	- 0,594	9,70
5	5	1	0,1	2,790	0,315	0,88	10,44

Continuación de la tabla XIX.

5	10	1	0,2	2,790	0,315	0,88	10,44
5	15	1	0,3	2,790	0,315	0,88	10,44
5	20	1	0,4	2,790	0,314	0,88	10,44
5	25	1	0,5	2,790	0,314	0,88	10,44
5	50	2	1,0	7,459	0,313	2,33	11,17
5	75	2	1,5	7,459	0,311	2,32	11,16
10	100	4	2,0	16,798	0,310	5,21	22,60
10	125	4	2,5	16,798	0,308	5,17	22,59
10	150	4	3,0	16,798	0,306	5,14	22,57
10	175	4	3,5	16,798	0,305	5,12	22,56
10	200	5	4,0	21,468	0,303	6,50	23,25
20	225	8	4,5	35,477	0,302	10,71	45,36
20	250	8	5,0	35,477	0,300	10,64	45,32
20	275	8	5,5	35,477	0,299	10,61	45,30

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XX. **Datos de humedad de la muestra 1 (suelo 3)**

PNH	587,31 g
PNS	534,23 g
DIF.	53,08 g
Porcentaje H	9,94

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XXI. **Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 3)**

Presión de confinamiento $\sigma_3$ T/m <sup>2</sup>	Lectura deform. 0.001"	Lectura Carga X	$\epsilon$ Porcentaje	F Kg	Factor K	$\sigma$ T/m <sup>2</sup>	q <sub>máx.</sub> T/m <sup>2</sup> .
5	0	0	0,0	-1,880	0,316	- 0,594	4,70
5	5	4	0,1	16,798	0,315	5,29	7,65
5	10	6	0,2	26,138	0,315	8,23	9,12

Continuación de la tabla XXI.

5	15	9	0,3	40,146	0,315	12,65	11,32
5	20	11	0,4	49,486	0,314	15,54	12,77
5	25	14	0,5	63,494	0,314	19,94	14,97
5	50	30	1,0	138,208	0,313	43,26	26,63
5	75	39	1,5	180,234	0,311	56,05	33,03
5	100	41	2,0	189,574	0,310	58,77	34,38
5	125	38	2,5	175,565	0,308	54,07	32,04
10	150	45	3,0	208,252	0,306	63,73	41,86
10	175	46	3,5	212,922	0,305	64,94	42,47
10	200	46	4,0	212,922	0,303	64,52	42,26
20	225	57	4,5	264,287	0,302	79,81	59,91
20	250	60	5,0	278,296	0,300	83,49	61,74
20	275	62	5,5	287,635	0,299	86,00	63,00
20	300	62	6,0	287,635	0,297	85,43	62,71

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XXII. **Datos de humedad de la muestra 2 (suelo 3)**

PNH	677,11 g
PNS	541,18 g
DIF.	135,93 g
Porcentaje H	25,12

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XXIII. **Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 3)**

Presión de confinamiento $\sigma_3$ T/m <sup>2</sup>	Lectura deform. 0.001"	Lectura Carga X	$\epsilon$ Porcentaje	F Kg	Factor K	$\sigma$ T/m <sup>2</sup>	q <sub>máx.</sub> T/m <sup>2</sup> .
5	0	0	0,0	-1,880	0,316	- 0,594	4,70
5	5	2	0,1	7,459	0,315	2,35	6,17

Continuación de la tabla XXIII.

5	10	4	0,2	16,798	0,315	5,29	7,65
5	15	5	0,3	21,468	0,315	6,76	8,38
5	20	6	0,4	26,138	0,314	8,21	9,10
5	25	8	0,5	35,477	0,314	11,14	10,57
5	50	18	1,0	82,173	0,313	25,72	17,86
5	75	26	1,5	119,530	0,311	37,17	23,59
5	100	31	2,0	142,878	0,310	44,29	27,15
5	125	33	2,5	152,217	0,308	46,88	28,44
5	150	33	3,0	152,217	0,306	46,58	28,29
10	175	38	3,5	175,565	0,305	53,55	36,77
10	200	39	4,0	180,234	0,303	54,61	37,31
10	225	40	4,5	184,904	0,302	55,84	37,92
20	250	51	5,0	236,270	0,300	70,88	55,44
20	275	54	5,5	250,278	0,299	74,83	57,42
20	300	55	6,0	254,948	0,297	75,72	57,86
20	325	56	6,5	259,618	0,295	76,59	58,29

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XXIV. **Datos de humedad de la muestra 3 (suelo 3)**

PNH	725,85 g
PNS	527,85 g
DIF.	198,00 g
Porcentaje H	37,51

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XXV. **Datos del ensayo triaxial UU de la muestra 3 (suelo 3)**

Presión de confinamiento $\sigma_3$ T/m <sup>2</sup>	Lectura deform. 0.001"	Lectura Carga X	$\epsilon$ Porcentaje	F Kg	Factor K	$\sigma$ T/m <sup>2</sup>	Q <sub>máx.</sub> T/m <sup>2</sup> .
10	0	0.0	0,0	-1,880	0,316	-0,59	9,70
10	5	0.5	0,1	0,455	0,315	0,14	10,07
10	10	1.0	0,2	2,790	0,315	0,88	10,44
10	15	1.0	0,3	2,790	0,315	0,88	10,44
10	20	1.0	0,4	2,790	0,314	0,88	10,44
10	25	1.3	0,5	4,190	0,314	1,32	10,66
10	50	2.0	1,0	7,459	0,313	2,33	11,17
10	75	3.0	1,5	12,129	0,311	3,77	11,89
10	100	4.5	2,0	19,133	0,310	5,93	12,97
10	125	5.0	2,5	21,468	0,308	6,61	13,31
20	150	9.0	3,0	40,146	0,306	12,28	26,14
20	175	11.0	3,5	49,486	0,305	15,09	27,55
20	200	12.0	4,0	54,155	0,303	16,41	28,20
20	225	13.0	4,5	58,825	0,302	17,77	28,88
20	250	14.0	5,0	63,494	0,300	19,05	29,52
20	275	14.0	5,5	63,494	0,299	18,98	29,49
40	300	20.0	6,0	91,512	0,297	27,18	53,59
40	325	22.0	6,5	100,851	0,295	29,75	54,88
40	350	23.0	7,0	105,521	0,294	31,02	55,51
40	375	24.0	7,5	110,190	0,292	32,18	56,09
40	400	25.0	8,0	114,860	0,291	33,42	56,71
40	425	26.0	8,5	199,530	0,289	34,54	57,27
40	450	26.0	9,0	199,530	0,288	34,42	57,21

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Cálculos efectuados:

- Deformación unitaria  $\epsilon$

$$\epsilon = \frac{(lectura\ de\ deformacion)(0.001")}{5"} \times 100 \quad (\text{Ecuación 13})$$

- Carga transmitida  $F$

$$F: \text{Const.1 (X) + Const. 2} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Dónde:

$F$  = carga transmitida del espécimen al anillo de carga, (kg).

$X$  = lectura del micrómetro del anillo de carga.

Const.1 y Const.2 = constantes del anillo de carga

Nota: las constantes del anillo de carga no varían en los distintos tipos de suelo.

- Factor de corrección de área  $K$

$$K: \frac{1-\varepsilon_r}{A_o} \times 10 \quad (\text{Ecuación 15})$$

Dónde:

$\varepsilon_r$  = deformación unitaria, en decimales.

$A_o$  = área de la probeta antes del ensayo.

Área de la probeta tallada de 2.5" x 5"

$$A_o = (\pi/4) (2.5plg)^2 = 4.908 plg^2 = 31.67 cm^2$$

- Esfuerzo desviador  $\sigma$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (P)(K)$$

$$\sigma(T/m^2) = (\text{Carga } F)(\text{Factor } K) \quad (\text{Ecuación 16})$$

- Esfuerzo desviador en rotura  $q_{\text{máx}}$

$$q_{\text{máx}} = \left( \frac{\sigma + 2\sigma_3}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 17})$$

Dónde:

$\sigma_3$  = presión de confinamiento de 5, 10 y 20 T/m<sup>2</sup>

- Esfuerzo principal mayor  $\sigma_1$

$$\sigma_1 = \sigma + \sigma_3 \quad (\text{Ecuación 18})$$

- Cohesión C y ángulo de fricción interna  $\phi$

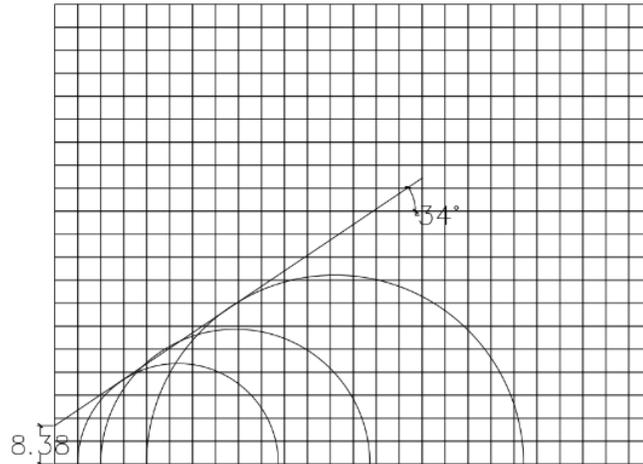
C = se determina gráficamente el valor aproximado de la cohesión.

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{Y}{X} \right) \quad (\text{Ecuación 19})$$

#### **5.4. Resultados obtenidos de ensayos triaxiales**

Los resultados que se obtienen de los cálculos efectuados se reflejan en las siguientes figuras y tablas correspondientes a cada uno de los suelos ensayados.

Figura 45. **Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 1 (suelo 1)**



Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Eje X: Esfuerzo normal ( $T/m^2$ ); Eje Y: Esfuerzo cortante ( $T/m^2$ )

Tabla XXVI. **Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 1)**

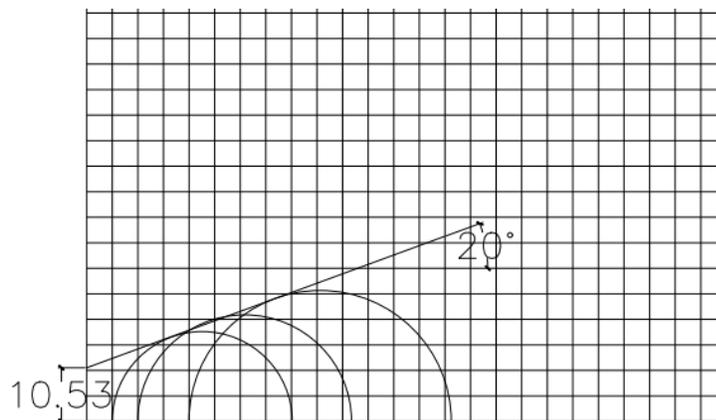
Parámetros de corte		$C = 8,38 \text{ Ton}/m^2$ $\phi = 34^\circ$		
Tipo de ensayo		No consolidado – No drenado		
Descripción del suelo		Arena limosa color café claro		
Dimensiones y tipo de probeta		2,5 x 5,0 plg. Remoldeada		
Probeta No.		1		
Presión de confinamiento	$\sigma_3$ ( $\text{Ton}/m^2$ )	5	10	20
Esfuerzo desviador en rotura	$q_{\text{máx}}$ ( $\text{Ton}/m^2$ )	26,86	39,33	61,05

Continuación de la tabla XXVI.

Deformación unitaria	$\epsilon$ porcentaje	3,0	4,5	6,5
Densidad seca	$\gamma_d$ (Ton/m <sup>3</sup> )	1,54	1,54	1,54
Humedad	porcentaje	14,76	14,76	14,76

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Figura 46. **Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 2 (suelo 1)**



Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Tabla XXVII. **Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 1)**

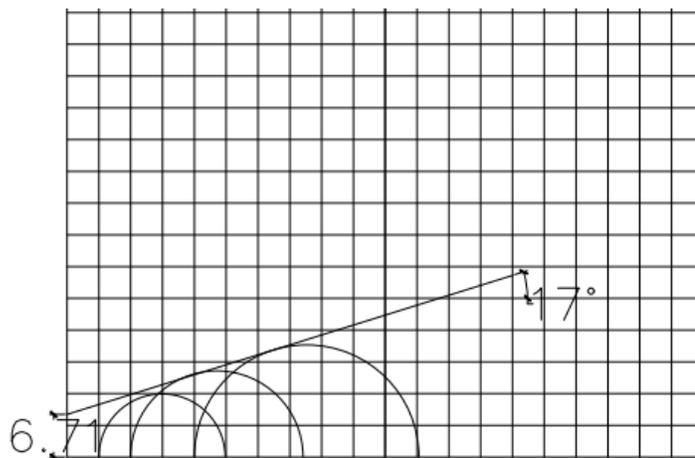
Parámetros de corte	$C = 10,53 \text{ Ton/m}^2$ $\phi = 20^\circ$
Tipo de ensayo	No consolidado – No drenado
Descripción del suelo	Arena limosa color café claro

Continuación de la tabla XXVII.

Dimensiones y tipo de probeta		2,5 x 5,0 plg. Remoldeada		
Probeta No.		1		
Presión de confinamiento	$\sigma_3$ (Ton/m <sup>2</sup> )	5	10	20
Esfuerzo desviador en rotura	$q_{m\acute{a}x}$ (Ton/m <sup>2</sup> )	22,57	30,87	45,63
Deformación unitaria	$\epsilon$ porcentaje	3,0	4,5	7,5
Densidad seca	$\gamma_d$ (Ton/m <sup>3</sup> )	1,85	1,85	1,85
Humedad	porcentaje	25,31	25,31	25,31

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Figura 47. **Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 3 (suelo 1)**



Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

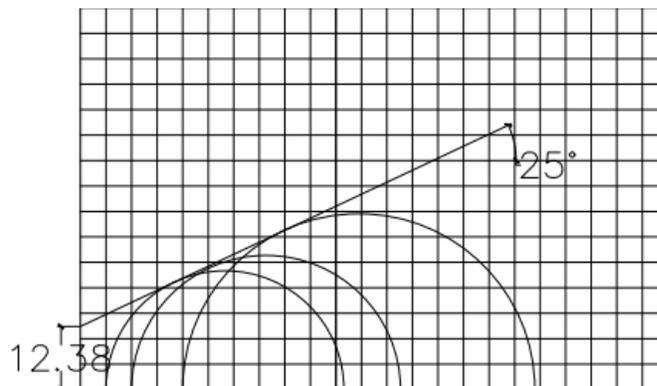
Eje X: Esfuerzo normal (T/m<sup>2</sup>); Eje Y: Esfuerzo cortante (T/m<sup>2</sup>)

Tabla XXVIII. **Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 1)**

Parámetros de corte		C= 6,71 Ton/m <sup>2</sup> $\phi = 17^\circ$		
Tipo de ensayo		No consolidado – No drenado		
Descripción del suelo		Arena limosa color café claro		
Dimensiones y tipo de probeta		2,5 x 5,0 plg. Remoldeada		
Probeta No.		1		
Presión de confinamiento	$\sigma_3$ (Ton/m <sup>2</sup> )	5	10	20
Esfuerzo desviador en rotura	$q_{m\acute{a}x}$ (Ton/m <sup>2</sup> )	14,94	23,54	37,65
Deformación unitaria	$\epsilon$ porcentaje	3,5	8,0	13,0
Densidad seca	$\gamma_d$ (Ton/m <sup>3</sup> )	1,71	1,71	1,71
Humedad	porcentaje	33,55	33,55	33,55

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Figura 48. **Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 1 (suelo 2)**



Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

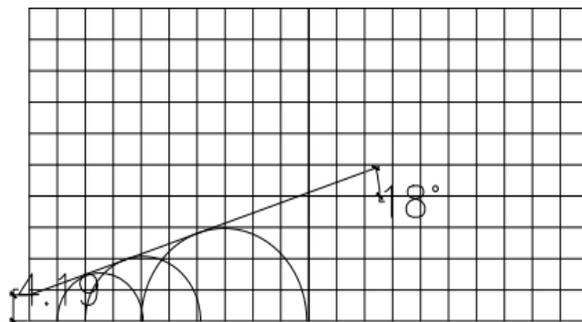
Eje X: Esfuerzo normal ( $T/m^2$ ); Eje Y: Esfuerzo cortante ( $T/m^2$ )

Tabla XXIX. **Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 2)**

Parámetros de corte		$C = 12,38 \text{ Ton/m}^2 \quad \phi = 25^\circ$		
Tipo de ensayo		No consolidado – No drenado		
Descripción del suelo		Arena arcillosa color café oscuro		
Dimensiones y tipo de probeta		2,5 x 5,0 plg. Remoldeada		
Probeta No.		1		
Presión de confinamiento	$\sigma_3$ ( $\text{Ton/m}^2$ )	5	10	20
Esfuerzo desviador en rotura	$q_{\text{máx}}$ ( $\text{Ton/m}^2$ )	28,29	36,33	54,50
Deformación unitaria	$\epsilon$ porcentaje	3,0	5,0	7,5
Densidad seca	$\gamma_d$ ( $\text{Ton/m}^3$ )	1,47	1,47	1,47
Humedad	porcentaje	28,73	28,73	28,73

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Figura 49. **Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 2 (suelo 2)**



Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

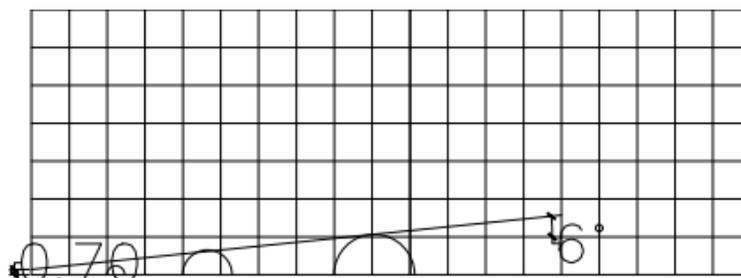
Eje X: Esfuerzo normal (T/m<sup>2</sup>); Eje Y: Esfuerzo cortante (T/m<sup>2</sup>)

Tabla XXX. **Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 2)**

Parámetros de corte		C= 4,19 Ton/m <sup>2</sup> $\phi = 18^\circ$		
Tipo de ensayo		No consolidado – No drenado		
Descripción del suelo		Arena arcillosa color café oscuro		
Dimensiones y tipo de probeta		2,5 x 5,0 plg. Remoldeada		
Probeta No.		1		
Presión de confinamiento	$\sigma_3$ (Ton/m <sup>2</sup> )	5	10	20
Esfuerzo desviador en rotura	$q_{m\acute{a}x}$ (Ton/m <sup>2</sup> )	12,67	20,33	34,83
Deformación unitaria	$\epsilon$ porcentaje	2,0	4,0	7,0
Densidad seca	$\gamma_d$ (Ton/m <sup>3</sup> )	1,31	1,31	1,31
Humedad	porcentaje	36,00	36,00	36,00

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Figura 50. **Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 3 (suelo 2)**



Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

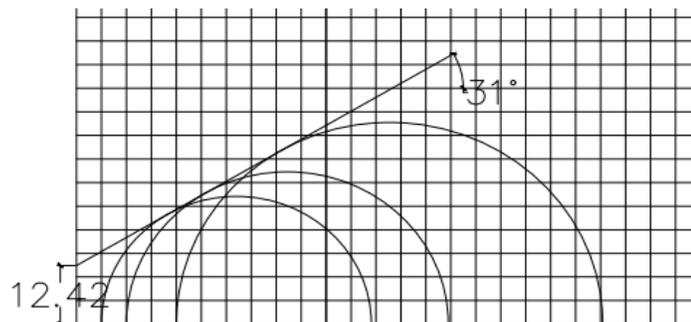
Eje X: Esfuerzo normal (T/m<sup>2</sup>); Eje Y: Esfuerzo cortante (T/m<sup>2</sup>)

Tabla XXXI. **Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 3 (suelo 2)**

Parámetros de corte		C= 0,70 Ton/m <sup>2</sup> $\phi = 6^\circ$		
Tipo de ensayo		No consolidado – No drenado		
Descripción del suelo		Arena arcillosa color café oscuro		
Dimensiones y tipo de probeta		2,5 x 5,0 plg. Remoldeada		
Probeta No.		1		
Presión de confinamiento	$\sigma_3$ (Ton/m <sup>2</sup> )	10	20	40
Esfuerzo desviador en rotura	$q_{m\acute{a}x}$ (Ton/m <sup>2</sup> )	11,16	23,25	45,30
Deformación unitaria	$\epsilon$ porcentaje	1,5	4,0	5,5
Densidad seca	$\gamma_d$ (Ton/m <sup>3</sup> )	1,67	1,67	1,67
Humedad	porcentaje	45,92	45,92	45,92

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Figura 51. **Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 1 (suelo 3)**



Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

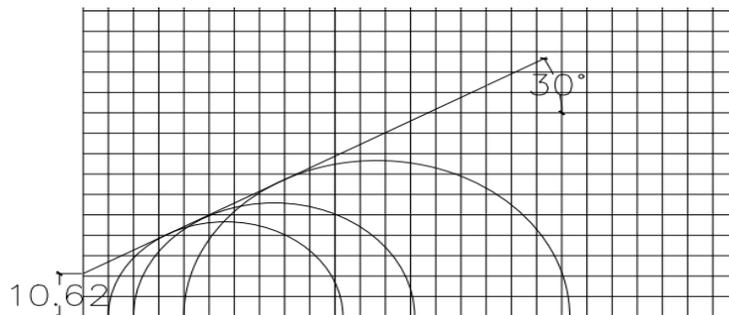
Eje X: Esfuerzo normal (T/m<sup>2</sup>); Eje Y: Esfuerzo cortante (T/m<sup>2</sup>)

Tabla XXXII. **Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 1 (suelo 3)**

Parámetros de corte		C= 12,42 Ton/m <sup>2</sup> $\phi = 31^\circ$		
Tipo de ensayo		No consolidado – No drenado		
Descripción del suelo		Arena arcillosa color café amarillento		
Dimensiones y tipo de probeta		2,5 x 5,0 plg. Remoldeada		
Probeta No.		1		
Presión de confinamiento	$\sigma_3$ (Ton/m <sup>2</sup> )	5	10	20
Esfuerzo desviador en rotura	$q_{m\acute{a}x}$ (Ton/m <sup>2</sup> )	32,04	42,26	62,71
Deformación unitaria	$\epsilon$ porcentaje	2,5	4,0	6,0
Densidad seca	$\gamma_d$ (Ton/m <sup>3</sup> )	1,46	1,46	1,46
Humedad	porcentaje	9,94	9,94	9,94

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Figura 52. **Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 2 (suelo 3)**



Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

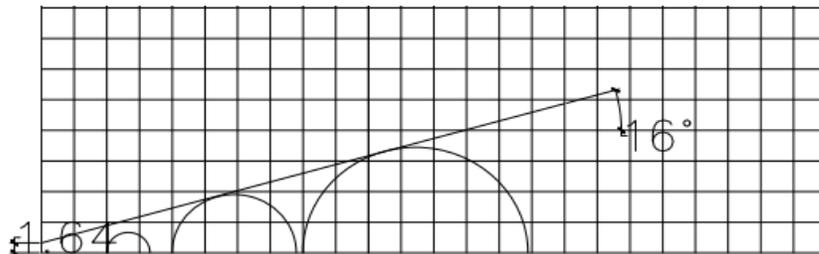
Eje X: Esfuerzo normal ( $T/m^2$ ); Eje Y: Esfuerzo cortante ( $T/m^2$ )

Tabla XXXIII. **Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 2 (suelo 3)**

Parámetros de corte		$C = 10,62 \text{ Ton/m}^2 \quad \phi = 30^\circ$		
Tipo de ensayo		No consolidado – No drenado		
Descripción del suelo		Arena arcillosa color café amarillento		
Dimensiones y tipo de probeta		2,5 x 5,0 plg. Remoldeada		
Probeta No.		1		
Presión de confinamiento	$\sigma_3$ (Ton/m <sup>2</sup> )	5	10	20
Esfuerzo desviador en rotura	$q_{\text{máx}}$ (Ton/m <sup>2</sup> )	28,29	37,92	58,29
Deformación unitaria	$\epsilon$ porcentaje	3,0	4,5	6,5
Densidad seca	$\gamma_d$ (Ton/m <sup>3</sup> )	1,68	1,68	1,68
Humedad	porcentaje	25,12	25,12	25,12

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Figura 53. **Envolvente de falla y círculos de Mohr para el ensayo triaxial UU para la muestra 3 (suelo 3)**



Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

Eje X: Esfuerzo normal (T/m<sup>2</sup>); Eje Y: Esfuerzo cortante (T/m<sup>2</sup>)

Tabla XXXIV. **Representación de los resultados del ensayo triaxial UU de la muestra 3 (suelo 3)**

Parámetros de corte		C= 1,64 Ton/m <sup>2</sup> $\phi = 16^\circ$		
Tipo de ensayo		No consolidado – No drenado		
Descripción del suelo		Arena arcillosa color café amarillento		
Dimensiones y tipo de probeta		2,5 x 5,0 plg. Remoldeada		
Probeta No.		1		
Presión de confinamiento	$\sigma_3$ (Ton/m <sup>2</sup> )	10	20	40
Esfuerzo desviador en rotura	$q_{m\acute{a}x}$ (Ton/m <sup>2</sup> )	13,31	29,49	57,21
Deformación unitaria	$\epsilon$ porcentaje	2,5	5,5	9,0
Densidad seca	$\gamma_d$ (Ton/m <sup>3</sup> )	1,80	1,80	1,80
Humedad	porcentaje	37,51	37,51	37,51

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

### 5.5. Comparación y análisis de resultados obtenidos según ensayos

Los ensayos se realizaron con humedades por debajo del límite plástico, esto debido a la trabajabilidad que se tiene con los suelos, pasado ese punto es demasiado dificultoso poder moldear las probetas y en la mayor cantidad de casos era poco posible dejar el molde completamente cilíndrico.

Tabla XXXV. **Resultados de ensayos realizados**

Tipo de suelo	Suelo 1			Suelo 2			Suelo 3		
Límite líquido	58,00 %			55,00 %			36,8 %		
Índice Plástico	24,3 %			7,7 %			1,4 %		
Grava (porcentaje)	0,00			0,00			0,00		
Arena (porcentaje)	63,84			41,17			54,67		
Finos (porcentaje)	36,16			58,83			45,33		
Humedad (porcentaje)	14,8	25,3	33,6	28,7	36	45,9	9,94	25,1	37,5
Cohesión Ton/m <sup>2</sup>	8,38	10,5	6,71	12,4	4,2	0.70	12,4	10,6	1,64
Angulo de fricción (°)	34	20	17	25	18	6	31	30	16

Fuente: elaboración propia, con base en resultados del ensayo.

En el suelo 1, los valores de ángulo de fricción interna presentan una disminución conforme el suelo se encuentra más húmedo, probablemente por ser un suelo compuesto en su mayoría de arena fina.

Como todas las probetas fueron ensayadas con humedad menores al límite plástico, el suelo estuvo en un estado semisólido por lo que la parte fina (limo de alta plasticidad), no desarrolló características plásticas. En ello radica que los valores de ángulo de fricción interna disminuyen más lentamente conforme aumenta la humedad. Y el valor de cohesión aparente, se mantiene relativamente estable, normal en un suelo con partículas uniformes (arena y finos).

Para el suelo 2, los valores de corte (ángulo de fricción y cohesión), disminuyen conforme aumenta la humedad presente, característica propia de los materiales finos. Es importante comentar que aun cuando las probetas no fueron ensayadas con humedades mayores al límite plástico, debido a que está compuesto mayormente de limo, la acción del agua provoca debilitamiento en la estructura del suelo.

Y para el suelo 3, los valores de corte disminuyen conforme aumenta la humedad, sin embargo, para la humedad de 9,94 % y 25,12 % los valores disminuyen poco ya que contiene más arena fina que limo y se encuentran por debajo del valor de límite plástico. Para la humedad de 37,51 % los valores disminuyen drásticamente a causa de ser ensayado en un valor de humedad por encima del valor de límite líquido.

En todos los casos visualmente los especímenes presentaron fallas de tipo barril, propio de suelos plásticos. Lo que es coherente con los suelos ensayados.

## CONCLUSIONES

1. Los suelos de granos finos presentan propiedades que al aumentar su contenido de humedad se reducen en su capacidad, este comportamiento se vuelve pernicioso en obras civiles que se encuentran expuestas como taludes, muros de contención y todas aquellas estructuras que se cimienten en este tipo de suelos.
2. El contenido de humedad al que se encuentran expuestos los suelos finos es dependiente del lugar en donde se ubica, el porcentaje adecuado al que se deben encontrar, en los cuales se mantienen en óptimas condiciones oscila entre el 9-30 % de humedad, sin que sobrepase su límite plástico.
3. El comportamiento de los suelos en los ensayos de laboratorio refleja las condiciones que presentaría si existiera variación de humedad, respecto a su capacidad de soporte, cohesión y su ángulo de fricción interna; esto se adecúa a la variación de humedad territorial que existe en Guatemala.
4. Las acciones del ser humano han provocado una alteración en los procesos climáticos, teniendo como resultado calentamiento en la atmosfera, debido a la generación de gases contaminantes.
5. Las alteraciones en los ciclos naturales del agua, perturban la composición natural de la misma, esto debido a la manera incorrecta de reciclaje y falta de tratamiento en aguas residuales.



## RECOMENDACIONES

1. Analizar ante un proyecto todos los datos correspondientes de utilidad para evaluar las posibles condiciones en las cuales se puede encontrar la obra civil, como exposición a un ambiente húmedo.
2. Efectuar la cantidad de ensayos necesarios dependiendo de la zona en la que se necesita trabajar para obtener resultados certeros y un mejor análisis estructural.
3. Realizar los ensayos triaxiales de laboratorio para determinar parámetros de corte y capacidad de carga, que sirvan para formar condiciones a las que se expondría el suelo.
4. Considerar la variabilidad climática de la zona y los riesgos a los que se puede encontrar, en caso de fenómeno o condición climática.
5. Estudiar la escorrentía superficial en el caso en que el suelo se encuentre en contacto directo y esto alteraría el porcentaje de humedad durante la época lluviosa.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación de Servicios Comunitarios de Salud. *Estudio de impacto sobre la variabilidad climática en la producción agrícola y medidas de adaptabilidad en 10 comunidades de Guatemala*. Guatemala: ASECSA, 2014. 80 p.
2. BBC. *Emisiones de CO<sub>2</sub> en América Latina*. México. [en línea]. <[www.bbc.com/mundo/ciencia\\_tecnologia/2009/12/091125\\_copenhague\\_mapa\\_emisiones\\_jmp.shtml](http://www.bbc.com/mundo/ciencia_tecnologia/2009/12/091125_copenhague_mapa_emisiones_jmp.shtml)>. [Consulta: marzo de 2019].
3. BRAJA, M. Das. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 5a ed. México: Cengage Learning, 2006. 742 p.
4. BUCKMAN, Harry. y BRADY, Nyle. *Naturaleza y propiedades de los suelos*: 1ª ed. México, D.F: UTHEA Barcelona Montaner y Simón, 2006. 590 p.
5. CEPAL. *La economía del cambio climático en Centroamérica*. México: CEPAL, 2011. 437 p.
6. Edafología. *Cartografía de suelos*. [en línea]. <[www.google.com.gt/search?q=contraccion+de+suelos+finos&tbs=isch&tbs=rimg](http://www.google.com.gt/search?q=contraccion+de+suelos+finos&tbs=isch&tbs=rimg)>. [Consulta: mayo de 2019].

7. NAUKAS, Francis. *Efectos impredecibles del cambio climático: El Niño y La Niña*. [en línea]. <[www.francis.naukas.com/2008/12/26/los-efectos-impredecibles-del-cambio-climatico-el-nino-y-la-nina/](http://www.francis.naukas.com/2008/12/26/los-efectos-impredecibles-del-cambio-climatico-el-nino-y-la-nina/)>. [Consulta: marzo de 2019].
8. FRANCO ROSSAL, Gabriela María. *Elaboración de un mapa de clasificación climática para Guatemala*. Guatemala: Trabajo de graduación de Ing. Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Universidad Rafael Landívar, 2015. 193 p.
9. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. *Observación del tiempo*. Meteorología y Climatología. España: FECYT, 2004. 170 p.
10. GARZONA ESTRADA, Erwin. *Causas y consecuencias del cambio climático*. [en línea]. <[www.es.slideshare.net](http://www.es.slideshare.net)>. [Consulta: febrero de 2019].
11. HERNANDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 510 p.
12. HUMBOLDT. *Equipos de ensayo para materiales de la construcción. Catálogo 2012*. [en línea]. <<https://www.yumpu.com/es/document/read/59430583/catalogo-humboldt-espanol>>. [Consulta: junio de 2019].

13. IBARRA ALVARADO, Débora Elizabeth. *Abordaje de la política del estado de Guatemala frente al cambio climático en el marco de las relaciones internacionales*. Trabajo de graduación de Lic. En Relaciones Internacionales. Escuela de Ciencias Políticas, Universidad San Carlos de Guatemala, 2017. 114 p.
14. INSIVUMEH. *Regiones climáticas en Guatemala*. [en línea]. <[www.insivumeh.gob.gt/regiones-climaticas/](http://www.insivumeh.gob.gt/regiones-climaticas/)>. [Consulta: marzo de 2019].
15. Instituto Nacional de Estadística. *Mapa de pobreza*. [en línea]. <[www.icop.org.gt](http://www.icop.org.gt)>. [Consulta: febrero de 2019].
16. JUAREZ BADILLO, Eulalio; RICO RODRIGUEZ, Alfonso. *Mecánica de suelos, fundamentos de la ingeniería de suelos*. 3a ed. México: Limusa, 2005. 644 p.
17. LARIOS MARTON, José. *Calentamiento global al borde del límite*. Córdoba, España: INET; 2008. 120 p.
18. Línea Verde Cauta. *Efecto invernadero natural*. [en línea]. <[www.lineaverdeceutatrace.com/lv/guias-buenas-practicas-ambientales/cambio-climatico/que-es-el-efecto-invernadero.asp](http://www.lineaverdeceutatrace.com/lv/guias-buenas-practicas-ambientales/cambio-climatico/que-es-el-efecto-invernadero.asp)>. [Consulta: marzo de 2019].
19. MARTIN, Edward. *Método para medir la humedad del suelo para la programación del riego*. Arizona, U.S.A.: Universidad de Arizona, 2017. 9 p.

20. MEZA OCHOA, Victoria Elena. *Suelos parcialmente saturados*. México: 2008. 26 p.
21. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Segunda Comunicación Nacional sobre cambio climático en Guatemala*. Guatemala: MARN, 2015. 250 p.
22. \_\_\_\_\_. *Informe ambiental del Estado de Guatemala*. Guatemala: GEO, 2009. 286 p.
23. \_\_\_\_\_. *Informe ambiental del Estado de Guatemala*. Guatemala: MARN, 2016. 138 p.
24. Ministerio de Comunicación, Infraestructura y Vivienda. *Variabilidad y cambio climático en Guatemala*. Guatemala: INSIVUMEH, 2018. 148 p.
25. Náutica y Deportes Tenerife. *Vientos alisios*. [en línea]. <[www.nauticaydeportes.com](http://www.nauticaydeportes.com)>. [Consulta: febrero de 2019].
26. NORMAS ASTM. *ASTM D 2850-3ª "Standard Test Method for Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*, 3ª Edición, USA. s/p.
27. \_\_\_\_\_. *ASTM D 4767-02 "Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*, 2ª Edición, USA. s/p.

28. \_\_\_\_\_. *ASTM D 7181-11, Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*, 11ª Edición, USA. s/p.
29. Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, IPCC. *Cambio Climático. Ginebra, Suiza: IPCC, 2014. 157 p.*
30. PIERRI PALMA, Ileana Felicia. *Evaluación de los parámetros de corte en suelos cohesivos saturados, mediante pruebas de compresión triaxial: consolidado no drenado y consolidado drenado*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 130 p.
31. RAMIREZ CALO, Carlos Aníbal. *Variabilidad climática local y su relación con eventos del fenómeno el niño-oscilatorio del sur (ENSO) en la vertiente del pacífico*. Guatemala: Trabajo de graduación de Ing. Agrónomo con Énfasis en Cultivos Tropicales. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Universidad Rafael Landívar, 2015. 83 p.
32. SHOJI & NANZYO. *Volcanic Ash Soils*. 1ª ed. Países Bajos, Ámsterdam: ELSEVIER, 1944. 288 p.
33. Sociedad Estándares de Ingeniería para aguas y suelos LTDA. *Curvas de infiltración, según textura del suelo*. Guatemala: EIAS, 2001. 18 p.

34. *Tips y temas agronómicos*. México. *Relación agua – suelo*. [en línea]. <<https://www.tipsytemasagronicos.com/tipos-de-agua-en-el-suelo-agricola/>>. [Consulta: mayo de 2019].
  
35. ZAMORA CARDONA, Juan Carlos. y CRISTANCHO, Fernando. *La humedad en las propiedades físicas del suelo*. Sao Pablo, Brasil: 2015. 20 p.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. **Muestra 1 (suelos 1) al término del ensayo**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 2. **Muestra 2 (suelos 1) al término del ensayo**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 3. **Muestra 3 (suelos 1) al término del ensayo**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 4. **Muestra 1 (suelos 2) al término del ensayo**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería,  
USAC.

Apéndice 5. **Muestra 2 (suelos 2) al término del ensayo**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 6. **Muestra 3 (suelos 2) al término del ensayo**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 7. **Muestra 1 (suelos 3) al término del ensayo**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 8. **Muestra 2 (suelos 3) al término del ensayo**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 9. **Muestra 3 (suelos 3) al término del ensayo**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.



# ANEXOS

## Anexo 1. Informe de ensayo de Limites de Atterberg

 **CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  **USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

---

INFORME No. 122 S.S.A. O.T.: 40,635 No. 18776

Interesado: Sarah Cabrera Aguilar

Proyecto: Trabajo de graduación titulado: "ENSAYOS TRIAXIALES PARA SUELOS DE GRANOS FINOS EN DIFERENTES ESTADOS DE HUMEDAD"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: San José Pinula, Ciudad de Guatemala y Mazatenango

FECHA: miércoles, 3 de marzo de 2021

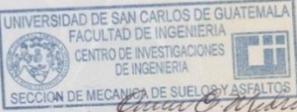
**RESULTADOS:**

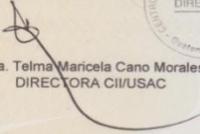
ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	San José Pinula	58.8	24.3	MH	Arena limosa color café claro
2	Ciudad de Guatemala	55.0	7.7	MH	Limo arenoso color café oscuro
3	Mazatenango	36.8	1.4	ML	Arena limosa color café amarillento

(\*) CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

  
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez  
Jefe Sección Mecánica de Suelos y Asfaltos

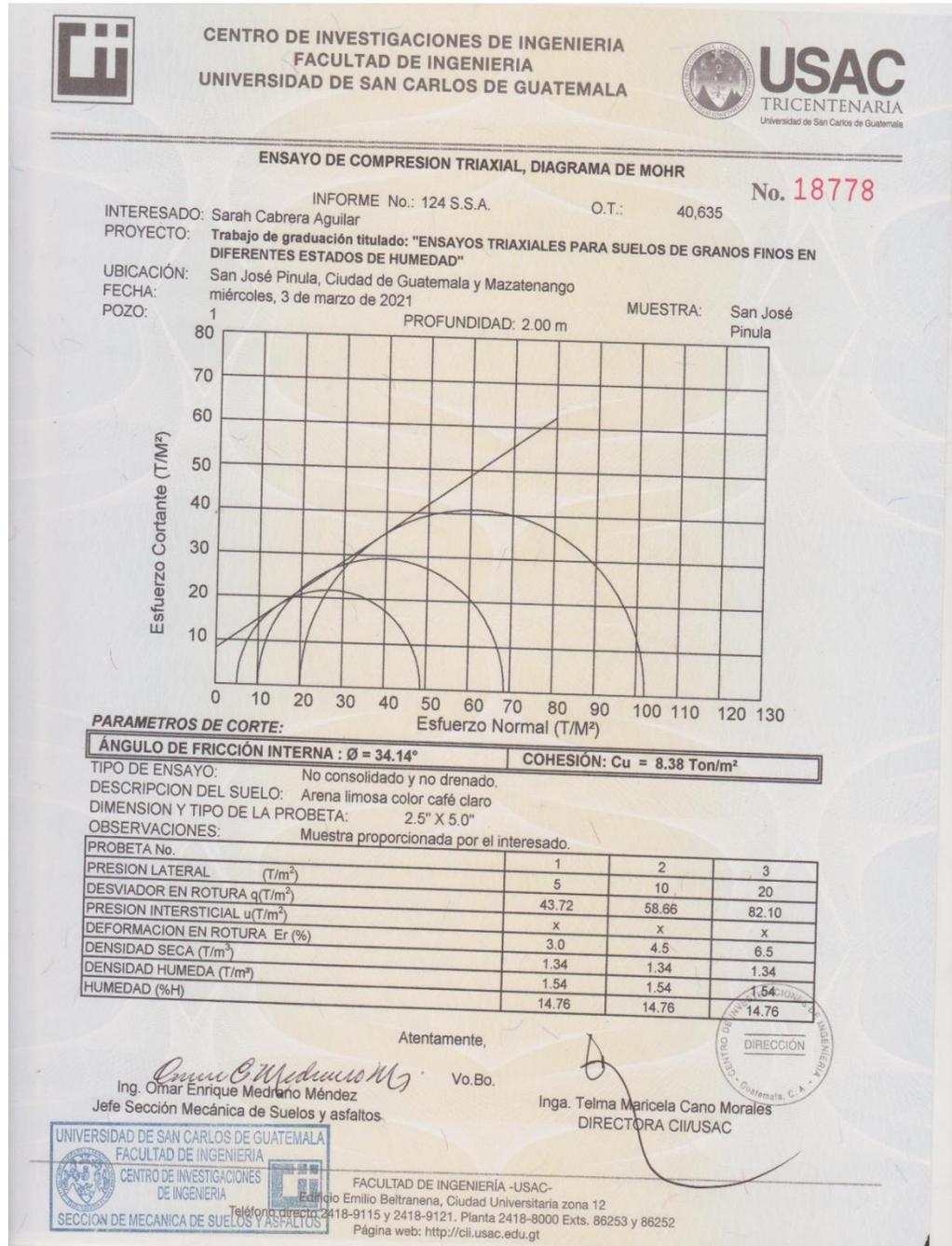
Vo.Bo.   
Inga. Teima Maricela Cano Morales  
DIRECTORA CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-  
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

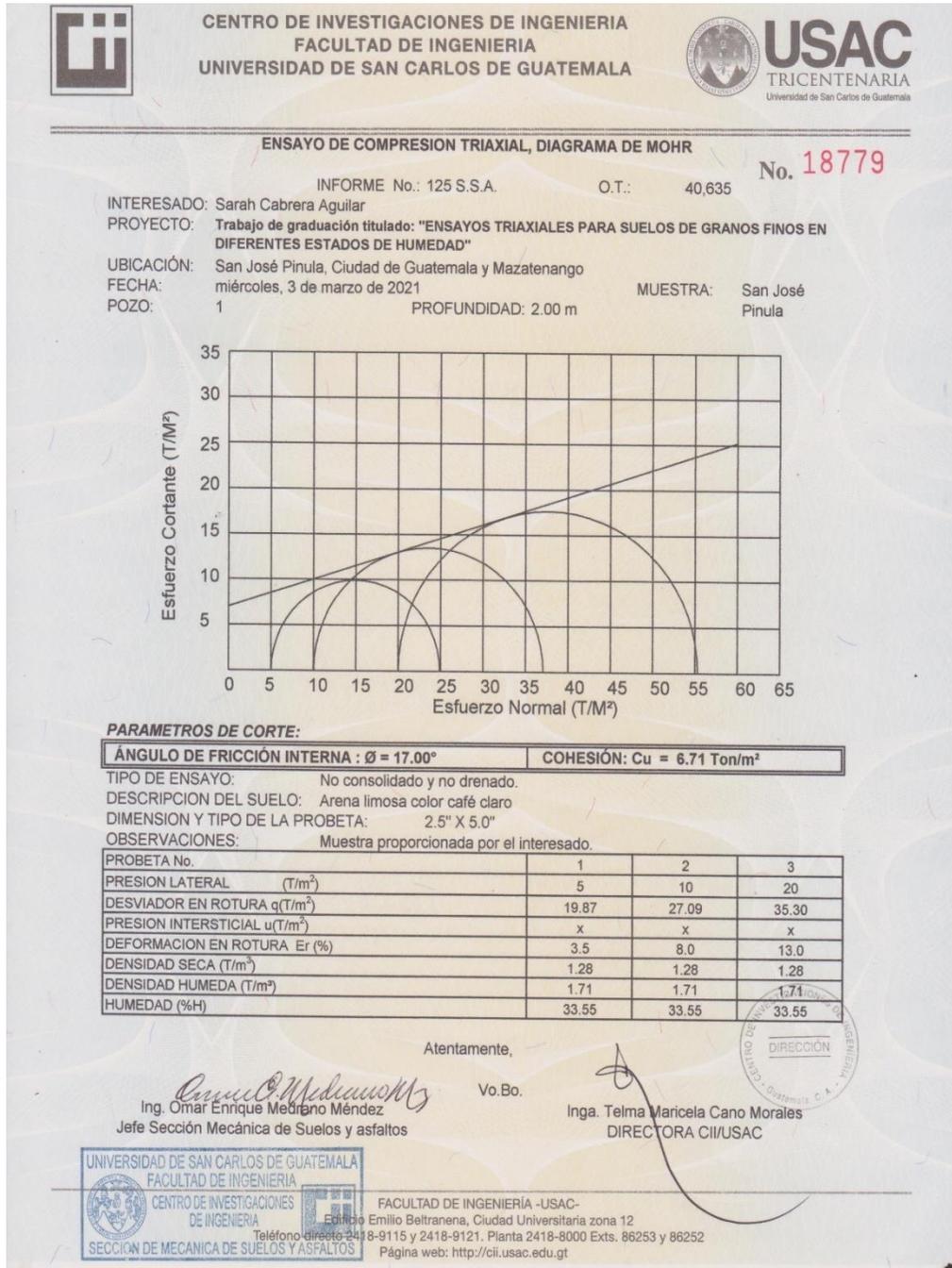


Anexo 3. **Ensayo de compresión triaxial, Diagrama de Mohr.**  
**Suelo 1 Humedad 14,76 %**



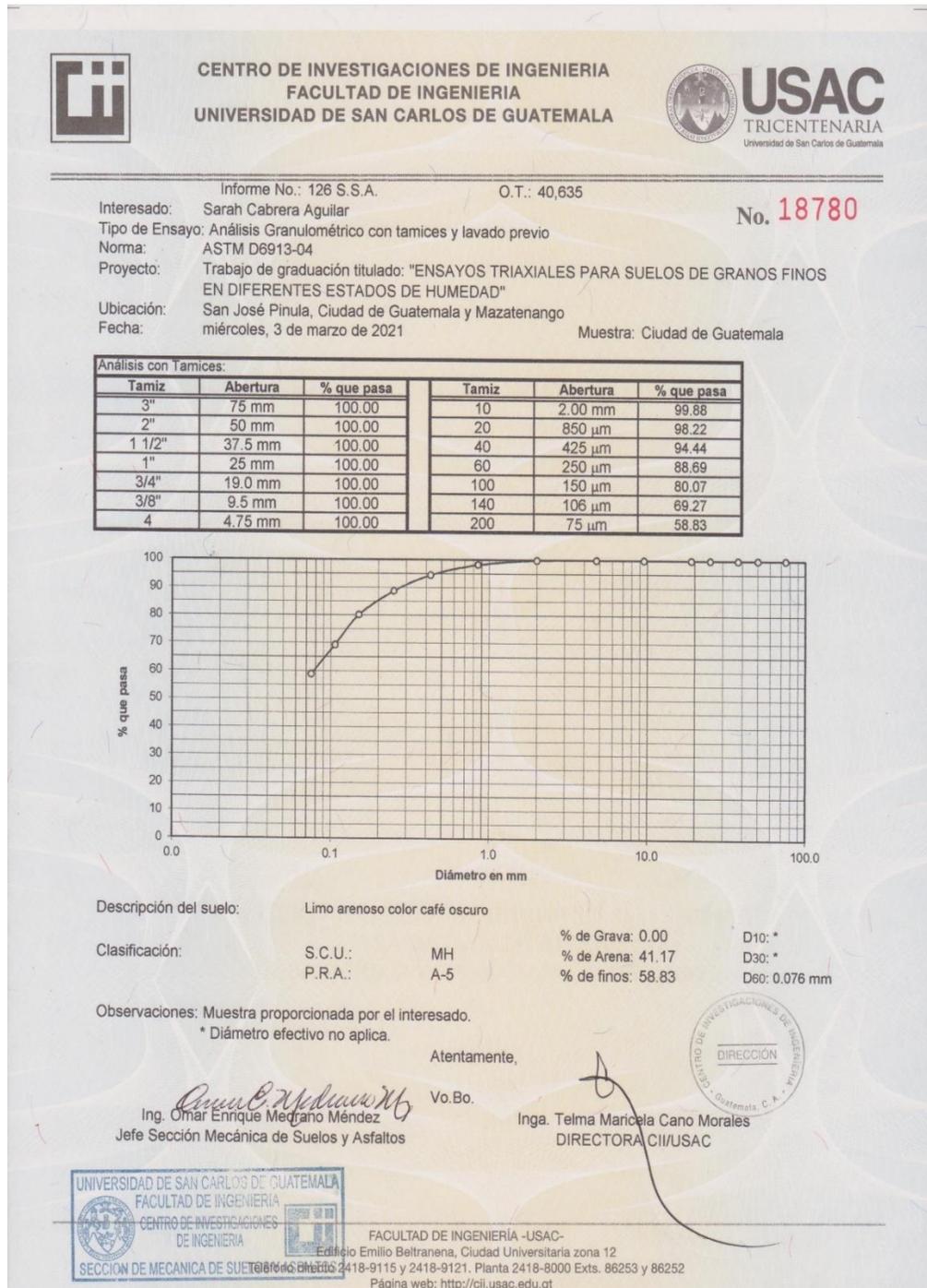
Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 4. **Ensayo de compresión triaxial, Diagrama de Mohr.**  
**Suelo 1 Humedad 33,55 %**



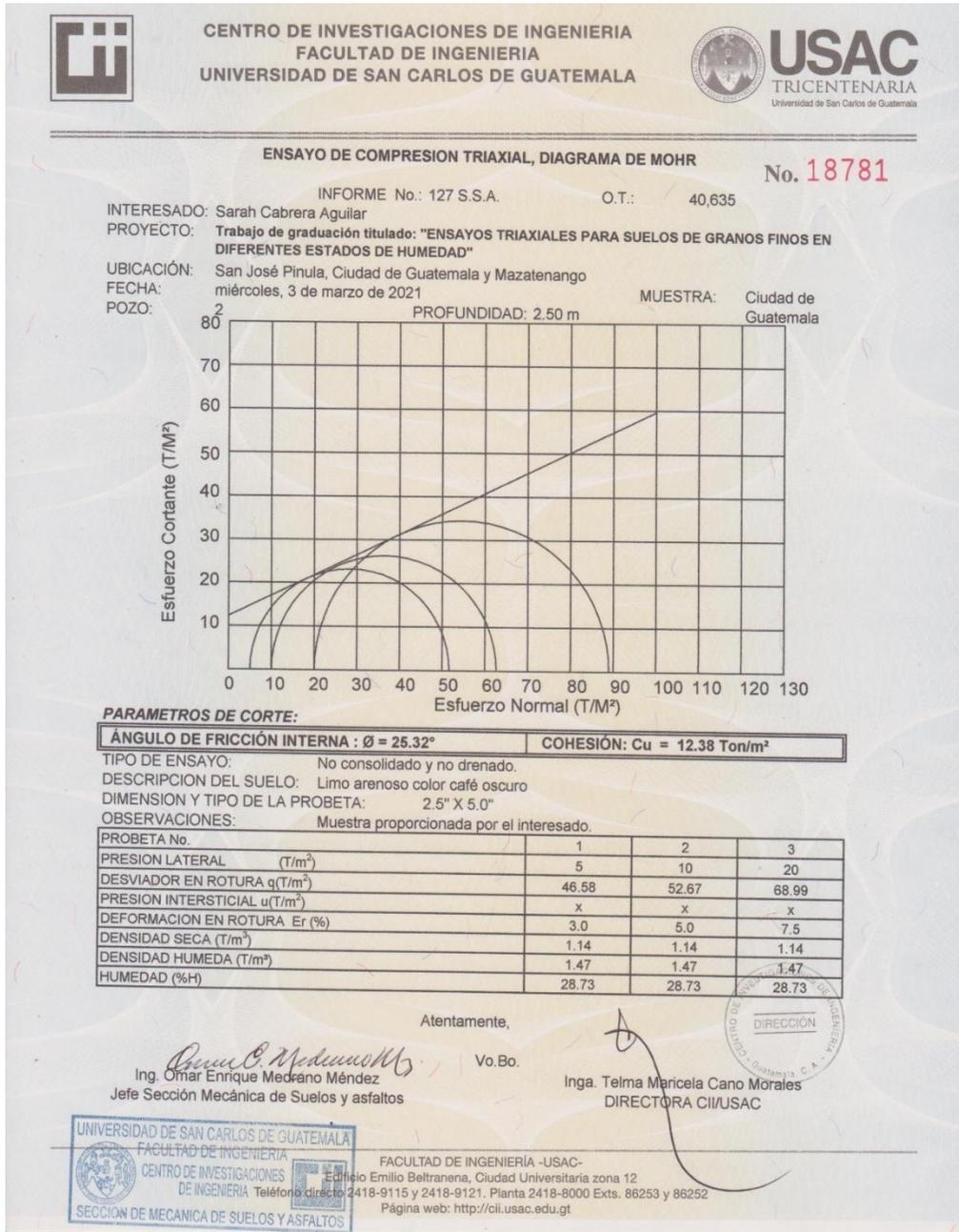
Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

## Anexo 5. Análisis granulométrico, Suelo 2



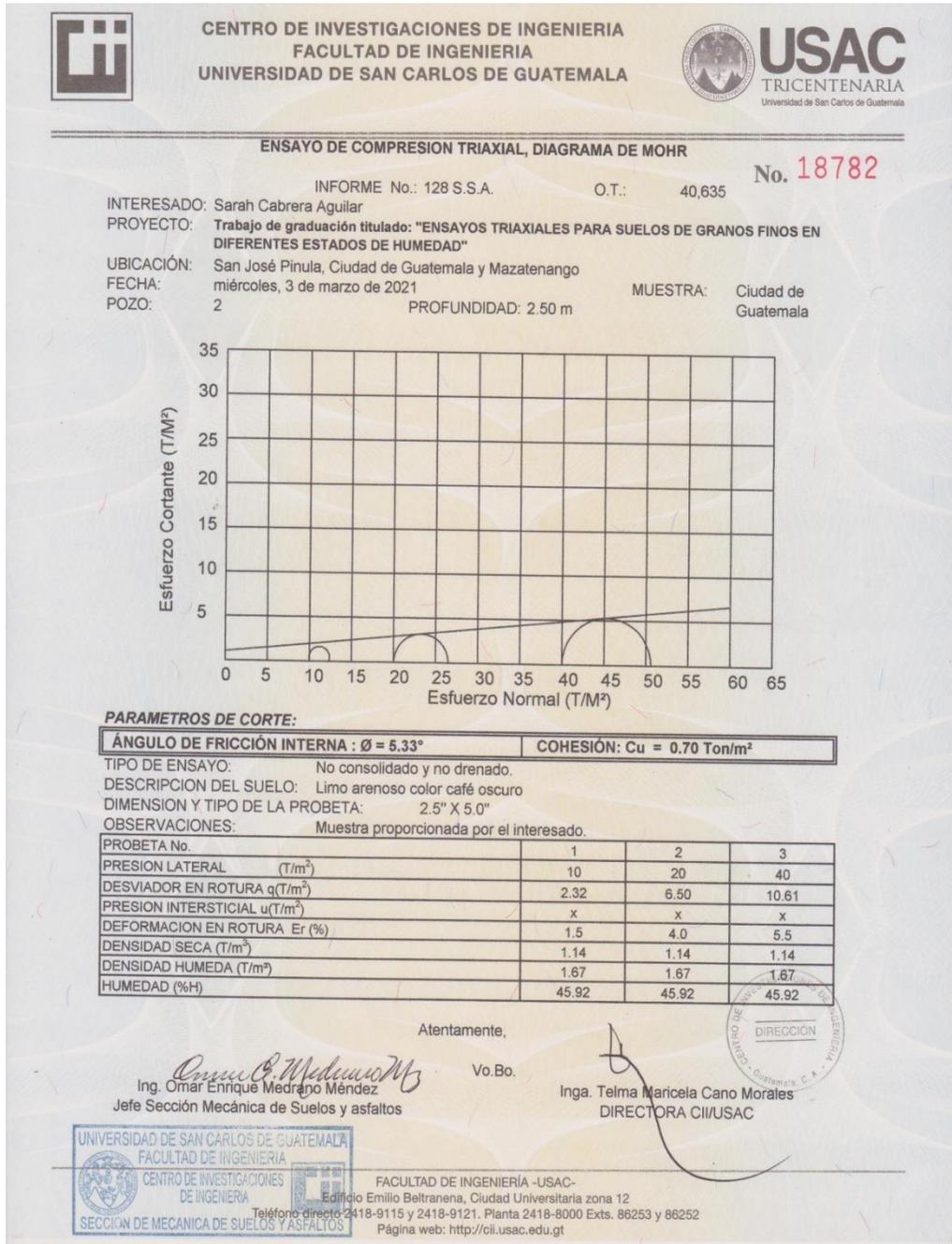
Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 6. **Ensayo de compresión triaxial, Diagrama de Mohr.**  
**Suelo 2 Humedad 28,73 %**



Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 7. **Ensayo de compresión triaxial, Diagrama de Mohr.**  
**Suelo 2 Humedad 45,92 %**



Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

## Anexo 8. Análisis granulométrico, Suelo 3



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

Informe No.: 129 S.S.A. O.T.: 40,635 No. 18783

Interesado: Sarah Cabrera Aguilar

Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico con tamices y lavado previo

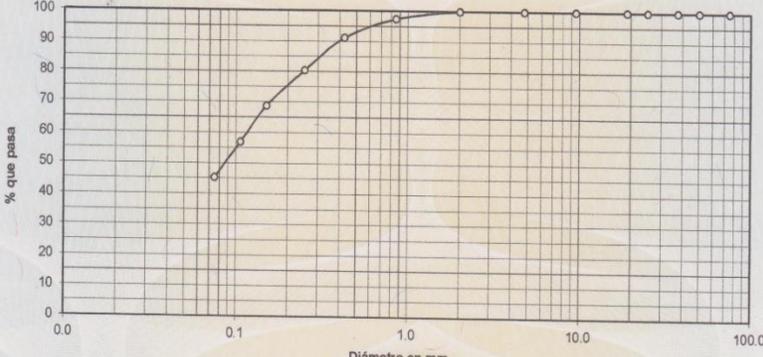
Norma: ASTM D6913-04

Proyecto: Trabajo de graduación titulado: "ENSAYOS TRIAXIALES PARA SUELOS DE GRANOS FINOS EN DIFERENTES ESTADOS DE HUMEDAD"

Ubicación: San José Pinula, Ciudad de Guatemala y Mazatenango

Fecha: miércoles, 3 de marzo de 2021 Muestra: Mazatenango

Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100.00	10	2.00 mm	100.00
2"	50 mm	100.00	20	850 μm	97.42
1 1/2"	37.5 mm	100.00	40	425 μm	91.10
1"	25 mm	100.00	60	250 μm	80.37
3/4"	19.0 mm	100.00	100	150 μm	68.70
3/8"	9.5 mm	100.00	140	106 μm	56.83
4	4.75 mm	100.00	200	75 μm	45.33

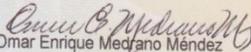


Descripción del suelo: Arena limosa color café amarillento

Clasificación: S.C.U.: SM % de Grava: 0.00 D10: \*  
P.R.A.: A-4 % de Arena: 54.67 D30: \*  
% de finos: 45.33 D60: 0.11 mm

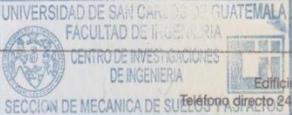
Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.  
\* Diámetro efectivo no aplica.

Atentamente,

  
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez  
Jefe Sección Mecánica de Suelos y Asfaltos

  
Inga. Telma Marcela Cano Morales  
DIRECTORA CII/USAC

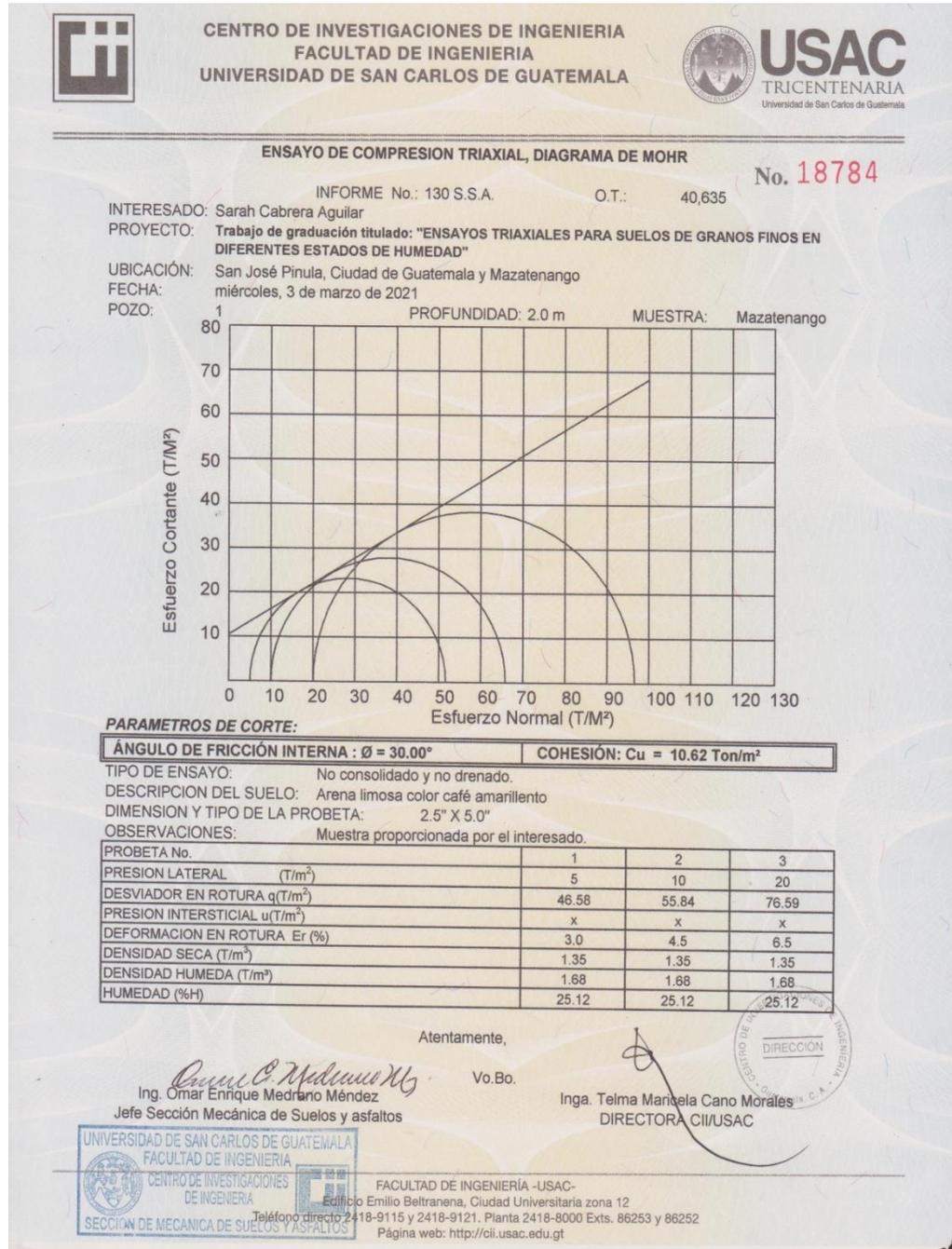




FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-  
Edificio Emilio Beltrarena, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

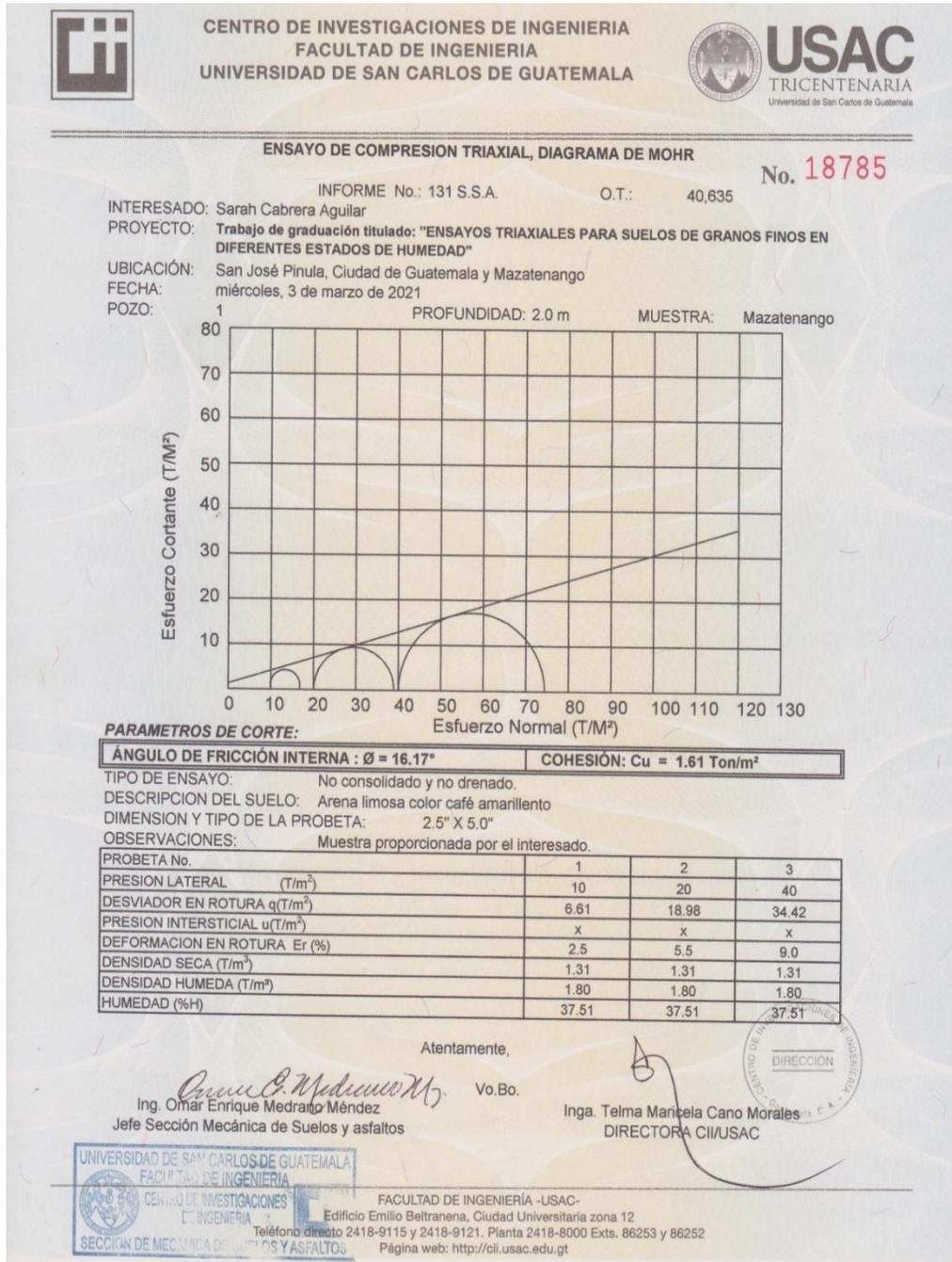
Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 9. **Ensayo de compresión triaxial, Diagrama de Mohr.**  
**Suelo 3 Humedad 25,12 %**



Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 10. **Ensayo de compresión triaxial, Diagrama de Mohr.**  
**Suelo 3 Humedad 37,51 %**



Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.