



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

**ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN
DE MATERIAL PIROCLÁSTICO PROCEDENTE DEL VOLCÁN DE PACAYA**

Lisza María Acevedo Castañeda

Asesorada por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, noviembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN
DE MATERIAL PIROCLÁSTICO PROCEDENTE DEL VOLCÁN DE PACAYA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

LISZA MARÍA ACEVEDO CASTAÑEDA

ASESORADA POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO


DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Carmen Marina Mérida Alva
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Linares Cruz
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordóñez Hernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE MATERIAL PIROCLÁSTICO PROCEDENTE DEL VOLCÁN DE PACAYA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha febrero de 2011.



Liza María Acevedo Castañeda



Guatemala, octubre de 2012

Ingeniero
Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería, Usac
Guatemala

Ing. Melini

De la manera más atenta me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado: **“ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE MATERIAL PIROCLÁSTICO PROCEDENTE DEL VOLCÁN DE PACAYA”**, realizado por la estudiante Liza María Acevedo Castañeda. Considero que dicho trabajo ha sido finalizado de forma satisfactoria.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,

OMAR ENRIQUE MEDRANO MENDEZ
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO No. 6842

Omar E. Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Colegiado 6842

Jefe de Sección Mecánica de Suelos, CII



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
29 de octubre de 2012

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE MATERIAL PIROCLÁSTICO PROCEDENTE DEL VOLCÁN DE PACAYA**, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Liza María Acevedo Castañeda, quien 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 Guillermo Francisco Melini Salazar
Coordinador del Área de Materiales
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Más de 130^{Años} de Trabajo Académico y Mejora Continua





El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Enrique Medrano Méndez y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación de la estudiante Liza María Acevedo Castañeda, titulado **ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE MATERIAL PIROCLÁSTICO PROCEDENTE DEL VOLCÁN DE PACAYA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre de 2012.

/bbdeb.



Ref. DTG.599-2012

El Decano 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: **ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE MATERIAL PIROCLÁSTICO PROCEDENTE DEL VOLCÁN DE PACAYA**, presentado por la estudiante universitaria **Lisza María Acevedo Castañeda**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alfredo Beber Aceituno'.

Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Decano en funciones

Guatemala, 19 de noviembre de 2012



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme sabiduría, acompañarme y llenarme de sus bendiciones.
- Mis padres** Luis Enrique Acevedo Villagrán y Norma Yanet Castañeda Rojas, por haberme guiado por el buen camino, darme la oportunidad de lograr todos mis sueños, ser ejemplo de que con dedicación y esfuerzo, todo es posible.
- Mis hermanos** Luis Enrique Acevedo Castañeda y Anna Lucía Acevedo Castañeda, por apoyarme y animarme a seguir adelante.
- Mis abuelos** Con mucho cariño y respeto, en especial, a mi abuela Aracely Rojas viuda de Castañeda, por sus sabios consejos.
- Mis tíos** Julio Castañeda y Karla Barrios, Marvin Castañeda y Sarafí Gramajo, María Antonieta Castañeda y Víctor Díaz, Karin Aracely Castañeda, por su apoyo y consejo.
- Mis primos** Por su amistad.
- Mi novio** Hugo Estuardo Gálvez Villanueva, con mucho cariño, por apoyarme.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por estar siempre conmigo e iluminarme en mi camino.
Mi asesor	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez, por su amistad y gran apoyo para realizar el presente trabajo de graduación.
Laboratoristas de Mecánica de Suelos	En especial a José Juan Istupé Ibáñez, por su colaboración en la elaboración de los ensayos.
CII/USAC	Por permitirme elaborar cada ensayo de este trabajo de graduación, en especial al Laboratorio de Mecánica de Suelos.
Facultad de Ingeniería	Por ser mi casa de estudios y brindarme sus conocimientos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. SÍNTESIS GEOLÓGICA DE GUATEMALA	1
1.1. Geomorfología	1
1.2. Volcanes de Guatemala	15
1.3. Historia geológica del volcán de Pacaya	17
1.4. Volcán de Pacaya	17
1.4.1. Forma y estructura del volcán	18
1.4.2. Actividad volcánica	19
1.4.3. Depósitos volcánicos	25
1.4.4. Peligro volcánico	26
1.4.5. Petrografía	26
1.4.6. Geoquímica	26
2. ANTECEDENTES GENERALES	29
2.1. El suelo y su origen	29
2.1.1. Principales tipos de suelos	29
2.1.1.1. Suelos granulares	30
2.1.1.1.1. Gravas	30
2.1.1.1.2. Arcillas	31

2.1.1.2.	Suelos cohesivos.....	32
2.1.1.2.1.	Limos	32
2.1.1.2.2.	Arcillas	33
2.1.2.	Clasificación de los suelos.....	34
2.1.2.1.	Clasificación por tamaño de partículas.....	35
2.1.2.2.	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	37
2.1.2.3.	Clasificación AASHTO	39
3.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	45
3.1.	Tipos de estabilización de suelos	46
3.1.1.	Estabilización mecánica	46
3.1.2.	Estabilización volumétrica	46
3.2.	Métodos de estabilización de suelos	47
3.2.1.	Estabilización con cloruro de sodio (NaCl)	47
3.2.2.	Estabilización con cloruro de calcio (CaCl ₂).....	48
3.2.3.	Estabilización con silicato de sodio (Na ₂ SiO ₃)	49
3.2.4.	Estabilización con métodos químicos	49
4.	ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE MATERIAL PIROCLÁSTICO PROCEDENTE DEL VOLCÁN DE PACAYA.....	51
4.1.	Recolección de muestras de suelo.....	51
4.1.1.	Cohesivo	51
4.1.1.1.	Caracterización química y geológica del material cohesivo	52
4.1.2.	Arena volcánica	52

	4.1.2.1.	Caracterización química y geológica de la arena volcánica	53
4.2.		Ensayos de laboratorio.....	53
	4.2.1.	Ensayo de compactación Proctor modificado.....	54
	4.2.2.	Ensayo de relación de soporte California (CBR)	56
	4.2.3.	Ensayo granulométrico	58
	4.2.4.	Ensayo de límites de Atterberg	59
		4.2.4.1. Límite líquido.....	59
		4.2.4.2. Límite plástico	60
		4.2.4.3. Estados de consistencia.....	60
		4.2.4.3.1. Líquido	60
		4.2.4.3.2. Plástico	60
		4.2.4.3.3. Semisólido	61
		4.2.4.3.4. Sólido.....	61
	4.2.5.	Ensayo de compresión triaxial	62
	4.2.6.	Ensayo de equivalente de arena.....	64
	4.2.7.	Ensayo de gravedad específica	65
	4.2.8.	Ensayo de permeabilidad por el método de cabeza variable.....	67
5.		ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
	5.1.	Resultados de laboratorio	71
	5.2.	Interpretación de resultados	72
		5.2.1. Proctor modificado	73
		5.2.2. Relación de soporte California (CBR)	76
		5.2.3. Granulometría.....	78
		5.2.4. Límites de Atterberg.....	79
		5.2.5. Compresión triaxial	81
		5.2.6. Equivalente de arena	84

5.2.7.	Gravedad específica.....	85
5.2.8.	Permeabilidad por el método de cabeza variable....	87
CONCLUSIONES		89
RECOMENDACIONES		93
BIBLIOGRAFÍA.....		95
ANEXOS		97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Parque Nacional Tikal.....	4
2.	Laguna de Chichoj y montañas circundantes, en el municipio de San Cristóbal, Alta Verapaz	5
3.	Lago de Izabal y al fondo Sierra de Las Minas	7
4.	Mapa de Izabal con el Lago de Izabal y el río Polochic	7
5.	Vista desde la parte alta de la Sierra de Las Minas	9
6.	Montaña de Las Granadillas en Zacapa, cubierta de plantaciones de melón.....	10
7.	Campos de cultivo de hortalizas en Patzicía, Chimaltenango	11
8.	Vista aérea del volcán Tajumulco, en su cumbre se encuentra el punto más alto de Centroamérica (4 220 msnm).....	12
9.	Vista aérea del litoral pacífico de Guatemala	13
10.	Regiones fisiográficas de Guatemala	14
11.	Grava triturada	31
12.	Arena.....	32
13.	Limo.....	33
14.	Arcilla.....	34
15.	Diagrama triangular de clasificación de suelos.....	36
16.	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).....	38
17.	Gráfico de plasticidad.....	41
18.	Clasificación AASHTO	43
19.	Influencia de la energía de compactación	55
20.	Influencia del tipo de suelo	56

21.	Curva granulométrica	59
22.	Estados de consistencia del suelo	61
23.	Rectas de resistencia intrínseca del suelo	63
24.	Ensayo de equivalente de arena.....	65
25.	Permeámetro de compactación	69
26.	Humedad óptima vs densidad seca máxima utilizando diferentes porcentajes de arena volcánica	74
27.	Comportamiento de humedad óptima vs arena volcánica.....	75
28.	Comportamiento de la densidad seca máxima a distintos porcentajes de arena volcánica	76
29.	Variación del CBR al 95% de compactación utilizando distintos porcentajes de arena volcánica	77
30.	Comportamiento del porcentaje de grava, arena y finos utilizando distintos porcentajes de arena volcánica	79
31.	Variación del Límite Líquido e índice de plasticidad a distintos porcentajes de arena volcánica	80
32.	Variación del ángulo de fricción interna al adicionar arena volcánica a la muestra de arcilla color café.....	82
33.	Variación de la cohesión al adicionar arena volcánica a la muestra de arcilla color café	83
34.	Variación del equivalente de arena a distintos porcentajes de arena volcánica.....	85
35.	Variación de la gravedad específica a distintos porcentajes de arena volcánica.....	86

TABLAS

I.	Volcanes de Guatemala.....	16
II.	Clasificación del suelo según índice de CBR.....	58

III.	Valores típicos de consistencia del suelo	62
IV.	Gravedad específica de los sólidos de algunos suelos	66
V.	Tipo de formación o suelo según su coeficiente de permeabilidad	68
VI.	Grado de permeabilidad según su coeficiente de permeabilidad.....	69
VII.	Tabla resumen de resultados de la arcilla color café adicionando diferentes porcentajes de arena volcánica	72
VIII.	Variación entre humedad óptima y densidad seca máxima	73
IX.	CBR al 95% de compactación	77
X.	Variación del porcentaje de grava, arena y finos	78
XI.	Límites de Atterberg	80
XII.	Porcentaje de arena volcánica, ángulo de fricción interna y porcentaje de variación	81
XIII.	Cohesión a distintos porcentajes de arena volcánica	83
XIV.	Equivalente de arena adicionando arena volcánica.....	84
XV.	Gravedad específica adicionando arena volcánica	86
XVI.	Coeficiente de permeabilidad adicionando arena volcánica	87

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
k	Coefficiente de permeabilidad
g	Gramo
kg	Kilogramo
lb	Libra
m	Metro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetro
%	Porcentaje
s	Segundo
t	Tonelada

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway Officials.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
CBR	California Bearing Ratio.
Ceniza volcánica	Composición de partículas de roca y mineral muy finas (de menos de 2 milímetros de diámetro) expulsadas por una apertura volcánica.
CII	Centro de Investigaciones de Ingeniería.
Cohesión	Atracción relativa entre partículas similares, la que da tenacidad y dureza a un suelo haciéndolo resistente a su separación.
Estromboliano	Vulcanismo caracterizado por erupciones explosivas separadas por períodos de calma de extensión variable.
Flujo piroclástico	Immensa avalancha de ceniza, pómez, fragmentos de roca y gas calientes, de origen volcánicos que avanza ladera debajo de un volcán, a velocidades tan grandes como 100 km/h o más. La temperatura dentro del flujo, puede alcanzar 500° C.

Fumarola	Pequeña abertura por la que escapan los gases volcánicos dentro de la atmósfera. Estas aberturas pueden permanecer por grandes períodos de tiempo, dependiendo del aporte de calor de la corteza terrestre.
Lahar	Flujo de sedimento y agua que se moviliza desde las laderas de volcanes.
Lava	Magma que durante su ascenso a través de la corteza terrestre, alcanza la superficie.
Mineral	Sustancia natural, homogénea, de origen inorgánico y composición química definida.
Permeabilidad	Propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la infiltración.
Piroclásto	Fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva arrojado al aire durante una erupción volcánica.
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
Tamiz	Malla metálica constituida por barras tejidas y que dejan un espacio entre sí por donde pasa el suelo.
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala.

RESUMEN

El 27 de mayo de 2010, el volcán de Pacaya hizo erupción, la cual fue intensa, y expulsó material piroclástico que alcanzó incluso a la ciudad capital. En esa ocasión, se acumuló gran cantidad de material, el cual se desechó, debido a que no representaba un material útil para la construcción.

Al observarse tal situación, surgió la idea de determinar la posibilidad de estabilizar suelos cohesivos utilizando material piroclástico procedente del volcán de Pacaya.

Para determinar si esto era posible, se recolectaron muestras de arcilla y de material piroclástico. Luego, en el laboratorio de la Sección de Mecánica de Suelos, se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

- Proctor modificado
- Valor soporte California (CBR)
- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Compresión triaxial
- Equivalente de arena
- Gravedad específica
- Permeabilidad

Las muestras de suelo que se utilizaron en los ensayos, fueron las siguientes:

- Arcilla color café
- Mezcla: 75% arena volcánica – 25% arcilla
- Mezcla: 50% arena volcánica – 50% arcilla
- Mezcla: 25% arena volcánica – 75% arcilla
- Arena volcánica color gris oscuro

Al realizar todos los ensayos a las muestras de suelo, utilizando distintos porcentajes de arena volcánica, se pudo determinar la posibilidad de estabilizar suelos cohesivos utilizando material piroclástico procedente del volcán de Pacaya.

OBJETIVOS

General

Determinar la posibilidad de estabilizar mecánicamente un suelo cohesivo, a través de la utilización de material piroclástico procedente del volcán de Pacaya.

Específicos

1. Conocer los diversos tipos y métodos utilizados en la estabilización de suelos.
2. Realizar ensayos a las muestras de suelos cohesivos y suelos estabilizados, para determinar la posibilidad de estabilizarlas con material piroclástico procedente del volcán de Pacaya.
3. Profundizar los conocimientos que se poseen relacionados con la estabilización de suelos cohesivos.
4. Generar la oportunidad de percibir ingresos económicos al municipio de San Vicente Pacaya al poder comercializar el material piroclástico procedente del volcán del mismo nombre.

INTRODUCCIÓN

Guatemala se caracteriza por poseer gran cantidad de volcanes, 37 en total, la mayoría de ellos inactivos. Sin embargo, los que están activos (Pacaya, Fuego y Santiaguito) generan fuerte actividad volcánica. Esta actividad produce gran cantidad de material piroclástico, el cual se deposita en los terrenos situados en las faldas de los volcanes.

El 27 de mayo de 2010, el volcán de Pacaya hizo erupción, lanzando material piroclástico en grandes proporciones, el cual alcanzó incluso a la ciudad capital. En esa ocasión, se observó que el material piroclástico fue retirado, sin embargo, no se utilizó productivamente.

Al analizar esta situación, surgió la inquietud de determinar la posibilidad de utilizar material piroclástico procedente del volcán de Pacaya para estabilizar mecánicamente suelos cohesivos. Si el material piroclástico resulta útil para estabilizar, éste se podría aprovechar y potencialmente representaría una fuente de ingresos para las comunidades cercanas al volcán de Pacaya, si éstas llegaran a comercializar el mismo.

Actualmente, existen muchos materiales con los cuales es posible estabilizar suelos cohesivos, siendo unos más económicos que otros. Algunos de estos son: cal, cemento y cloruro de sodio. A pesar de la existencia de estos materiales, se posee la inquietud de encontrar otros materiales con los cuales sea posible la estabilización de los suelos cohesivos.

Para determinar la posibilidad de estabilizar mecánicamente suelos cohesivos con material piroclástico procedente del volcán de Pacaya, se llevaron a cabo diversos ensayos a las mezclas de suelo cohesivo, al que se le adicionó material piroclástico en diferentes proporciones. A través del análisis de resultados, fue posible obtener conclusiones del comportamiento de los materiales.

1. SÍNTESIS GEOLÓGICA DE GUATEMALA

1.1. Geomorfología

En Guatemala dominan 2 orientaciones estructurales a saber:

- Un arco este-oeste, convexo hacia el sur, de rocas cristalinas y sedimentarias, paleozoicas y mesozoicas, que se extiende desde Chiapas hasta el mar Caribe.
- Un alineamiento noroeste-sureste a través de América Central, representado por rocas volcánicas terciarias recientes, acentuado por una hilera de conos cuaternarios.

Las regiones que dominan estas orientaciones se les llaman respectivamente:

- Sierras del norte de América Central
- Provincia volcánica

Hacia el norte se encuentra la cuenca sedimentaria de Petén, aunque esta cuenca muestra alineamientos similares a la Cordillera Centroamericana, tiene afinidad más fuerte con la costa del Golfo de México.

Asimismo, en el territorio de Guatemala se distinguen 4 provincias fisiográficas, que son de sur a norte:

- Planicie costera del pacífico

A lo largo del litoral pacífico, los productos de la erosión de las tierras altas volcánicas, han creado una planicie costera con un ancho promedio de 50 kilómetros.

- Provincia volcánica o cinturón volcánico

La provincia volcánica cubre la parte occidental, sur y oriental de Guatemala, extendiéndose hacia las otras repúblicas centroamericanas.

Esta zona se caracteriza por sus altas montañas, por su cadena de altos conos y domos, varios de ellos todavía activos, como por ejemplo los volcanes Santiaguito, Fuego y Pacaya, que se encuentran alineados entre el plano costero del pacífico y un cinturón de rocas volcánicas terciarias.

En la provincia volcánica o cinturón volcánico, se encuentran también las enormes cuencas que contienen los lagos de Atitlán, Amatitlán y Ayarza, y anchos valles planos, profundamente rellenos con depósitos de pómez cuaternarios, como los de Chimaltenango, Tecpán, Chichicastenango, Quiché, Guatemala y Quetzaltenango.

- Cordillera central de Guatemala

La faja de rocas plutónicas, metamórficas y sedimentarias plegadas, que se extiende a través del centro del país, se ha llamado la Cordillera central de Guatemala; ésta forma parte del sistema cordillerano que se desarrolla desde Chiapas hasta las Islas de la Bahía de Honduras.

- Tierras bajas de Petén

Las tierras bajas de Petén representan un área de bosque tropical húmedo, con elevaciones promedio de 100 metros, formado por sedimentos mesozoicos y terciarios levemente plegados. Sobre calizas y dolomías cretácicas donde se desarrolló un relieve Karst extenso, dando lugar a terrenos muy accidentados. Debido al drenaje subterráneo hay amplias regiones sin suministro de agua durante la estación seca.

Según Gerardo Paiz, existen 8 regiones fisiográficas en Guatemala:

- Tierras bajas calcáreas (1)

Gerardo Paiz, sostiene que “se extienden desde la frontera con México al norte del país y finaliza al pie de las montañas del norte de los departamentos de Quiché, Alta Verapaz e Izabal. Estas tierras se originaron por la acumulación de los esqueletos calcáreos de los organismos acuáticos que quedaron atrapados en ellas, luego de salir del mar.

La topografía de las tierras bajas calcáreas va de plana a ondulada. Muchas personas piensan que son sitios propicios para las actividades agrícolas y pecuarias, pero no es cierto, ya que los suelos del lugar son frágiles y poco profundos.

Tal característica no permite el uso del suelo por largos períodos de tiempo y son agotados con facilidad. Los suelos de las tierras bajas calcáreas son principalmente de vocación forestal.

Debido a su topografía y origen, las tierras bajas calcáreas no son ricas en corrientes superficiales de agua, ya que el agua que cae de las lluvias se infiltra rápidamente hacia el subsuelo a profundidades que muchas veces no son accesibles para el humano.

Además, por las concentraciones de carbonato de calcio, el agua es muy salina y no apta para el consumo humano.”¹

Figura 1. **Parque Nacional Tikal**



Fuente: www.viajes-blog.com. Consulta: 07-08-11.

- Tierras altas calcáreas (2)

Según Gerardo Paiz, “su origen es similar a las de las tierras bajas calcáreas, con la diferencia de que no son tierras planas sino que montañosas. Esta situación se debe a que en estas zonas se encuentran fallas geológicas, cuyo roce provoca el levantamiento de la tierra. Las Sierras del Lacandón y Chinajá, las Montañas Mayas en Petén; la Sierra de Santa Cruz en Izabal y las Sierras de Yalijux y Chamá, se encuentran dentro de esta región fisiográfica.

¹PAIZ, Gerardo. Degradación ambiental y desastres en Guatemala. p. 11.

Las tierras altas calcáreas no son aptas para la agricultura, debido a su quebrado relieve y sus suelos poco profundos, los cuales son fáciles de erosionar. Al eliminarse su cubierta original, tienden a deslizarse con facilidad, especialmente cuando el agua se encuentra presente.

Al eliminarse la cobertura arbórea original (grupo de árboles) de estas tierras, los suelos se lavan con facilidad, quedando finalmente una superficie caliza rocosa en la que difícilmente pueden crecer árboles, pero también es difícil lograr cultivos o crianza de ganado.”²

Figura 2. **Laguna de Chichoj y montañas circundantes, en el municipio de San Cristóbal, Alta Verapaz**



Fuente: www.pami-guatemala.org/Documentos/Asdena/Libro1Asdena.pdf. Consulta: 07-08-11.

- Valle del río Polochic y lago de Izabal (3)

Gerardo Paiz cita que “el río Polochic drena sobre una de las fallas geológicas más largas de Guatemala; se origina entre Alta y Baja Verapaz en

²PAIZ, Gerardo. Degradación ambiental y desastres en Guatemala. p. 12.

los municipios de Tamahú, La Tinta y Purulhá. A su paso transporta los materiales que se erosionan en las partes altas de las sierras de Chamá, Yalijux y Las Minas.

Los materiales que se transportan, van siendo depositados a las orillas del río, enriqueciendo los suelos en la parte baja de la cuenca en las zonas de los municipios de Panzós en Alta Verapaz y El Estor, Izabal.

Las tierras del valle del río Polochic son aptas para la agricultura en las zonas que no son inundadas. A su paso por el valle, el río Polochic va aumentando su caudal, debido al alimento de los ríos provenientes de las sierras, y luego se transforma en el lago de Izabal, que es el cuerpo de agua dulce más grande que tiene Guatemala. El lago de Izabal, posee más de 500 kilómetros cuadrados de extensión, pero es poco profundo.

El lago de Izabal provee de los medios de subsistencia a todos los pueblos que se encuentran alrededor ya que el agua permite desarrollar variadas actividades productivas como: agricultura, ganadería, pesca y recreación.

Al recorrer más al este del lago de Izabal, éste se reduce en ancho y se transforma en el río Dulce. Esto se debe a que los materiales del suelo en donde el lago se transforma en río, son duros y ondulados. De origen calcáreo, su encañonamiento conduce el agua hasta desembocar en el océano Atlántico. El río Polochic, lago de Izabal y río Dulce, son un mismo sistema hídrico.”³

³PAIZ, Gerardo. Degradación ambiental y desastres en Guatemala. p. 12.

Figura 3. **Lago de Izabal y al fondo la Sierra de Las Minas**



Fuente: www.pami-guatemala.org/Documentos/Asdena/Libro1Asdena.pdf. Consulta: 07-08-11.

Figura 4. **Mapa de Izabal con el Lago de Izabal y el río Polochic**



Fuente: www.pami-guatemala.org/Documentos/Asdena/Libro1Asdena.pdf. Consulta: 07-08-11.

- Tierras altas cristalinas (4)

Gerardo Paiz dice que “se encuentran situadas en la parte central de Guatemala, se extienden del oeste al este, desde la frontera con México en Huehuetenango, hasta el sur del lago de Izabal en el departamento de Izabal.

Las sierras que componen las tierras altas cristalinas son:

- Los Cuchumatanes en Huehuetenango y Quiché
- Chuacús en Quiché y Baja Verapaz
- Las Minas entre Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Progreso, Zacapa e Izabal

Las tierras altas cristalinas, se caracterizan por estar compuestas de rocas ígneas como las micas, feldespatos, cuarzos y otros. Estas tierras fueron formadas por el enfriamiento repentino del magma, es decir, aunque en la zona no se encuentran volcanes, se supone que en la zona existían hace millones de años, grietas que liberaban el magma bajo la superficie del mar; mucho antes que el territorio guatemalteco saliera de abajo del agua.

Actualmente, las tierras altas cristalinas son zonas montañosas que se han levantado, debido a la presión que ejercen entre sí, la falla del río Motagua con las fallas de los ríos Cuilco y Polochic.

Las tierras altas cristalinas tienen funciones importantes para la captación de agua y distribución de la misma en el territorio guatemalteco. Al quedar desprovistas de sus bosques naturales, estas tierras son frágiles y con facilidad pueden darse deslaves en ellas, aún sin la presencia del agua.

Esto ocurre debido a que el subsuelo contiene grandes rocas sueltas que al no ser retenidas por la red de raíces de los bosques, éstas quedan sueltas, ya que la fuerza de gravedad facilita su caída.”⁴

Figura 5. **Vista desde la parte alta de la Sierra de Las Minas**



Fuente: www.pami-guatemala.org/Documentos/Asdena/Libro1Asdena.pdf. Consulta: 07-08-11.

- Valle del río Motagua (5)

Según Gerardo Paiz, “se extiende al sur de la Sierra de Las Minas, entre los departamentos de El Progreso, Zacapa e Izabal. Se supone que esta área fue una de las últimas en quedar bajo el nivel del mar al emerger el territorio guatemalteco del mismo. En el medio del valle, drena hacia el océano Atlántico el río Motagua, que es uno de los ríos más largos de Guatemala. Debajo de él se encuentra también la falla geológica más larga de Guatemala (falla del Motagua), que atraviesa su territorio de oeste a este.

⁴PAIZ, Gerardo. Degradación ambiental y desastres en Guatemala. p. 13.

Las tierras del valle del río Motagua son semiáridas, debido al efecto que hace la Sierra de Las Minas en la captación de agua: las nubes cargadas de humedad provenientes del Atlántico al chocar con la muralla montañosa de la Sierra de Las Minas se precipitan en forma de lluvia, y cuando llegan al valle ya han descargado el agua en las partes altas y medias de la montaña, por lo que las lluvias en el valle son escasas.

Los suelos del valle del Motagua son fértiles cuando pueden ser regados. Muchas de las especies de plantas y animales que viven en el valle del río Motagua, son muy raras y se encuentran en peligro de extinción.”⁵

Figura 6. **Montaña de Las Granadillas en Zacapa, cubierta de plantaciones de melón**



Fuente: www.panoramio.com/places. Consulta: 07-08-11.

⁵PAIZ, Gerardo. Degradación ambiental y desastres en Guatemala. p. 14.

- Tierras altas volcánicas (6)

Gerardo Paiz cita que están “formadas por la deposición y acumulación de materiales arrojados en las distintas erupciones de los volcanes ubicados al sur de Guatemala. En estas tierras los suelos son profundos, a veces se encuentran suelos enterrados por erupciones consecutivas. En sitios con pendientes mayores al 30 por ciento, los suelos son altamente frágiles. Las tierras altas volcánicas abarcan parte de los departamentos de Huehuetenango, San Marcos, Totonicapán, Quiché, Sololá, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa, Jutiapa, Jalapa y Chiquimula.

Las poblaciones más grandes de Guatemala, se encuentran asentadas en esta región fisiográfica: después de la ciudad de Guatemala, es en la zona occidental de la república donde se encuentran las mayores densidades poblacionales.”⁶

Figura 7. **Campos de cultivo de hortalizas en Patzicía, Chimaltenango**



Fuente: www.pami-guatemala.org/Documentos/Asdena/Libro1Asdena.pdf. Consulta: 07-08-11.

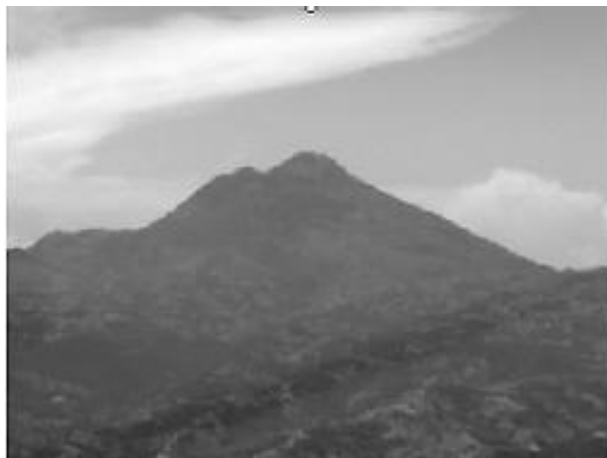
⁶PAIZ, Gerardo. Degradación ambiental y desastres en Guatemala. p. 14.

- Cordillera volcánica (7)

Gerardo Paiz señala que “está conformada por los 37 conos volcánicos que se extienden al sur del territorio guatemalteco, desde la frontera con México, hasta la frontera con El Salvador. Sus suelos se desarrollaron sobre materiales arrojados por los volcanes. Poseen una pendiente pronunciada y es en esta cordillera donde se encuentran las cumbres más altas de Guatemala y Centroamérica.

Por ser una barrera natural de gran altura, estas tierras precipitan la humedad, proveniente del océano pacífico, y la drenan de nuevo hacia el mar. En la cordillera volcánica nacen ríos de fuerte pendiente y que por sus condiciones de deforestación, en los últimos años, han causado impactos negativos sobre la infraestructura nacional.”⁷

Figura 8. **Vista aérea del volcán Tajumulco, en su cumbre se encuentra el punto más alto de Centroamérica (4 220 msnm)**



Fuente: www.pami-guatemala.org/Documentos/Asdena/Libro1Asdena.pdf. Consulta: 07-08-11.

⁷PAIZ, Gerardo. Degradación ambiental y desastres en Guatemala. p. 15.

- Planicie costera del Pacífico (8)

Según Gerardo Paiz “es una planicie que abarca todo el sur del territorio guatemalteco, su ancho promedio es de 45 kilómetros. Sus suelos fueron desarrollados tanto por la deposición de cenizas volcánicas arrojadas por la cordillera volcánica, como por la deposición de materiales arrastrados por los ríos provenientes de la cordillera volcánica reciente.

Los suelos de la planicie costera del pacífico, son profundos y aptos para la agricultura, ganadería y otros usos. Son planos en su mayoría.”⁸

Figura 9. **Vista aérea del litoral pacífico de Guatemala**

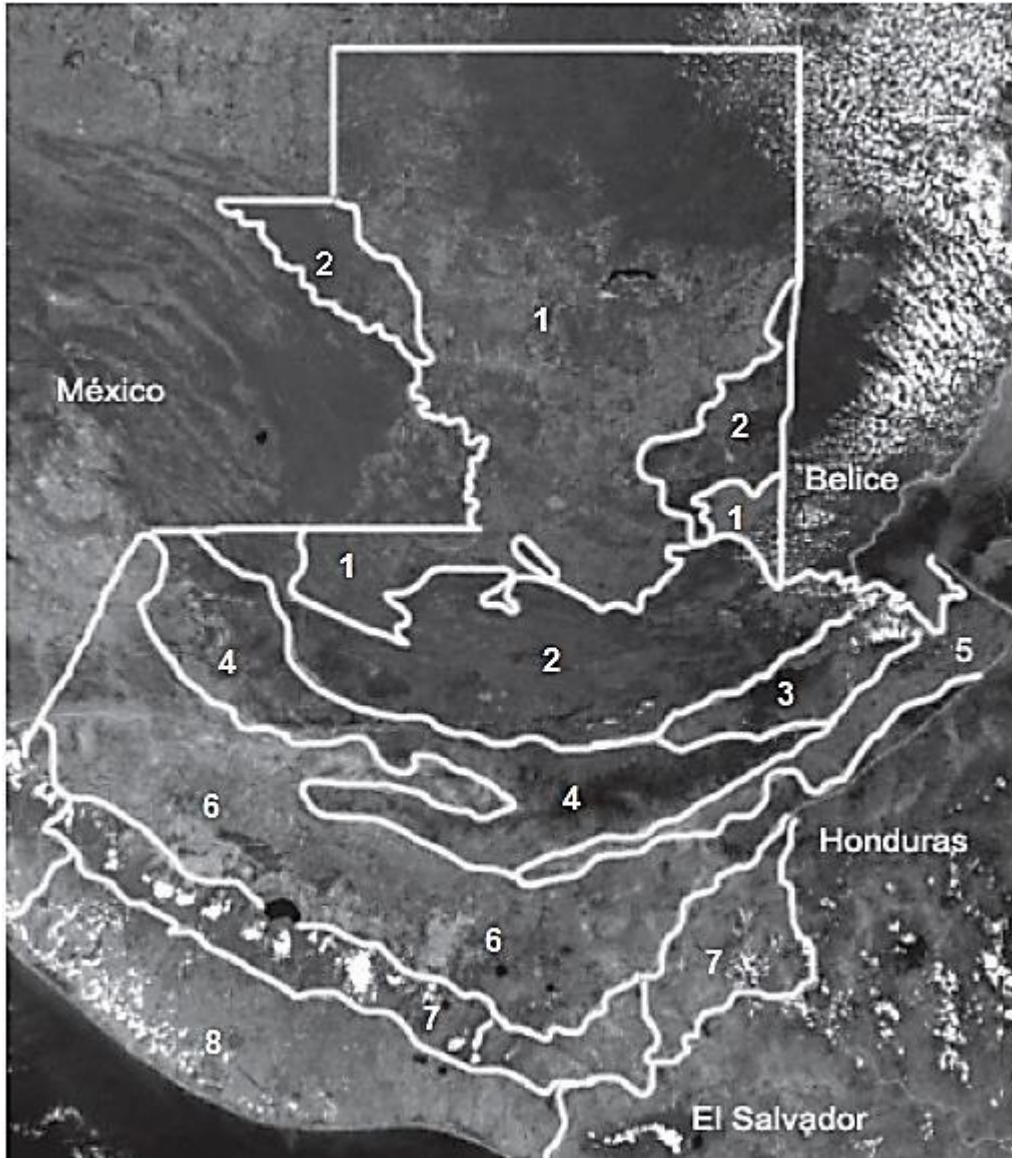


Fuente: www.pami-guatemala.org/Documentos/Asdena/Libro1Asdena.pdf. Consulta: 07-08-11.

A continuación se muestra en un mapa las 8 regiones fisiográficas de Guatemala:

⁸PAIZ, Gerardo. Degradación ambiental y desastres en Guatemala. p. 15.

Figura 10. **Regiones fisiográficas de Guatemala**



Fuente: www.pami-guatemala.org/Documentos/Asdena/Libro1Asdena.pdf. Consulta: 07-08-11.

1.2. Volcanes de Guatemala

Según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) “un volcán es una estructura geológica, por la cual emerge el magma en forma de lava, ceniza volcánica y gases del interior del planeta. El ascenso ocurre generalmente en episodios de actividad violenta denominados erupciones, las cuales pueden variar en intensidad, duración y frecuencia; siendo desde conductos de corrientes de lava, hasta explosiones extremadamente destructivas.

Generalmente adquieren una característica de forma cónica que es formada por la presión del magma subterráneo, así como de la acumulación de material de erupciones anteriores. Encima del volcán se puede encontrar su cráter o caldera.

En Guatemala existen 37 volcanes, los cuales están alineados sobre la cordillera que corre paralela al pacífico. Entre los volcanes que alcanzan más de 3 000 metros de altura, se encuentran:

- Tajumulco, 4 220 m
- Tacaná, 4 093 m
- Acatenango, 3 976 m
- Agua, 3 766 m
- Fuego, 3 763 m
- Santa María, 3 772 m
- Atitlán, 3 537 m”⁹

A continuación en la tabla I se muestra la lista de volcanes de Guatemala.

⁹Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Consulta: 15-08-11

Tabla I. **Volcanes de Guatemala**

No.	NOMBRE	DEPARTAMENTO	ALTURA (msnm)
1	Acatenango	Chimaltenango / Sacatepéquez	3 976
2	Agua	Sacatepéquez	3 766
3	Alzatate	Jalapa	2 050
4	Amayo	Jutiapa	1 544
5	Atitlán	Sololá / Suchitepéquez	3 537
6	Cerro Quemado	Quetzaltenango	3 197
7	Cerro Redondo	Santa Rosa	1 267
8	Cruz Quemada	Santa Rosa	1 620
9	Culma	Jutiapa	1 027
10	Cuxliquel	Totonicapán	3 004
11	Chicabal	Quetzaltenango	2 900
12	Chingo	Jutiapa	1 775
13	Fuego	Chimaltenango / Sacatepéquez / Escuintla	3 763
14	Ipala	Chiquimula	1 650
15	Ixtepeque	Jutiapa	1 292
16	Jumay	Jalapa	2 176
17	Jumaytepeque	Santa Rosa	1 815
18	Lacandón	Quetzaltenango	2 770
19	Las Víboras	Jutiapa	1 070
20	Monte Rico	Jutiapa	1 285
21	Moyuta	Jutiapa	1 662
22	Pacaya	Guatemala / Escuintla	2 550
23	Quezaltepeque	Chiquimula	1 904
24	San Antonio	San Marcos	2 514
25	San Pedro	Sololá	3 020
26	Santa María	Quetzaltenango	3 772
27	Santo Tomás	Quetzaltenango / Sololá	3 505
28	Santiaguito	Quetzaltenango	2 500
29	Siete Orejas	Quetzaltenango	3 370
30	Suchitán	Jutiapa	2 042
31	Tacaná	San Marcos	4 093
32	Tahual	Jutiapa / Jalapa	1 716
33	Tajumulco	San Marcos	4 220
34	Tecuamburro	Santa Rosa	1 962
35	Tobón	Jalapa	2 087
36	Tolimán	Sololá	3 158
37	Zunil	Quetzaltenango / Sololá	3 542

Fuente: elaboración propia, con datos del CONAP. 1999. Los volcanes de Guatemala.

1.3. Historia geológica del volcán de Pacaya

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología dice que: “el volcán de Pacaya es parte del arco volcánico Centroamericano, una cadena de volcanes situada a lo largo de la costa del pacífico de Centroamérica, que se formó por la subducción de la placa de Cocos debajo de la placa del Caribe. Yace en la orilla de una considerable caldera formada en el era del Pleistoceno que contiene el lago de Amatitlán.

La caldera se formó como resultado de al menos 90 grandes explosiones a lo largo de 300 000 años, generando un total de 70 kilómetros cúbicos de magma. Después de la última erupción que formó la caldera, hace 23 000 años, se formaron muchos pequeños cráteres con actividad eruptiva dentro y alrededor de la caldera, entre ellos el Pacaya. El volcán de Pacaya es el más grande de la era post caldera de Amatitlán, y ha sido uno de los volcanes más activos de Centroamérica en los últimos 500 años.”¹⁰

1.4. Volcán de Pacaya

Según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología “el conjunto está constituido por varias cúspides fuertemente fracturadas y de estructuras complicadas, existen ahí dos conos de escorias recientes que han estado activos en tiempos históricos, los cuales lo componen:

- El cerro Chino
- El inactivo
- El cono Mackenney, activo desde 1966

¹⁰Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Consulta: 15-08-11

En su falda noroeste se extiende un complejo de cúpulas de lava. A continuación se presentan datos importantes del volcán de Pacaya:

- Tipo de actividad: explosión normal de cráter central
- Tipo de erupción: estromboliana
- Índice explosión volcánica: 4 (1775)
- Índice peligrosidad: 13
- Ubicación: 40 km al SSW de la ciudad de Guatemala
- Posición geográfica:
 - 14 grados, 23 minutos. Latitud norte
 - 90 grados, 36.2 minutos. Longitud oeste
- Altura: 2 562.08 msnm, altura relativa 1 000 m”¹¹

1.4.1. Forma y estructura del volcán

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología cita que “el complejo volcánico de Pacaya, se ubica en la parte sur de una muy antigua caldera volcánica, cuya depresión principal, está actualmente ocupada por el Lago de Amatitlán.

El complejo Pacaya, comprende varias estructuras: un antiguo estrato volcán, domos de lava y el moderno volcán compuesto. Este último es el que ha causado las erupciones en tiempos recientes.

El antiguo estrato volcán, ocupa el centro del complejo volcánico, tiene laderas suaves parcialmente erosionadas y abarca hasta cerca de San Vicente Pacaya. Su actividad posiblemente inició hace 23 000 años, en el sitio que ocupa la laguna de Calderas.

¹¹Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Consulta: 15-08-11

En la margen sur del lago de Amatitlán y en los alrededores del actual volcán compuesto, hay presencia de domos que tienen una composición ácida e intermedia, y que se reflejan en la topografía como cerros redondeados.

El llamado volcán compuesto moderno, es un estrato volcán con una caldera en forma de herradura que se abre hacia el suroeste, y se ubica en la parte suroccidental del complejo volcánico.

Dentro de ésta caldera, existe un cono formado posteriormente, llamado cono MacKenny, el cuál ha ido cambiando su forma desde 1961 por un frecuente volcanismo efusivo y explosivo.

Esta actividad ha generado frecuentes flujos de lava que cubren el fondo de la caldera y se extienden principalmente hacia el sur. En el borde norte de la caldera, existe un pequeño cono parásito, llamado cerro Chino.”¹²

1.4.2. Actividad volcánica

A continuación se muestra un resumen de la actividad volcánica del volcán de Pacaya, según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología:

- 1565: fuerte erupción, acompañada por terremotos.
- 1651: lanzamiento de cenizas, retumbos y temblores.
- 1664: erupción con retumbos y fuerte resplandor nocturno.

¹²Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Consulta: 15-08-11

- 1775: lanzamiento de ceniza que obscurece varios días la ciudad.
- 1846: activación en el cono de la cúspide.
- 1856 – 1880: erupciones y actividad fumarólica.
- 1902: actividad fumarólica de corta duración.
- 1917: durante el mes de diciembre, actividad fumarólica que dura pocos meses.
- 1935: en el mes de junio, actividad fumarólica de poca duración.
- 1961: durante el mes de marzo, fuerte erupción con efusión de lavas en ladera SW que alcanzan casi 8 kilómetros al sur.
- 1962: el 20 de marzo, hundimiento del sector SW del cono principal (150 m de largo y 100 metros de ancho).
- 1965: el 10 de enero, flujo de lava quema bosques de pinos al SE. El 21 y 22 de mayo, actividad eruptiva. El 26 de junio, crecimiento de cono de escoria dentro del hundimiento de 1962. El 11 de julio, actividad fumarólica y flujo de lavas en el hundimiento. Ensanchamiento de foco eruptivo e incremento de explosiones y lava al SW.
- 1967: el 24 de enero, 23 de febrero y 9 de mayo, emisión de ceniza y lava. El 15 de septiembre, actividad apreciable.

- 1983: durante enero y febrero, explosiones ocasionales y emisión de lava en el flanco del hornito. Durante septiembre y noviembre, actividad estromboliana con flujo de lava en el flanco del hornito.
- 1984: en diciembre, erupción con flujo de lava y formación de columna de ceniza de casi 8 kilómetros de altura.
- 1986: en enero, expulsión de casi 5 millones de metros cúbicos de material, depositando ceniza en El Caracol, Los Pocitos y El Patrocinio. Evacuación de más de 3 000 personas, daños en viviendas y pérdida de animales domésticos. En diciembre, erupción con daños a la agricultura y a 12 personas; 25 viviendas con techo perforado por caída de proyectiles lanzados por el volcán (bloques de casi $\frac{1}{4}$ kilogramo y diámetro de 25 centímetros). Obstrucción de caminos.
- 1987: del 21 al 25 de enero, erupción afectando Amatitlán y Santa Elena Barillas. Caída de ceniza en El Caracol, El Rodeo y parcialmente en El Patrocinio; evacuación de habitantes. El 14 de junio, río de lava al SW; 600 evacuados.
- 1989: del 7 al 11 de marzo, flujos de lava amenazan El Patrocinio, El Rodeo y El Caracol.
- 1990: el 2 de abril y el 15 de septiembre, erupciones con caída de ceniza en El Patrocinio y El Caracol.
- 1991: el 5 de marzo y del 8 al 15 de julio, erupción con leve caída de ceniza en El Caracol y El Patrocinio.

Del 6 al 16 de junio, erupciones y destrucción de cráter activo. El 27 de julio, erupción con caída de ceniza en El Caracol, El Patrocinio, Escuintla y Santa Lucia Cotzumalguapa.

El 1 de agosto, columna de 3 000 metros de altura provoca caída de ceniza en Barberena y Cuilapa.

- 1993: el 10 de enero, colapso de cráter activo provoca avalancha incandescente hacia El Caracol y la columna eruptiva fue transportada a Santa Elena Barillas; follaje quemado por efecto de la acidez de la ceniza. El 21 de septiembre, erupción con caída de ceniza en El Caracol.
- 1994: el 16 de marzo, erupción con fuente de lava de 300 metros de altura; caída de ceniza en las faldas del volcán. El 15 de octubre, erupción freatomagmática, vegetación quemada debido a la ceniza entre el volcán, Santa Elena Barillas y la aldea Los Llanos. Reporte de enfermedades bronquiales y pulmonares entre los pobladores.
- 1995: el 7 de abril, flujo de lodo volcánico sepulta casa en el caserío Los Ríos (muere una niña), evacuación de habitantes y deposición de arena volcánica.

Del 1 al 7 de junio, colapsos en cráter activo, avalanchas destruyen algunas antenas de transmisión y queman parcialmente la vegetación en 4 kilómetros cuadrados de la montaña Las Granadillas. Flujos de lodo dañan caminos y un puente incomunicando las comunidades El Patrocinio y Los Ríos, obligando a la evacuación y al traslado parcial de los habitantes a otra área más segura.

El 17 de septiembre, erupción freatomagmática; caída de ceniza y polvo volcánico en Santa Elena Barillas, Barberena y Cuilapa.

- 1996: el 11 de octubre, erupción con fuente de lava y flujo de lava de 1,5 kilómetros al SW; ceniza muy fina al océano pacífico. El 11 de noviembre, erupción forma colada de lava de 2 kilómetros de largo y deposita ceniza volcánica en alrededores de El Caracol, Finca El Rabón y El Rodeo. Evacuación en El Caracol, El Rodeo y El Patrocinio.
- 1998: el 20 de mayo, erupción y caída de ceniza en la capital, cierre del Aeropuerto Internacional La Aurora durante 3 días. Incendio forestal en Cerro Grande, debido a caída de bombas y bloques incandescentes. Evacuación en comunidades San Francisco de Sales, El Cedro y El Pepinal. El 14 de junio, erupción con fuente incandescente acompañada de columnas de ceniza que deposita una capa de 2,5 centímetros de escoria fina en El Caracol. Columna eruptiva hasta casi 1 700 metros de altura.

El 18 de junio, explosión con caída de bloques incandescentes en los flancos del volcán, caída de ceniza fina en San Vicente Pacaya. Coladas de lava hacia el WNW, el norte y al sur en dirección al caserío El Caracol. Columna de ceniza de casi 5 kilómetros de altura. Caída de ceniza muy fina en el Aeropuerto Internacional La Aurora, provocando el cierre por 35 horas. Colapso en el cráter activo, generando avalancha de escombros que produjo una nube de ceniza, gas y bloques calientes que quemaron vegetación.

El 11 de diciembre, explosiones con expulsión de material incandescente hasta 25 metros encima del cráter activo.

- 2000: el 16 de enero, erupción con fuente incandescente. Flujo de lava al SW acompañado de nubes ardientes que alcanzan la base del cono. Deposición de escoria basáltica hasta casi 7 kilómetros de distancia y ceniza en Escuintla.

El 29 de febrero, erupción con fuente de lava, acompañada de columna de ceniza de casi 6 kilómetros de altura desplazada al SW por el viento. Caída de ceniza en El Caracol, El Rodeo y El Patrocinio.

Entre el 1 y 2 de agosto, erupción con columnas de 600 metros de altura con caída de ceniza a inmediaciones del cerro Chino. Fuente de lava de hasta 400 metros de altura. La parte superior del volcán, crece casi 7 metros. Caída de ceniza en alrededores de cerro Chino y Montaña Las Granadillas.

El 3 y 4 de agosto, erupción, desgasificación y columnas de más de 2 000 metros de altura. Constantes explosiones, con aporte de gases.

Del 5 al 6 de agosto, desgasificación y explosiones con poco aporte de ceniza, produciendo lluvia ácida que daña el pasto entre el volcán, San Francisco de Sales y El Cedro.

El 7 y 8 de agosto, erupción estromboliana con pequeñas explosiones de ceniza. Fuente de lava de hasta 300 metros de altura y columna de partículas finas de 1 500 metros de altura.”¹³

¹³Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Consulta: 15-08-11

- 2010: el 27 de mayo el volcán de Pacaya hizo erupción explosivamente, destruyendo o dañando aproximadamente 800 viviendas, en las comunidades cercanas, forzando la evacuación de alrededor de 2 000 personas, 59 personas heridas y matando a un reportero de noticias.

Los daños más severos e impactantes para las personas y las propiedades, se presentaron en las cercanías a las comunidades de 2,5 a 3,5 kilómetros al norte del cráter, causados por proyectiles balísticos, y en menor medida por la acumulación de varios centímetros de ceniza volcánica.

Un área más amplia que incluye prácticamente toda la extensión urbana de la ciudad de Guatemala, se vio afectada por la deposición de una capa de ceniza más delgada, lo cual hace necesario cerrar el internacional aeropuerto La Aurora por 5 días.

1.4.3. Depósitos volcánicos

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología dice que: “posee conos de ceniza basálticos y capas de pómez dacítica, flujos piroclásticos y coladas de lava y lahares, se ha identificado la presencia de un alud de detritos en el río Metapa, el cual avanzó al SSO del volcán Pacaya, donde se originó”.¹⁴

¹⁴Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Consulta: 15-08-11

1.4.4. Peligro volcánico

Según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología “dentro de los peligros volcánicos se pueden mencionar los siguientes:

- Caída de ceniza
- Lluvia de piroclásticos
- Flujos piroclásticos
- Flujos de lava
- Lahares”¹⁵

1.4.5. Petrografía

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología sostiene que “A. Bergeat en 1894 determinó la roca del volcán como andesita de horblenda. Esta clasificación según Meyer-Abich se refiere a la cúpula de lava de la cúspide. Sapper opina que se trata de andesita de horblenda e hiperstena. En la base del volcán afloran tobas, brechas y pómez.”¹⁶

1.4.6. Geoquímica

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología indica que: “de acuerdo con la geoquímica, las rocas se han

¹⁵Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Consulta: 15-08-11

¹⁶Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Consulta: 15-08-11

clasificado como típicas andesitas y riolacitas. Los valores promedios de sílice en las rocas del volcán Pacaya; son de 50,86 por ciento y 70,30 por ciento.”¹⁷

¹⁷Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Consulta: 15-08-11

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. El suelo y su origen

Según Carlos Crespo, “el 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 la actividad de los seres vivos que sobre ella se asientan. Desde el punto de vista de la ingeniería, suelo es el sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas, especialmente las propiedades mecánicas.

Las rocas de la corteza terrestre, a través de un proceso de desintegración mecánica y de descomposición química, forman los materiales sueltos que se encuentran en ella. Entre los agentes físicos que producen cambios en las rocas se tienen:

- El sol
- El agua
- El viento
- Los glaciares”¹⁸

2.1.1. Principales tipos de suelos

Tomando en cuenta el origen de sus elementos, los suelos se dividen en 2 grandes grupos: suelos cuyo origen se debe a la descomposición físico y/o

¹⁸CRESPO, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. p. 18.

química de las rocas (suelos inorgánicos), y suelos cuyo origen es principalmente orgánico.

En los suelos inorgánicos, si el producto del intemperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó, da origen a un suelo residual; en caso contrario forman un suelo transportado, ya sea por el agua, viento, gravedad o los glaciares.

Los suelos orgánicos se forman casi siempre *in situ*. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta o en su estado de descomposición, es tan alta con relación a la cantidad de suelo inorgánico, que las propiedades que pudieran derivar de la porción mineral quedan eliminadas. A continuación se describen los tipos de suelos, con nombres generalmente utilizados en ingeniería civil.

2.1.1.1. Suelos granulares

Son los suelos que no poseen ninguna cohesión, y consisten en rocas, gravas, arenas y limos.

2.1.1.1.1. Gravos

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas que tienen más de 2 milímetros de diámetro. Dado su origen, cuando son acarreadas por las aguas, las gravas sufren desgaste en sus aristas y como consecuencia su forma es redondeada. Es común encontrarla como material suelto en los lechos, las márgenes de los ríos, depresiones de terrenos rellenadas por el acarreo de los ríos y en muchos otros lugares a los cuales las gravas han sido retransportadas.

Figura 11. **Grava triturada**



Fuente: www.canterasega.com/aridos.php. Consulta: 16-10-11.

2.1.1.1.2. Arenas

La arena es el material de granos finos procedentes de la erosión de las rocas o de su trituración artificial, tales partículas varían entre 2 milímetros y 0,05 milímetros de diámetro. El origen y existencia de las arenas, es análoga a la de las gravas; ambas suelen encontrarse juntas en el mismo depósito.

Con frecuencia la arena de río contiene proporciones relativamente grandes de grava y arcilla. Estando limpias, las arenas son materiales que no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que la arcilla y se comprimen casi instantáneamente al aplicarles carga en su superficie.

Figura 12. **Arena**



Fuente: www.canterasega.com/aridos.php. Consulta: 16-10-11.

2.1.1.2. Suelos cohesivos

Son suelos que poseen características de cohesión y plasticidad. Dichos suelos pueden ser granulares con parte de arcilla o limo orgánico, que les importen cohesión y plasticidad, o pueden ser arcillas o limos orgánicos sin componentes granulares.

2.1.1.2.1. Limos

Los suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, reciben el nombre de limos, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo este último de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0,05 milímetros y 0,005 milímetros.

Los limos sueltos y saturados no son adecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta.

Figura 13. **Limo**



Fuente: www.seillevaley.com/limo. Consulta: 16-10-11.

2.1.1.2.2. Arcillas

Las arcillas son partículas sólidas con diámetro menor a 0,005 milímetros y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque con frecuencia contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados.

La estructura de estos minerales es, generalmente cristalina y complicada, con sus átomos dispuestos en forma laminar. De hecho se puede decir que hay 2 tipos clásicos de éstas láminas, uno de ellos del tipo silícico y el otro del tipo alumínico.

Figura 14. **Arcilla**



Fuente: www.americanpreppersnetwork.com/clay. Consulta: 16-10-11.

2.1.2. Clasificación de los suelos

Carlos Crespo sostiene que “la mecánica de suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos, debido a la variedad de suelos que existen en la naturaleza. Cada uno de estos métodos tiene, prácticamente su campo de aplicación según la necesidad y uso que los haya fundamentado.”¹⁹

¹⁹CRESPO, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. p. 87.

A continuación se mencionan algunas de las distintas clasificaciones de suelos:

- Clasificación según el tamaño de sus partículas
- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)
- Clasificación de la Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos (AASHTO)

La variedad de sistemas de clasificación de suelos, posiblemente se debe al hecho de que tanto el ingeniero civil como el geólogo y el agrónomo, analizan el suelo desde diferentes puntos de vista. Sin embargo lo que es fundamental, es el hecho de que cualquier clasificación que quiera abarcar las necesidades correspondientes, debe estar basada en las propiedades mecánicas de los suelos, ya que éstas son fundamentales en las variadas aplicaciones de la ingeniería.

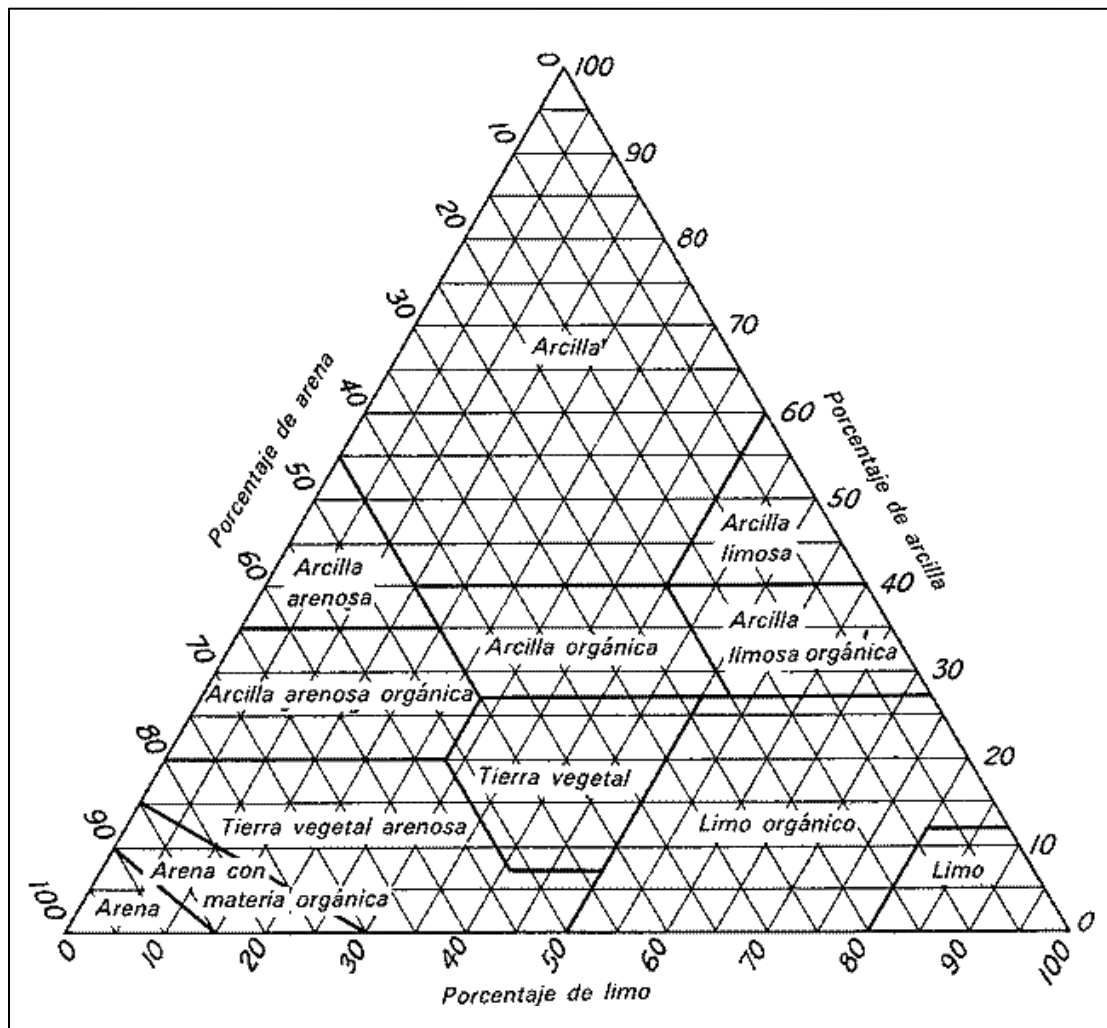
A continuación se describirán 3 de las clasificaciones más utilizadas en el medio, siendo estas; la clasificación por tamaño de partículas, el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y la Clasificación de la Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos (AASHTO).

2.1.2.1. Clasificación por tamaño de partículas

Según Carlos Crespo “los resultados obtenidos de la prueba de granulometría por sedimentación, se aplican en el diagrama triangular de clasificación de suelos, dada por la Comisión del río Mississippi y con ello se obtiene la clasificación del suelo.

Para clasificar el suelo, se toma el porcentaje de arena, limo y arcilla sobre escala del lado correspondiente del triángulo, se trazan 3 rectas y su punto común da la clasificación del suelo.

Figura 15. Diagrama triangular de clasificación de suelos



Fuente: www.civildocs.com/2011/05/sistemas-de-clasificacion-de-suelos.html.

Consulta: 05-11-11.

La clasificación de los suelos por el tamaño de sus partículas, es la más simple de todas, pero tiene el inconveniente de que su relación con las principales características físicas del suelo es indirecta, pues el tamaño de los granos es solo uno de los diferentes factores, de los cuales dependen ciertas propiedades físicas importantes de los suelos, tales como la permeabilidad y la cohesión.”²⁰

2.1.2.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Carlos Crespo dice que “este sistema fue propuesto por Arthur Casagrande, como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesta en 1942 para aeropuertos.

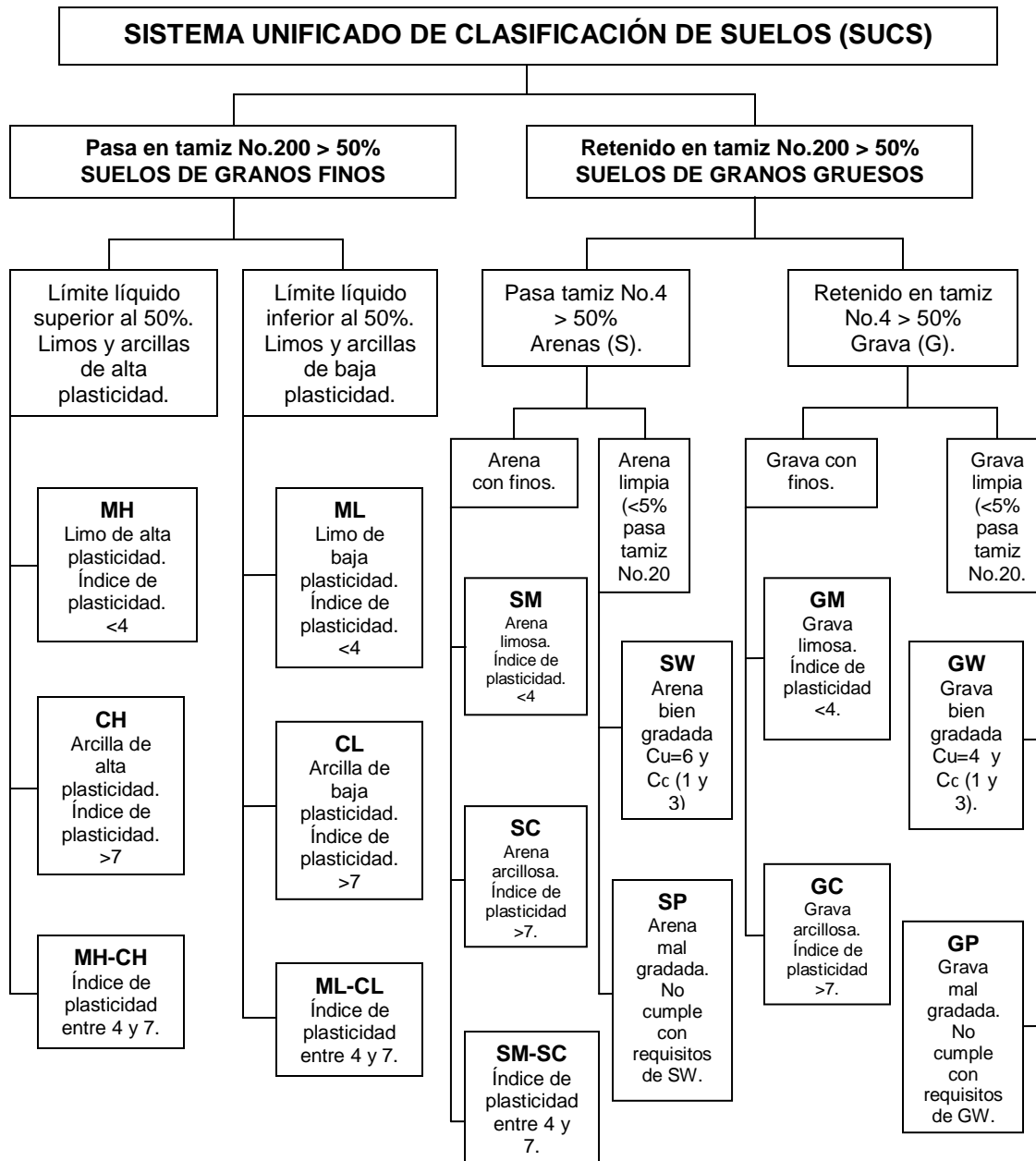
El diagrama presenta la clasificación del sistema unificado. Como se puede observar, los suelos de partículas gruesas y los suelos de partículas finas se distinguen mediante el tamizado del material por la malla # 200.

Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicha malla y los finos a los que la pasan, y así un suelo se considera grueso si más del 50 por ciento de las partículas del mismo son retenidas en la malla #200, y fino si más del 50 por ciento de sus partículas son menores que dicha malla. Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo para cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres ingleses de los 6 principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba) mientras que los sufijos indican subdivisiones de dichos grupos.”²¹

²⁰CRESPO, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. p. 87.

²¹CRESPO, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. p. 88.

Figura 16. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)



Fuente: elaboración propia, con información de www.agonzalez.metroblog.com.

Consulta: 05-11-11.

2.1.2.3. Clasificación AASHTO

La American Association of State Highway Officials adoptó este sistema de clasificación de suelos (AASHTO M 145), tras varias revisiones del sistema adoptado por el Bureau of Public Roads de Estados Unidos, en el que los suelos se agrupan en función de su comportamiento como capa de soporte o asiento del firme. Es el sistema más utilizado en la clasificación de suelos en carreteras. En esta clasificación los suelos se clasifican en 7 grupos, según su granulometría y plasticidad, en sí, en función del porcentaje que pasa por los tamices No. 200, 40 y 10, y de los límites de Atterberg de la fracción que pasa por el tamiz No. 40. Estos 7 grupos se dividen en 2 grandes categorías: suelos granulares (con no más del 35 por ciento que pasa por el tamiz No. 200) y suelos limo-arcillosos (más del 35 por ciento que pasa por el tamiz No. 200).

La categoría de los suelos granulares; gravas y arenas; está compuesta por los grupos A-1, A-2 y A-3, y su comportamiento en planicies es, generalmente, de bueno a excelente, salvo los subgrupos A-2-6 y A-2-7, que se comportan como los suelos arcillosos debido a la alta plasticidad de los finos que contiene, siempre que el porcentaje de estos supere el 15 por ciento. Los grupos incluidos por los suelos granulares son los siguientes:

- A-1: corresponde a una mezcla bien graduada de gravas, arenas (gruesa y fina) y finos no plásticos o muy plásticos. También se incluyen en este grupo las mezclas bien graduadas de gravas y arenas sin finos.
 - A-1-a: incluye los suelos con predominio de gravas, con o sin material fino bien graduado.
 - A-1-b: incluye suelos constituidos principalmente por arenas gruesas, con o sin material fino bien graduado.

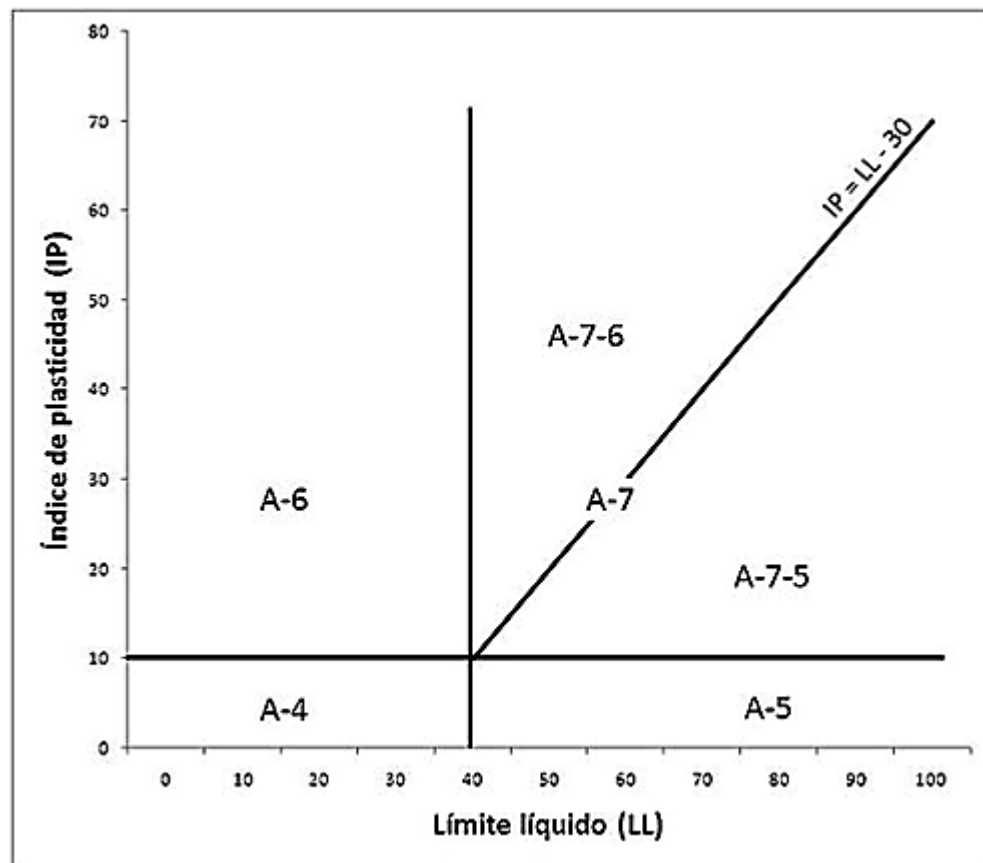
- A-3: típicamente corresponde a suelos constituidos por arena fina de playa o de duna, de origen eólico, sin finos limosos o arcillosos o con una pequeña cantidad de limo no plástico. También incluyen este grupo, los depósitos fluviales de arena fina mal graduada con pequeñas cantidades de arena gruesa o grava.

- A-2: este grupo comprende a todos los suelos que contienen un 35 por ciento o menos de material que pasa por el tamiz No. 200 y que no pueden ser clasificados en los grupos A-1 y A-3, debido a que el porcentaje de finos y/o la plasticidad de estos, están por encima de los límites fijados para dichos grupos. Por todo esto, este grupo contiene una gran variedad de suelos granulares que estarán entre los correspondientes a los grupos A-1 y A-3 y a los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.
 - A-2-4 y A-2-5: en estos subgrupos se incluyen los suelos que contienen un 35 por ciento o menos de material que pasa por el tamiz No. 200 y cuya fracción que pasa por el tamiz No. 40 tiene las características de los grupos A-4 y A-5, de suelos limosos. En estos subgrupos están incluidos los suelos compuestos por grava y arena gruesa con contenidos de limo o índices de plasticidad por encima de las limitaciones del grupo A-1, y los suelos compuestos por arena fina con una proporción de limo no plástico que excede la limitación del grupo A-3.

 - A-2-6 y A-2-7: en estos subgrupos se incluyen suelos como los descritos en los subgrupos A-2-4 y A-2-5, excepto que los finos contienen arcilla plástica y tienen las características de los grupos A-6 y A-7.

- A-4, A-5, A-6 y A-7: la categoría de los suelos limo-arcillosos está compuesta por éstos grupos, cuyo comportamiento en planicies va de regular a malo. En esta categoría los suelos se clasifican en los distintos grupos atendiendo únicamente a su límite líquido y a su índice de plasticidad, según las zonas del gráfico de plasticidad. De esta forma se clasifican también los suelos del grupo A-2 en los distintos subgrupos. En la figura 17 se muestra el gráfico de plasticidad.

Figura 17. **Gráfico de plasticidad**



Fuente: www.wikivia.org. Consulta: 05-11-11.

Los grupos incluidos en los suelos limo-arcillosos son los siguientes:

- A-4: el suelo típico de este grupo, es un suelo limoso no plástico o moderadamente plástico, que normalmente tiene un 75 por ciento o más de material que pasa por el tamiz No. 200. También se incluyen en este grupo, los suelos constituidos por mezclas de suelo fino limosos y hasta un 64 por ciento de gravas y arenas.
- A-5: el suelo típico de este grupo, es similar al descrito en el grupo A-4, salvo que suele tener carácter diatomáceo o micáceo, y pueden ser muy compresibles, como indica su elevado límite líquido.
- A-6: el suelo típico de este grupo, es un suelo arcilloso plástico, que normalmente tiene un 75 por ciento o más de material que pasa por el tamiz No. 200. También se incluyen en este grupo, las mezclas de suelo fino arcilloso y hasta un 64 por ciento de gravas y arenas.
- A-7: el suelo típico de este grupo, es similar al descrito en el grupo A-6, salvo que tiene las características de elevado límite líquido del grupo A-5, y puede ser elástico y estar sujeto a grandes cambios de volumen.
 - A-7-5: se incluyen en este subgrupo, los suelos con un índice de plasticidad moderado en relación con el límite líquido y que pueden ser altamente compresibles, además de estar sujetos a importantes cambios de volumen.
 - A-7-6: se incluyen en este subgrupo los suelos con un índice de plasticidad elevado en relación con el límite líquido y que están sujetos a cambios de volumen muy importantes.

Figura 18. Clasificación AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limo-arcillosos (más de 35% o menos pasa el tamiz #200)				
	A-1		A-2					A-4	A-5	A-6	A-7	
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b	A-2-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					
Tamizado, % que pasa	50 máx.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
No. 10 (2.00)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
No. 40 (425 µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 máx.	36 máx.	36 máx.
No. 200 (75 µm)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Consistencia	.....		.....					.....		.....
Límite líquido	6 máx.		N.P.					B		B		
Índice de plasticidad	Cantos, grava y arena		Arena fina					Grava y arena limo-arcillosas		Suelos limosos		
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina					Grava y arena limo-arcillosas		Suelos limosos		
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo				

Fuente: www.wikivia.org. Consulta: 05-11-11.

3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de un suelo, tiene como objetivo principal el mejoramiento integral de sus propiedades geomecánicas, siendo estas el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante y la disminución de la compresibilidad y su permeabilidad. Al poner en práctica las técnicas de estabilización las cuales mejoran una o más propiedades del suelo, se debe prever que el mejoramiento de una propiedad no signifique el deterioro de otra.

La estabilidad de un suelo se asocia a su resistencia o capacidad portante, siendo ésta una función directa a su contenido de humedad, la cual corresponde a la sumatoria del agua libre o intersticial que se reduce por gravedad y evaporación, el agua higroscópica debida a la humedad ambiental y el agua capilar por tensión superficial.

Con la estabilización se pretende aumentar la resistencia mecánica de los suelos, entrelazando las partículas de una forma más efectiva y asegurando que las condiciones de humedad en las que trabaja el suelo, varíen dentro de unos rangos reducidos, para obtener una adecuada estabilidad en las cargas y una escasa variación volumétrica. Como resultado, se produce un aumento de la durabilidad de dicha capa.

Hasta ahora, los principales aditivos empleados han sido el cemento, la cal y las enzimas orgánicas, sin embargo, la estabilización con estos aditivos aumenta el costo en la construcción y no controlan de manera satisfactoria la pérdida de humedad en los suelos. Por tal razón, se analizará la estabilización de suelos cohesivos a través de la utilización de material piroclástico

procedente del volcán de Pacaya, con el fin de obtener suelos con características físicas y mecánicas que reúnan condiciones óptimas para su utilización.

3.1. Tipos de estabilización de suelos

Existen diversos tipos de estabilización de suelos, sin embargo, se debe utilizar el que se adapte a las condiciones del suelo que se vaya a trabajar. A continuación se describen los mismos.

3.1.1. Estabilización mecánica

La estabilización mecánica tiene como objetivo, mejorar un suelo que en su estado natural no es apto para la construcción. La mejora del suelo se logra mezclando diversos materiales con propiedades complementarias, obteniendo un nuevo material de mayor calidad y que cumpla con las especificaciones para el uso que se le desea dar.

Generalmente, con la estabilización mecánica, las propiedades que se busca mejorar son la plasticidad y/o la granulometría; la plasticidad incide en la absorción de agua del material y su capacidad drenante; mientras que la granulometría incide en la resistencia, trabajabilidad y compacidad final de la capa de suelo.

3.1.2. Estabilización volumétrica

Por lo general, los suelos arcillosos varían considerablemente su volumen ante los cambios de humedad. Para evitar que esto suceda y provoque consecuencias en la construcción, se debe realizar la estabilización volumétrica

al suelo, con el cual se va a trabajar. Al modificar las propiedades del suelo se transforma la masa granulada, entrelazando sus partículas, logrando que resista la presión interna de expansión.

Se ha demostrado en estudios anteriores que los tratamientos químicos son los más recomendados para las arcillas superficiales, mientras que los procedimientos térmicos (calentamientos que modifique la estructura molecular de las arcillas) son adecuados para las arcillas profundas expansivas.

3.2. Métodos de estabilización de suelos

El método de estabilización de suelos que se emplee, debe adecuarse al presupuesto que se posea para realizar la misma, ya que algunos tipos de estabilización son muy efectivos, pero costosos.

3.2.1. Estabilización con cloruro de sodio (NaCl)

El cloruro de sodio (NaCl), comúnmente conocido como sal, se encuentra en forma de cristales, los cuales se encuentran con facilidad, son solubles en agua e higroscópicos.

Al mezclarle cloruro de sodio al agua, se puede disminuir la temperatura de congelamiento y la presión de vapor de esta última. Las soluciones que contienen NaCl disuelto, presentan una mayor tensión superficial.

Los cambios en el agua, debido a la adición de cloruro de sodio, tanto en el punto de congelación como en la tensión superficial y la tensión de vapor, dependen de la solubilidad de la sal.

3.2.2. Estabilización con cloruro de calcio (CaCl₂)

El cloruro de calcio se obtiene como un subproducto en forma de salmuera en algunos procesos industriales, aunque también se puede obtener de algunos arroyos y pozos naturales, siendo la fuente más común el obtenido en la elaboración de carbonato de sodio mediante procedimientos químicos.

Al adicionar cloruro de calcio, se disminuyen las fuerzas de repulsión entre las arcillas; sin embargo, algunos libros aseguran que la película de agua que rodea a las partículas se ve eléctricamente reforzada con la adición del cloruro de calcio, incrementando notablemente la cohesión aparente. Agregando de 0,5 a 3 por ciento de cloruro de calcio, se ha determinado que existe un incremento en los pesos volumétricos hasta en un 11 por ciento, dependiendo del tipo de suelo. Sin embargo, existen datos que muestran disminuciones en el peso volumétrico, respecto a un suelo arcilloso que no contenga cloruro de calcio.

El cloruro de calcio, mantiene constante la humedad en el suelo, sin embargo, esta sal se lava fácilmente. El cloruro de calcio reduce la evaporación, llegando a absorber hasta 10 veces su propio peso cuando las condiciones de humedad son altas en el medio ambiente, dicha humedad puede mantenerse en sus 2/3 partes durante el día de calor seco, lo cual hace de esta sal un producto muy eficaz, cuando se trata de evitar la formación de polvo en terracerías.

Sin embargo, existen limitaciones para el empleo de cloruro de calcio, dentro de las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- El medio ambiente debe tener una humedad relativa superior a 3 por ciento

- Los minerales que se utilicen deben pasar por la malla No. 200 y reaccionar favorablemente con la sal

3.2.3. Estabilización con silicato de sodio (Na_2SiO_3)

El silicato de sodio, también conocido como vidrio líquido, pertenece al grupo de compuestos químicos que poseen un amplio intervalo en sus propiedades físicas y químicas. En solución es incoloro e inodoro y actúa en términos generales, como un jabón fuerte.

Se utiliza como adhesivo, cementante, detergente, floculante y catalizador. Se debe tener cuidado con su manejo, ya que si llega a tener contacto con los ojos, puede provocar serios daños.

En carreteras se ha utilizado desde 1945 a nivel mundial la estabilización con silicato de sodio. Los mejores resultados se han obtenido en suelos arenosos y climas moderados. Para estabilizar suelos de otro tipo, se necesitaría emplear el silicato de sodio con otros productos químicos.

3.2.4. Estabilización con métodos químicos

Actualmente se ha aplicado un gran número de productos químicos con el objetivo de estabilizar los suelos, generando la mayoría de ellos resultados satisfactorios. A pesar que la utilización de químicos para la estabilización no es tan común, está adquiriendo bastante difusión y experimentación.

Algunos de los productos químicos que han sido efectivos en la estabilización de suelos, son económicamente competitivos contra productos más comunes que se utilizan para el mismo fin.

Si se decide estabilizar un suelo a través de este método, se debe contar con la asesoría de especialistas en la materia, tanto en la etapa de diseño, como en la de construcción.

4. ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE MATERIAL PIROCLÁSTICO PROCEDENTE DEL VOLCÁN DE PACAYA

4.1. Recolección de muestras de suelo

Una muestra de suelo se recolecta con la finalidad de evaluar sus características. La toma de ésta es una operación simple, pero delicada, por cuanto si es tomada incorrectamente no se obtendrán los resultados representativos y el diagnóstico será erróneo.

Para realizar los ensayos del presente trabajo de investigación, se tuvo que recolectar muestras de 2 tipos de suelos:

- Arcilla
- Arena volcánica

4.1.1. Cohesivo

La muestra del material cohesivo se obtuvo de la finca El Bálsamo, carretera CA-02 occidente, Siquinalá, Escuintla. Es un suelo arcilloso color café. Se recolectó una muestra de 150 kilogramos aproximadamente. La muestra fue depositada en costales para luego ser transportada a las instalaciones de la Sección de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC).

4.1.1.1. Caracterización química y geológica del material cohesivo

Desde el punto de vista geológico, las arcillas son minerales naturales que se formaron hace varios millones de años y que reúnen las características peculiares de composición y formación relacionadas con el curso de la evolución de la Tierra.

Los minerales de las arcillas, son los componentes de la fracción inferior a 2 micras de suelos y sedimentos. La mayor parte de ellos son filosilicatos, los cuales poseen una estructura laminar. Además de filosilicatos, en la arcilla se pueden encontrar menores proporciones de otros minerales.

Éstos minerales presentan algunas propiedades físico-químicas inusuales debido a la combinación de:

- Alta superficie específica (morfología laminar, tamaño de partícula)
- Presencia de carga eléctrica, por sustitución en la red o por defectos

Por estas 2 características, las partículas arcillosas pueden absorber agua y otros líquidos polares en proporción importante, así como intercambiar y fijar cationes con el medio. Las arcillas determinan la plasticidad del suelo, su capacidad de retener agua y nutrientes y la disponibilidad de sustancias químicas para el desarrollo de las plantas.

4.1.2. Arena volcánica

La muestra de arena volcánica se obtuvo con la colaboración de un vecino de la Laguna Calderas, el cual brindó el material que tenía acumulado en su

patio, debido a la expulsión de material piroclástico ocurrida el jueves 27 de mayo de 2010. La altura del lugar donde se obtuvo la muestra es de 1 839 metros sobre el nivel del mar y sus coordenadas geográficas son:

- N 14°24'09.4"
- W 90°36'20.6"

Se recolectó una muestra de 300 kilogramos aproximadamente. Ésta se depositó en costales que luego se trasladaron a la Sección de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). La arena volcánica es de color oscuro y presenta en cierto porcentaje escoria volcánica.

4.1.2.1. Caracterización química y geológica de la arena volcánica

Desde el punto de vista geológico, la arena volcánica es un material de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros. Es de color oscuro y se encuentra en grandes cantidades en los terrenos cercanos a los volcanes.

Químicamente la arena volcánica se compone principalmente de óxidos de silicio, aluminio, hierro, magnesio, calcio, sodio y potasio. Debido a sus compuestos químicos, no se recomienda utilizar arena volcánica con cemento, ya que reduce su resistencia.

4.2. Ensayos de laboratorio

A continuación se describen los ensayos de laboratorio necesarios para realizar la estabilización del suelo cohesivo.

4.2.1. Ensayo de compactación Proctor modificado

AASHTO T180-01: Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54 kg (10 lb) Rammer and a 457 mm (18 in)

El ensayo Proctor modificado, al igual que el Proctor normal, es un ensayo de compactación de suelos. El Corps of Engineers de la U.S. Army propuso un ensayo Proctor modificado, en el que se aplica mayor energía de compactación por unidad de volumen, obteniéndose unas densidades secas máximas más elevadas y unas humedades óptimas menores que en el ensayo normal.

En el ensayo de Proctor modificado, se compacta una muestra de suelo en un molde metálico de 2 320 centímetros cúbicos de capacidad (152,5 milímetros de diámetro interior y 127 milímetros de altura), es usual utilizar el molde del ensayo CBR, con un disco espaciador en su fondo. El molde se llena en 5 capas y se compactan con 60 golpes por capa, distribuidos por toda la superficie.

El martillo utilizado para compactar tiene una masa de 4,54 kilogramos y cae desde una altura de 457 milímetros. Con todo esto, la energía de compactación por unidad de volumen es 4,5 veces superior a la del ensayo normal. El ensayo se puede realizar de forma manual o mecánica.

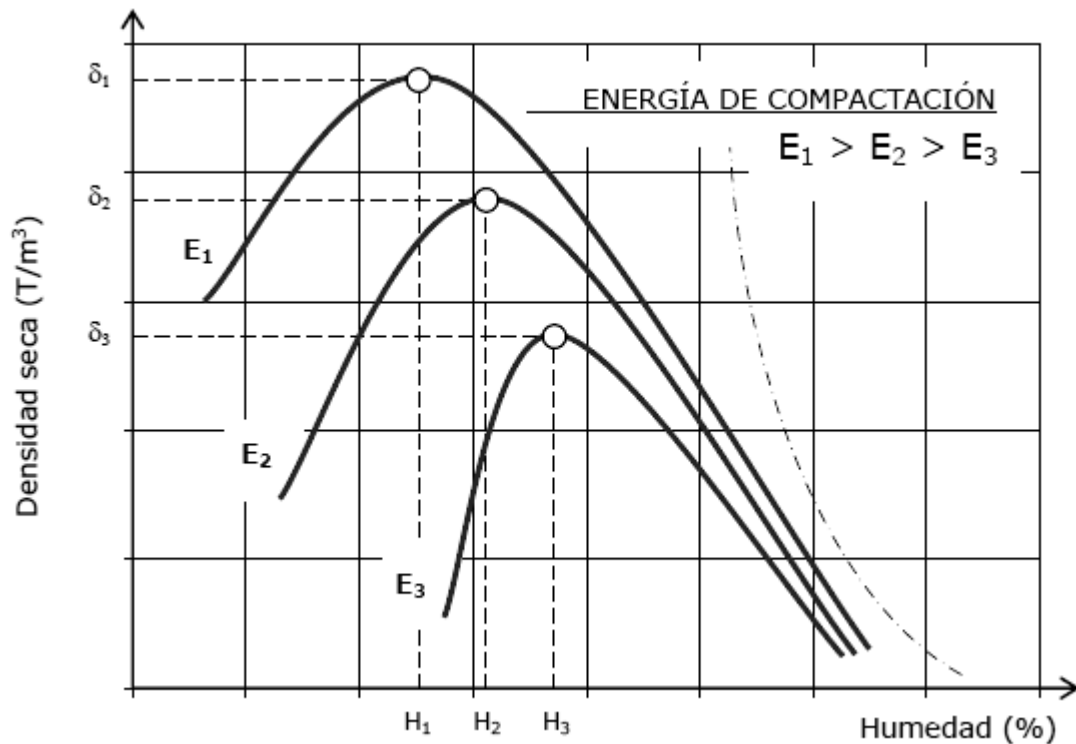
Para obtener la curva humedad-peso unitario seco, es necesario realizar el ensayo sobre varias muestras del suelo, que darán los puntos de dicha curva. Generalmente con 4 ó 5 de estos puntos ya es posible dibujarla, y por tanto, obtener la densidad máxima Proctor y la humedad óptima correspondiente.

En general, es conveniente compactar un suelo para:

- Aumentar la resistencia al corte, lo cual mejora la estabilidad y la capacidad de carga del suelo.
- Disminuir la compresibilidad y así reducir los asentamientos.
- Disminuir la relación de vacíos, lo cual reduce la permeabilidad.
- Reducir el potencial de expansión y contracción.

En la figura 19 se muestra la influencia de la energía de compactación.

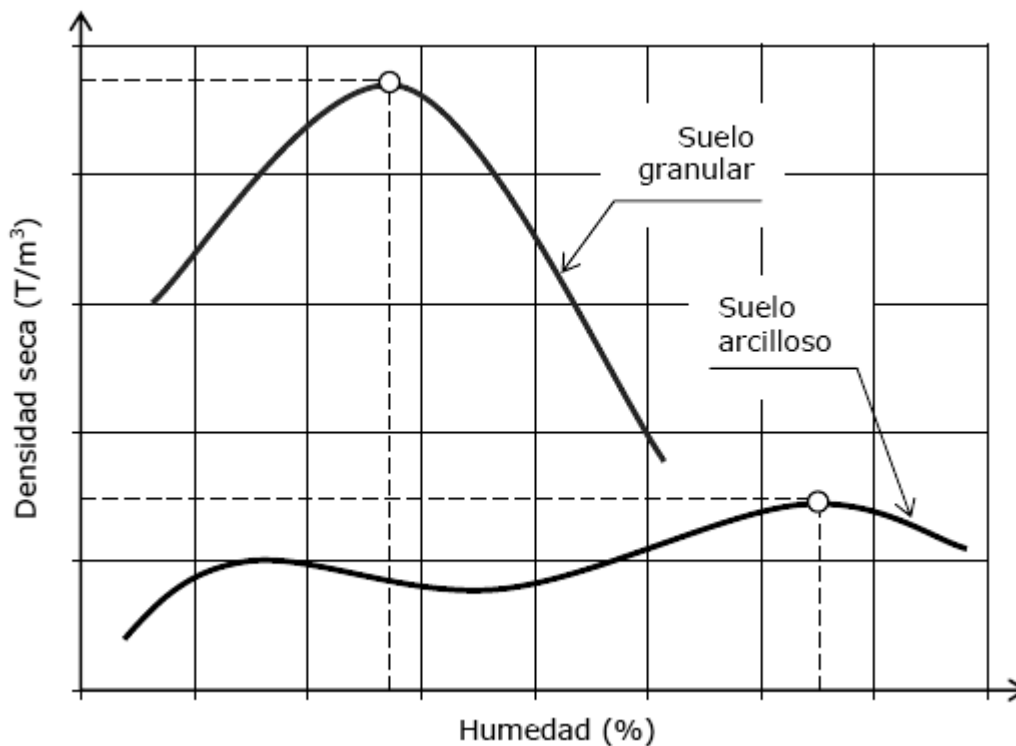
Figura 19. **Influencia de la energía de compactación**



Fuente: manual de carreteras, tomo II. Sección 15, p. 14.

La curva del Proctor puede tomar diferente forma, dependiendo el tipo de suelo, ya sea granular o arcilloso. En la figura 20 se puede observar la curva típica que se presenta para cada tipo de suelo.

Figura 20. **Influencia del tipo de suelo**



Fuente: manual de carreteras, tomo II. Sección 15, p. 15.

4.2.2. **Ensayo de relación de soporte California (CBR)**

AASHTO T193-99: Standard Method of Test for the California Bearing Ratio; ASTM D1883-07: Standard Test Method for California Bearing Ratio

El ensayo CBR (California Bearing Ratio) tiene como finalidad determinar la capacidad de soporte de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables.

Este ensayo fue desarrollado por la División de Carreteras de California, como una forma de clasificación y evaluación de la capacidad de un suelo, el cual puede ser utilizado como sub base o material de base en la construcción de carreteras.

Con el ensayo se mide la resistencia al corte (punzonamiento) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un porcentaje de la relación de soporte. En la figura 21 se puede observar la curva granulométrica, tanto de suelos cohesivos como granulares.

El índice de CBR es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de densidad y humedad controladas. Los valores del índice de CBR oscilan entre 0 y 100. Cuanto mayor es su valor, mejor es la capacidad portante del suelo.

El porcentaje de CBR está definido como la fuerza requerida para que un pistón normalizado penetre, a una profundidad determinada en una muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la fuerza necesaria para que el pistón penetre a esa misma profundidad y con igual velocidad, una probeta con una muestra de material triturado.

A continuación en la tabla II se muestra la clasificación del suelo según el índice de CBR.

Tabla II. **Clasificación del suelo según índice de CBR**

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Sub rasante
5 - 8	Mala	Sub rasante
8 - 20	Regular - Buena	Sub rasante
20 - 30	Excelente	Sub rasante
30 - 60	Buena	Sub base
60 - 80	Muy buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Fuente: elaboración propia, con datos de www.da.montes.upm.es. Consulta: 05-11-11.

4.2.3. Ensayo granulométrico

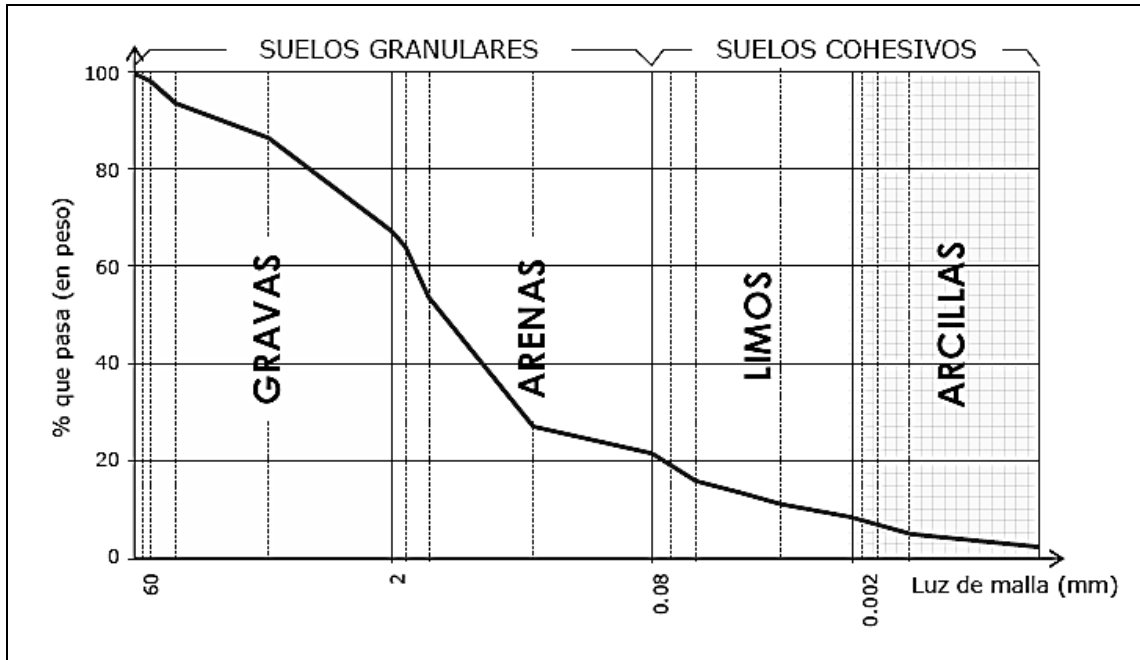
AASHTO T27: Standard Method of Test for the California Bearing Ratio

AASHTO T11: Standard Method of Test for the California Bearing Ratio

El ensayo granulométrico tiene como finalidad obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo. Con este ensayo también es posible clasificar el suelo mediante sistemas como AASHTO y SUCS. Éste ensayo es importante, ya que gran parte de los criterios de aceptación de suelos para ser utilizados en bases o sub bases de carreteras, presas de tierra o diques, drenajes, etc., depende de este análisis.

Para obtener la distribución por tamaño de partículas, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente. Luego de haber realizado el proceso de tamizado, se procede a pesar las cantidades retenidas en cada uno de los tamices, para poder construir una gráfica semilogarítmica, donde se representa el porcentaje en peso de muestra retenida (o el que pasa) para cada abertura del tamiz.

Figura 21. Curva granulométrica



Fuente: manual de carreteras, tomo II. Sección 15, p. 6.

4.2.4. Ensayo de límites de Atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Estos límites deben su nombre al científico sueco Albert Mauritz Atterberg.

4.2.4.1. Límite líquido

AASHTO T089-02: Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils; ASTM D423-66 (1982): Method of Test for Liquid Limit of Soils

El límite líquido se define como el contenido de humedad con el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado plástico y el estado líquido.

4.2.4.2. Límite plástico

AASHTO T090-00: Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils; ASTM D424-54 (1982): Method of Test for Plastic Limit of Soils

El límite plástico se define como el contenido de humedad con el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado semisólido y el estado plástico.

4.2.4.3. Estados de consistencia

En función del grado de humedad, los suelos cohesivos presentan los siguientes estados de consistencia:

- Líquido
- Plástico
- Semisólido
- Sólido

4.2.4.3.1. Líquido

El exceso de agua anula las fuerzas de atracción entre las partículas que mantienen unido al suelo (cohesión), convirtiéndolo en un líquido viscoso sin capacidad resistente.

4.2.4.3.2. Plástico

En este estado, el suelo es fácilmente moldeable y al aplicarle pequeños esfuerzos sufre grandes deformaciones. Su comportamiento es plástico, ya que

no recupera su estado inicial, una vez terminado el esfuerzo. Mecánicamente no es apto para recibir cargas adicionales.

4.2.4.3.3. Semisólido

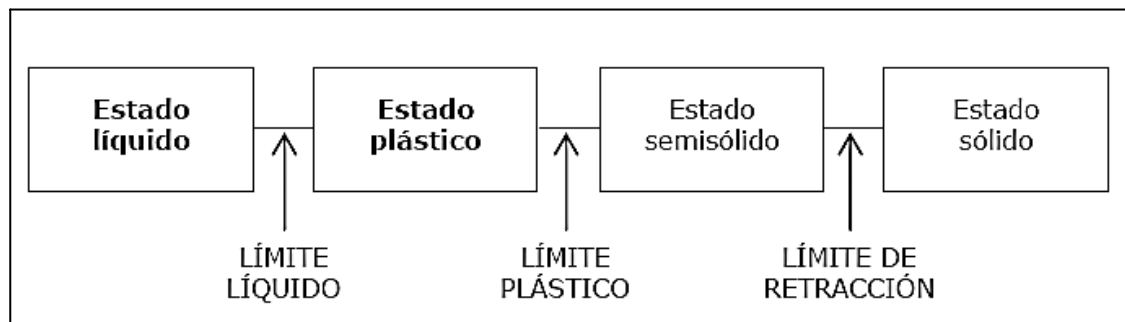
En este estado, el suelo se quiebra antes de cambiar de forma, ya que deja de ser moldeable. Sin embargo, no es un sólido puro, debido a que disminuye de volumen si sigue perdiendo humedad. Mecánicamente su comportamiento es aceptable.

4.2.4.3.4. Sólido

En este estado, el volumen del suelo no varía con los cambios de humedad, alcanzando la estabilidad. Mecánicamente el comportamiento es óptimo. Las humedades que corresponden a los puntos de transición entre cada uno de los estados definen los límites líquido (LL), plástico (LP) y de retracción o contracción (LR), respectivamente.

En la figura 22 se muestran los estados de consistencia del suelos.

Figura 22. **Estados de consistencia del suelo**



Fuente: manual de carreteras, tomo II. Sección 15, p. 9.

En la tabla III se presentan los rangos de valores más frecuentes de todos estos parámetros en diferentes tipos de suelos:

Tabla III. **Valores típicos de consistencia del suelo**

PARÁMETRO		TIPO DE SUELO		
		Arena	Limo	Arcilla
LL	Límite líquido	15 - 20	30 - 40	40 - 150
LP	Límite plástico	15 - 20	20 - 25	25 - 50
LR	Límite de retracción	12 - 18	14 - 25	8 - 35
IP	Índice de plasticidad	0 - 3	10 - 15	10 - 100

Fuente: manual de carreteras, tomo II. Sección 15, p. 11.

4.2.5. **Ensayo de compresión triaxial**

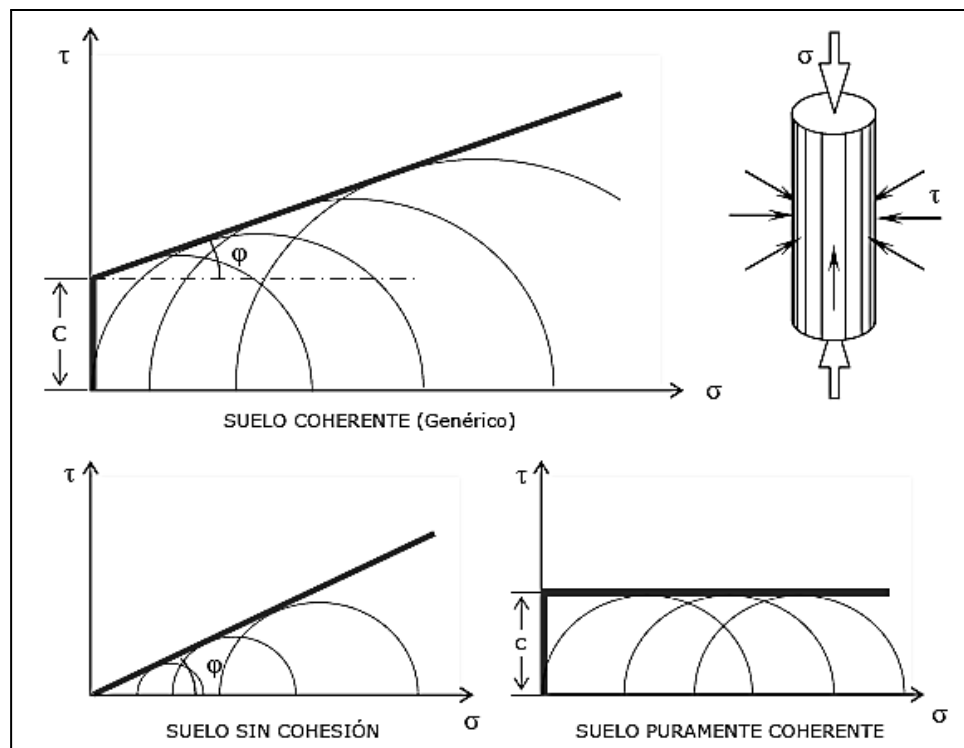
AASHTO T296-05: Standard Method of the Test for Unconsolidated, Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression

Éste ensayo tiene como principal finalidad obtener parámetros del suelo y la relación esfuerzo-deformación, a través de la determinación del esfuerzo cortante. Es un ensayo complejo, pero la información que se obtiene es la más representativa del esfuerzo cortante que sufre una masa de suelo al ser cargada.

Consiste en colocar una muestra cilíndrica de suelo dentro de una membrana de caucho o goma, que se introduce en una cámara especial y se le aplica una presión igual en todo sentido y dirección. Alcanzando ese estado de equilibrio, se aumenta la presión normal o axial (σ_1), sin modificar la presión lateral aplicada (σ_3), hasta que se produzca la falla.

Realizando por lo menos 3 pruebas, con presiones laterales diferentes, en un gráfico se dibujan los círculos de Mohr que representan los esfuerzos de falla de cada muestra y trazando una tangente o envolvente a éstos, se determina el ángulo de fricción interna (Φ) y la cohesión (c). En la figura 23 se muestran las rectas de resistencia intrínseca, según el tipo de suelo.

Figura 23. **Rectas de resistencia intrínseca del suelo**



Fuente: manual de carreteras, tomo II. Sección 15, p. 19.

4.2.6. Ensayo de equivalente de arena

AASHTO T176: Standard Method of Test for Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test; ASTM D 2419: Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate.

El ensayo de equivalente de arena, permite una rápida determinación del contenido en finos de un suelo, dando además una idea de su plasticidad. Para realizarlo, se separa la fracción arenosa del suelo mediante el tamiz No.4 y se introduce un volumen de 90 centímetros cúbicos de la misma, en una probeta cilíndrica de 32 milímetros de diámetro y 430 milímetros de longitud, graduada de 2 en 2 milímetros.

A continuación se introduce una espesa disolución de trabajo formada por cloruro cálcico, glicerina y formaldehído diluidos en agua destilada, dejando reposar la mezcla durante 10 minutos. Seguidamente, el conjunto se agita de forma normalizada (90 ciclos en 30 segundos, con un recorrido de unos 20 centímetros), para conseguir una mezcla uniforme. Posteriormente, se deja reposar durante un tiempo de 20 minutos.

Una vez transcurrido este tiempo, se observa mediante simple contacto visual la existencia de 2 horizontes, uno de ellos correspondiente a la fracción arenosa del suelo y otro por encima del anterior, relativo a la proporción de finos existente en la muestra. El equivalente de arena del suelo, viene dado por la siguiente expresión:

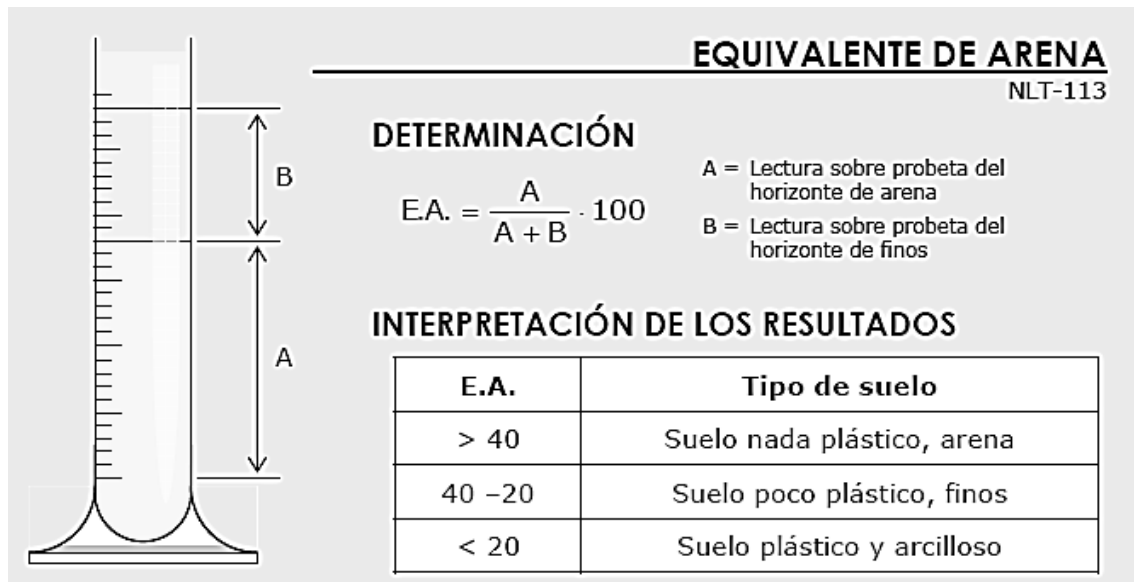
$$E.A. = \frac{A}{A + B} \cdot 100$$

Donde:

A = lectura sobre la probeta del horizonte de arena

B = lectura referente al horizonte de finos

Figura 24. **Ensayo de equivalente de arena**



Fuente: manual de carreteras, tomo II. Sección 15, p. 12.

4.2.7. **Ensayo de gravedad específica**

AASHTO T100-06: Standard Method of Test for Specific Gravity of Soils;
ASTM D854-07: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer

La gravedad específica de un suelo (G_s) se define como el peso unitario del material, en cuestión dividido por el peso unitario del agua destilada a 4 grados Celsius. Así, se consideran solamente los granos del suelo.

El valor de la gravedad específica, es necesario para calcular la relación de vacíos de un suelo, la cual se utiliza en el análisis hidrométrico. Es útil para predecir el peso unitario del suelo y sirve para graficar la recta de saturación máxima en el ensayo de compactación Proctor.

La gravedad específica (Gs) se calcula a través de la siguiente expresión:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

Donde:

γ_s = peso específico de los sólidos, g/cm³

γ_w = peso específico del agua a 4°C, g/cm³

De esta forma, la gravedad específica puede ser calculada utilizando cualquier relación de peso de suelo (Ws) al peso del agua (Ww), siempre y cuando se consideren los mismos volúmenes. En la tabla IV, se puede observar la gravedad específica de algunos tipos de suelos.

Tabla IV. **Gravedad específica de los sólidos de algunos suelos**

Tipo de suelo	Gravedad específica (Gs)
Arena	3,65 - 2,67
Arena limosa	2,67 - 2,70
Arcilla inorgánica	2,70 - 2,80
Yeso	2,60 - 2,75
Loes	2,65 - 2,73
Suelos con mica o hierro	2,75 - 3,00
Suelos orgánicos	Variable, puede ser inferior a 2,00

Fuente: Joseph E. Bowles. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil, p. 64.

4.2.8. Ensayo de permeabilidad por el método de cabeza variable

AASHTO T215-66: Standard Method of Test for Permeability of Granular Soils; ASTM D2434-00: Standard Test Method for Permeability of Granular Soils

El coeficiente de permeabilidad es una constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso. Existen 2 métodos generales de laboratorio para determinar directamente el coeficiente de permeabilidad de un suelo, estos son los llamados método de cabeza constante y el método de cabeza variable; ambos se basan en el uso de la ley de Darcy (con base en experimentos de laboratorio, describe las características del movimiento del agua a través de un medio poroso). Debido al tipo de suelo que se ensayó en el laboratorio, se utilizó el método de cabeza variable.

En este tipo de permeámetro se mide la cantidad de agua que atraviesa una muestra de suelo, por diferencia de niveles en un tubo alimentador. Este permeámetro puede ser utilizado en suelos finos y gruesos, variando el diámetro del tubo alimentador, pero lo más común es utilizarlo con los suelos finos poco permeables. Al ejecutar la prueba se llena de agua el tubo vertical del permeámetro, observándose su descenso a medida que el agua atraviesa la muestra.

Se debe tomar en cuenta, que este método ha sido desarrollado por economía, debido a que el experimento para determinar el coeficiente de permeabilidad k en un suelo fino puede durar normalmente varios días.

A continuación en la tabla V se muestra el tipo de formación o suelo según su coeficiente de permeabilidad.

Tabla V. **Tipo de formación o suelo según su coeficiente de permeabilidad**

Tipo de formación o suelo	Valor de k (cm/s)
<i>Depósitos fluviales</i>	-
Ródano, en Genissiat	Hasta 0,40
Pequeños ríos de los Alpes orientales	0,02 - 0,16
Río Missouri	0,02 - 0,20
Río Misisipi	0,02 - 0,12
<i>Depósitos glaciares</i>	-
Llanura de aluvión	0,05 - 2,00
Esker, Westfield, Mass.	0,01 - 0,13
Delta, Chicopee, Mass.	0,0001 - 0,015
Till morrénico	Menor a 0,0001
<i>Depósitos eólicos</i>	-
Areba de médano	0,1 - 0,3
Loes	(+ ó -) 0,001
Tierras loésicas	(+ ó -) 0,0001
<i>Depósitos lacustres y marinos (no costeros)</i>	-
Arena muy fina uniforme ($U^a = 5 - 2$)	0,0001 - 0,0064
"Hígado de toro" ($U^a = 5 - 2$)	0,0001 - 0,0050
"Hígado de toro" ($U^a = 5$)	0,00001 - 0,0001
Arcilla	Menor a 0,0000001

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_permeabilidad. Consulta: 05-11-11.

En la tabla VI se muestra el grado de permeabilidad del suelo según su coeficiente de permeabilidad.

Tabla VI. **Grado de permeabilidad según su coeficiente de permeabilidad**

Grado de permeabilidad	Valor de k (cm/s)
Elevada	Superior a 10^{-1}
Media	10^{-1} a 10^{-3}
Baja	10^{-3} a 10^{-5}
Muy baja	10^{-5} a 10^{-7}
Prácticamente impermeable	Menor a 10^{-7}

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_permeabilidad. Consulta: 05-11-11.

En la figura 25 se puede observar un permeámetro de compactación.

Figura 25. **Permeámetro de compactación**



Fuente: ELE International. Testing Equipment for Construction Materials, catálogo 2007, p. 23.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Resultados de laboratorio

A continuación se analizan e interpretan los resultados obtenidos en los ensayos que se realizaron a las muestras de suelo (provenientes de la finca El Bálsamo y de las faldas del volcán de Pacaya), en el laboratorio de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). Los ensayos que se realizaron a las muestras de suelos son:

- Proctor modificado
- Valor soporte California (CBR)
- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Compresión triaxial
- Equivalente de arena
- Gravedad específica
- Permeabilidad

Dichos ensayos se realizaron a las siguientes muestras de suelo:

- Arcilla color café
- Mezcla: 75% arena volcánica – 25% arcilla
- Mezcla: 50% arena volcánica – 50% arcilla
- Mezcla: 25% arena volcánica – 75% arcilla
- Arena volcánica color gris oscuro

En la tabla VII se presentan los resultados obtenidos al realizar los ensayos a las muestras de suelo.

Tabla VII. **Tabla resumen de resultados de la arcilla color café adicionando diferentes porcentajes de arena volcánica**

ARENA VOLCÁNICA (%)	0	25	50	75	100
PUS_{max} (lb/pie³)	99,70	103,20	102,10	94,30	82,40
H_{opt} (%)	23,50	18,30	15,50	13,40	9,20
CBR al 95% de C (%)	3,20	10,00	15,80	19,90	24,75
Grava (%)	0,22	1,64	2,43	4,87	7,66
Arena (%)	26,50	35,53	48,82	71,15	80,24
Finos (%)	73,28	62,83	48,75	23,98	11,61
L.L. (%)	42,70	36,50	28,65	18,65	0,00
I.P. (%)	18,20	16,65	11,85	6,35	0,00
Ø (°)	35,91	39,10	42,35	45,70	49,15
Cu (T/m²)	3,26	3,20	3,14	3,07	3,00
E.A.	16	21	28	35	43
G.S. (g/cm³)	2,79	2,75	2,70	2,67	2,63
k (cm/s)	2,98 x 10 ⁻⁷	3,05 x 10 ⁻⁷	3,11 x 10 ⁻⁷	3,17 x 10 ⁻⁷	3,24 x 10 ⁻⁷

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

5.2. Interpretación de resultados

A continuación se interpretan los resultados obtenidos al realizar los distintos ensayos a las muestras de suelo.

5.2.1. Proctor modificado

En la tabla VIII y figura 26 se muestra la variación de la humedad óptima y la densidad seca máxima, utilizando diferentes porcentajes de arena volcánica.

Tabla VIII. Variación entre humedad óptima y densidad seca máxima

Arena volcánica (%)	Humedad óptima (%)	Peso Unitario Seco máximo (lb/pie³)
0	23,5	99,7
25	18,3	103,2
50	15,5	102,1
75	13,4	94,3
100	9,2	82,4

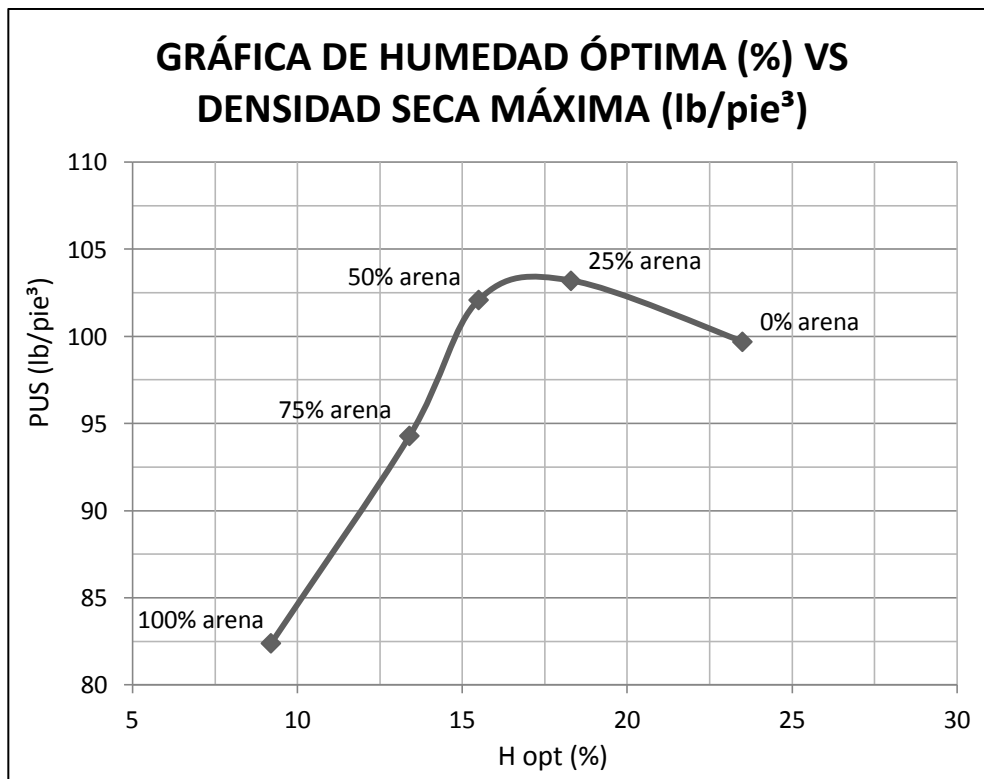
Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Se puede observar que al aumentar el porcentaje de arena volcánica, se reduce la humedad óptima de compactación. Esto se debe a que a mayor cantidad de arena, menor será la absorción de agua de la misma

Sin embargo, el comportamiento de la densidad seca máxima no se comporta de la misma manera que la humedad óptima, en forma uniforme, ya sea en forma ascendente o descendente.

En la tabla VIII se observa que el mayor peso unitario seco máximo (PUS_{MAX}) se obtuvo con la mezcla de 25 por ciento de arena volcánica y 75 por ciento de arcilla color café.

Figura 26. **Humedad óptima vs densidad seca máxima utilizando diferentes porcentajes de arena volcánica**

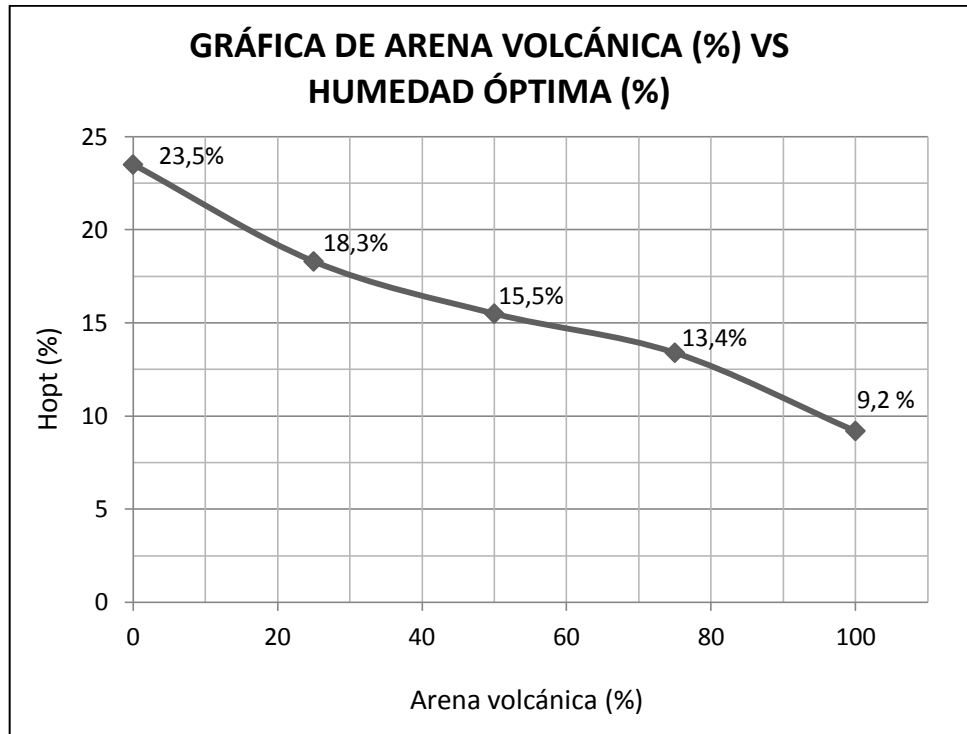


Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

En la figura 27 se puede observar el comportamiento de la humedad óptima en relación al porcentaje de arena volcánica que se utiliza en la muestra.

Se muestra que conforme va aumentando el porcentaje de arena volcánica de la muestra para estabilizar la arcilla color café, disminuye el porcentaje de humedad óptima necesaria para obtener la densidad seca máxima de la muestra en el ensayo proctor modificado.

Figura 27. Comportamiento de humedad óptima vs arena volcánica

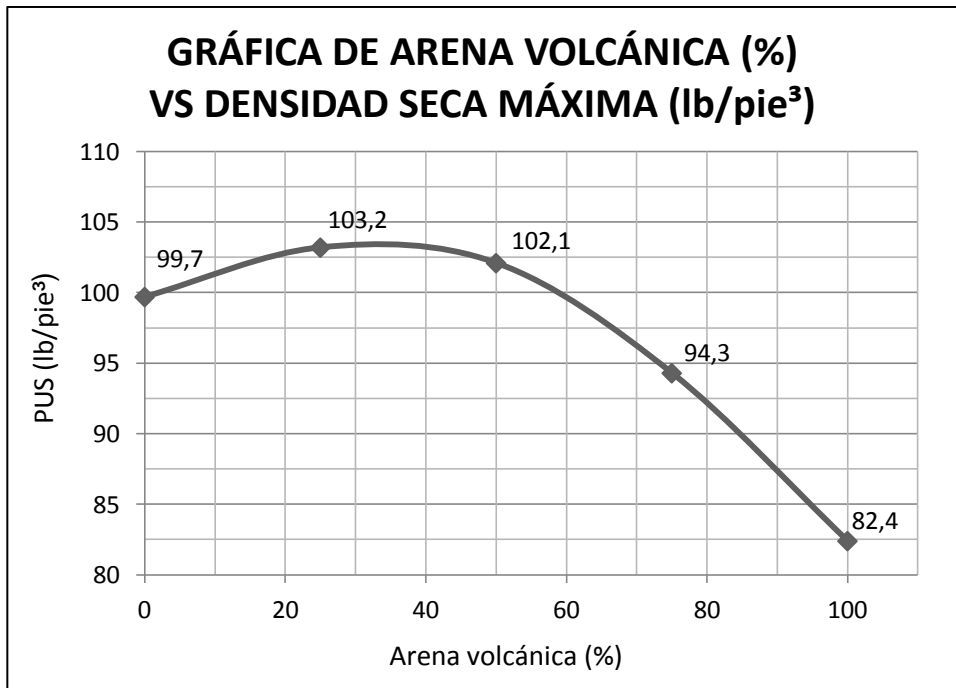


Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

En la figura 28 se puede observar el comportamiento de la densidad seca máxima en relación al porcentaje de arena volcánica que se utiliza en la muestra.

Al incrementarse el porcentaje de arena volcánica a la muestra para estabilizar la arcilla color café, la densidad seca máxima presenta gráficamente un comportamiento semejante a una curva en forma de campana. Al realizar el ensayo de Proctor modificado a las muestras de suelo con distintas proporciones de arena volcánica, se determinó que la mayor densidad seca máxima se obtiene con las mezcla: 25 por ciento arena – 75 por ciento arcilla, siendo ésta 103,2 libras sobre pie cúbico.

Figura 28. **Comportamiento de la densidad seca máxima a distintos porcentajes de arena volcánica**



Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

5.2.2. Relación de soporte California (CBR)

En la tabla IX y figura 29 se muestra la variación en el porcentaje de CBR al 95 por ciento de compactación del suelo, al trabajar con distintos porcentajes de arena volcánica.

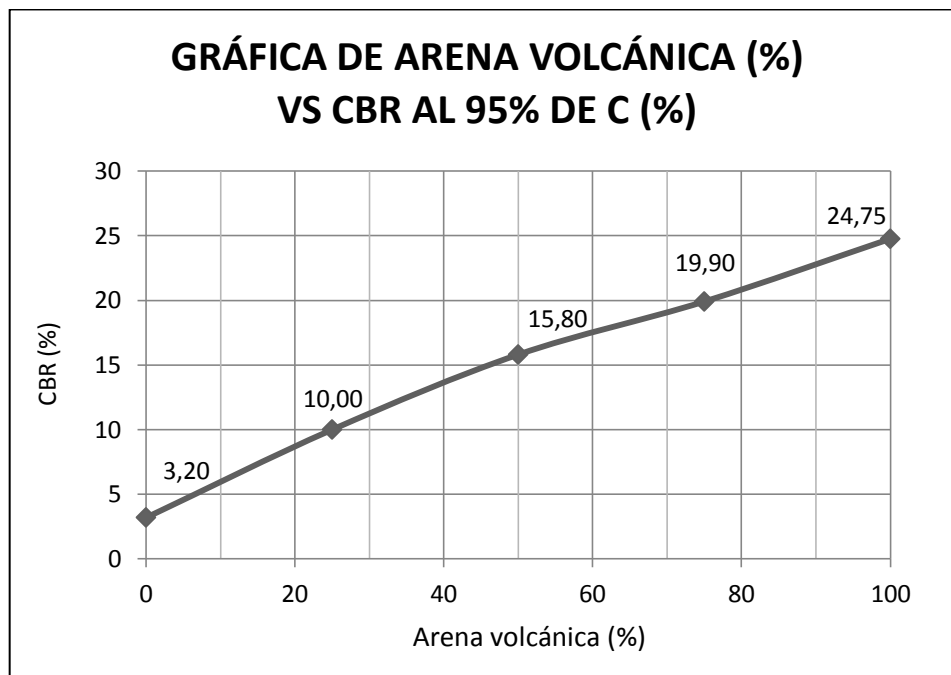
Se puede observar que el porcentaje de CBR aumenta al incrementarse el porcentaje de arena volcánica de las muestras. Esto confirma que a mayor cantidad de arena volcánica, mejor valor soporte tendrá el suelo.

Tabla IX. **CBR al 95% de compactación**

Arena volcánica (%)	CBR al 95% de C (%)
0	3,20
25	10,00
50	15,80
75	19,90
100	24,75

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Figura 29. **Variación del CBR al 95% de compactación utilizando distintos porcentajes de arena volcánica**



Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

5.2.3. Granulometría

A continuación se presenta el análisis de los ensayos de granulometría realizados a las muestras de arcilla y arena volcánica.

En la tabla X y figura 30 se puede observar la variación en los porcentajes de grava, arena y finos, al ensayar las muestras de suelo con distintos porcentajes de arena volcánica.

Tabla X. **Variación del porcentaje de grava, arena y finos**

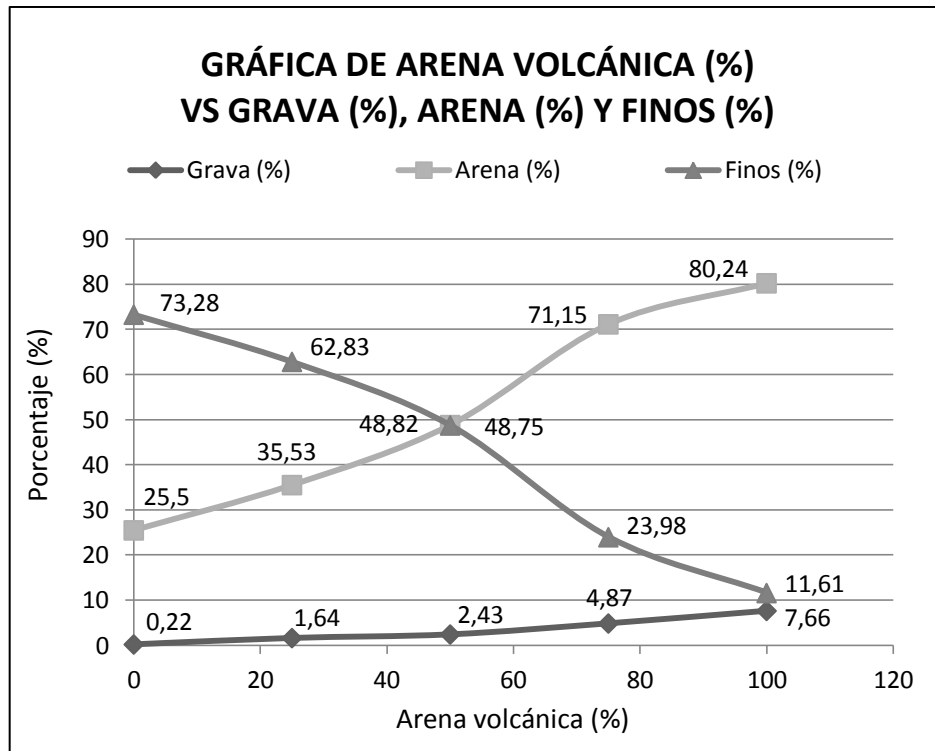
ARENA VOLCÁNICA (%)	0	25	50	75	100
Grava (%)	0,22	1,64	2,43	4,87	7,66
Arena (%)	26,50	35,53	48,82	71,15	80,24
Finos (%)	73,28	62,83	48,75	23,98	11,61

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Al observar los resultados, es evidente que al incrementarse el porcentaje de arena volcánica, el porcentaje de finos disminuye, y el porcentaje de arena se incrementa, mientras que el porcentaje de grava también aumenta ligeramente.

Al incrementarse el porcentaje de suelo granular en un suelo cohesivo, se mejoran las características del mismo, convirtiéndolo en un material con mayores posibilidades de ser utilizado en la construcción.

Figura 30. **Comportamiento del porcentaje de grava, arena y finos utilizando distintos porcentajes de arena volcánica**



Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC

5.2.4. Límites de Atterberg

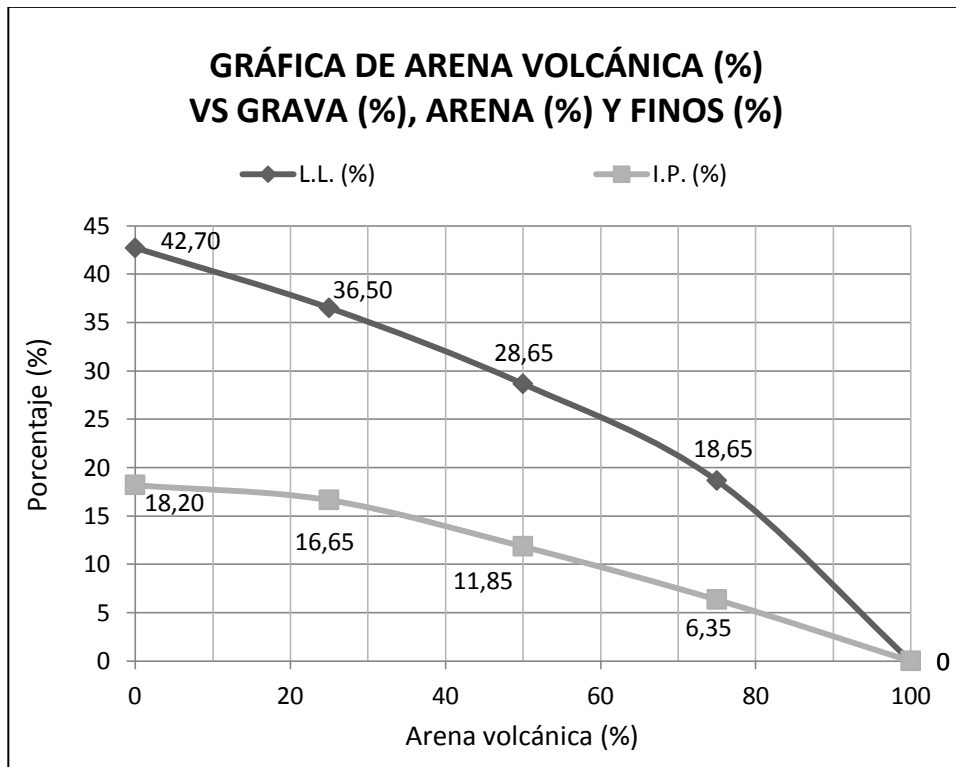
En la tabla XI y figura 31 se presentan los resultados obtenidos al realizar el ensayo de límites de Atterberg a las muestras de suelo utilizando distintos porcentajes de arena volcánica.

Tabla XI. Límites de Atterberg

Arena volcánica (%)	0	25	50	75	100
L.L. (%)	42,70	36,50	28,65	18,65	0,00
I.P. (%)	18,20	16,65	11,85	6,35	0,00

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Figura 31. Variación del límite líquido e índice de plasticidad a distintos porcentajes de arena volcánica



Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

En la figura 31, se puede observar que al incrementarse el porcentaje de arena volcánica a las muestras de suelo, estas presentan decremento en los valores del límite líquido (LL) y el índice de plasticidad (IP).

Esta tendencia se debe a que al aumentar la cantidad de arena en un suelo, éste va disminuyendo su límite líquido e índice de plasticidad, hasta que este se hace cero.

5.2.5. Compresión triaxial

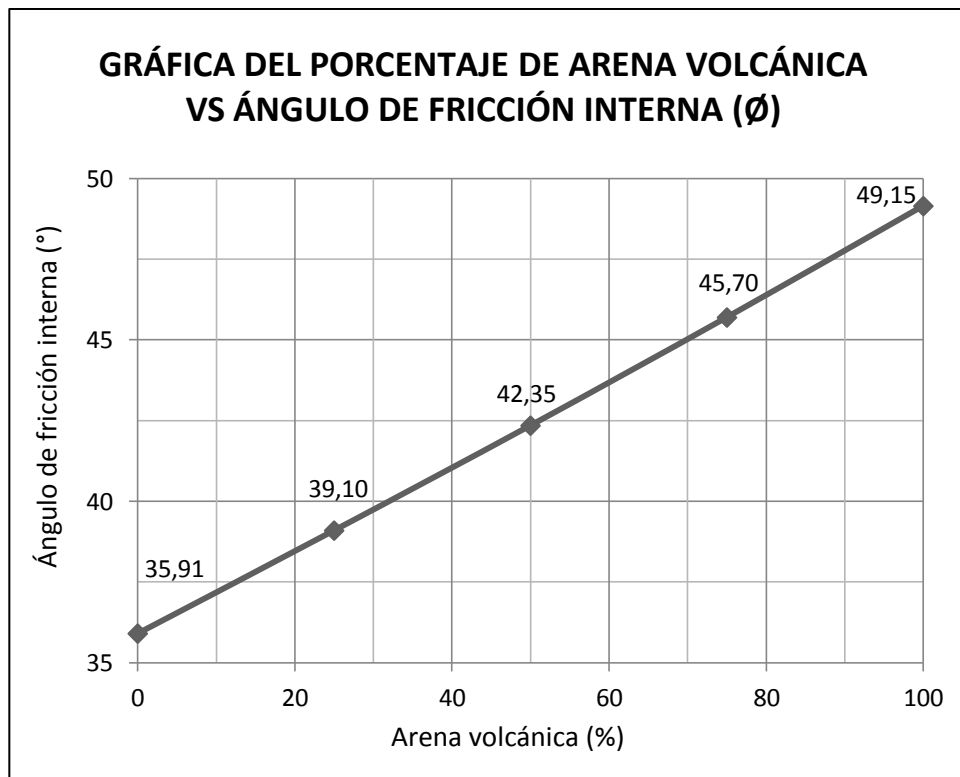
En la tabla XII y figura 32 se muestra la variación que presenta el ángulo de fricción interna al adicionarle distintos porcentajes de arena volcánica a la muestra de arcilla, al realizar el ensayo de compresión triaxial.

Tabla XII. **Porcentaje de arena volcánica, ángulo de fricción interna y porcentaje de variación**

Arena volcánica (%)	Ángulo de fricción interna (°)	Variación (%)
0	35,91	0,00
25	39,10	8,88
50	42,35	17,93
75	45,70	27,26
100	49,15	36,87

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Figura 32. **Variación del ángulo de fricción interna al adicionar arena volcánica a la muestra de arcilla color café**



Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

El ángulo de fricción interna (ϕ) de las muestras de suelo se incrementa al aumentar el porcentaje de arena volcánica de las mismas. Al ser la arena un material friccionante, mejora las propiedades del suelo.

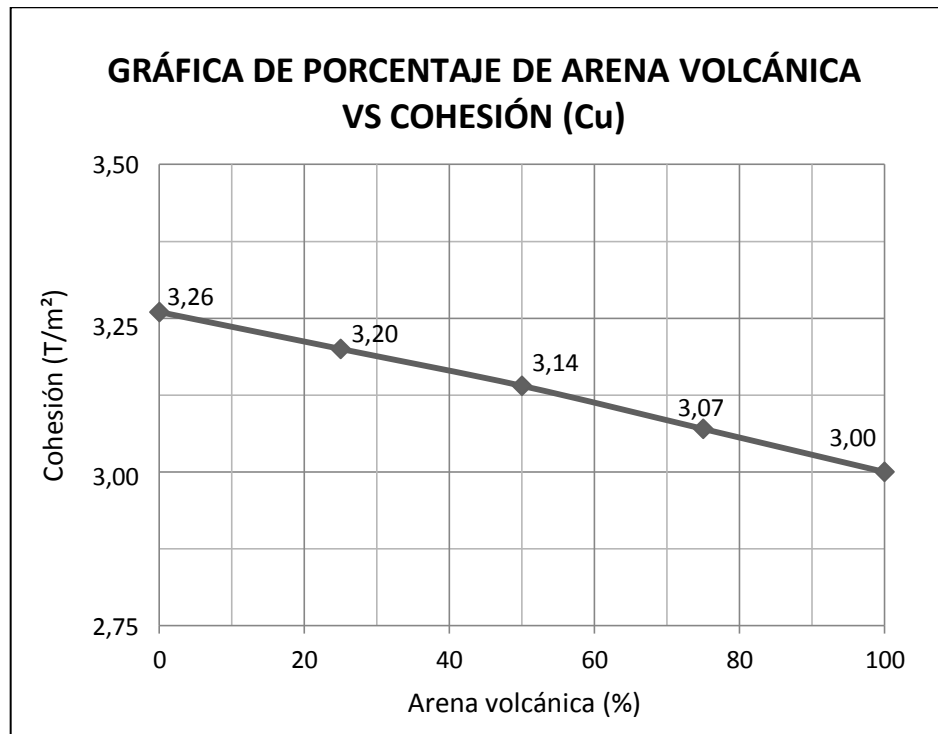
En la tabla XIII y figura 33 se puede observar la variación que presenta la cohesión al adicionar distintos porcentajes de arena volcánica a la muestra de suelo.

Tabla XIII. **Cohesión a distintos porcentajes de arena volcánica**

Arena volcánica (%)	Cohesión (T/m²)	Variación (%)
0	3,26	0,00
25	3,20	9,82
50	3,14	9,63
75	3,07	9,42
100	3,00	9,20

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Figura 33. **Variación de la cohesión al adicionar arena volcánica a la muestra de arcilla color café**



Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

La cohesión aparente del suelo disminuye al incrementarse el porcentaje de arena volcánica. Este comportamiento es consistente al aumento del ángulo de fricción del suelo. Al presentar decremento la cohesión del suelo, este se convierte en un material con mayor potencial de uso en la construcción.

5.2.6. Equivalente de arena

Al realizar el ensayo de equivalente de arena, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla XIV. **Equivalente de arena adicionando arena volcánica**

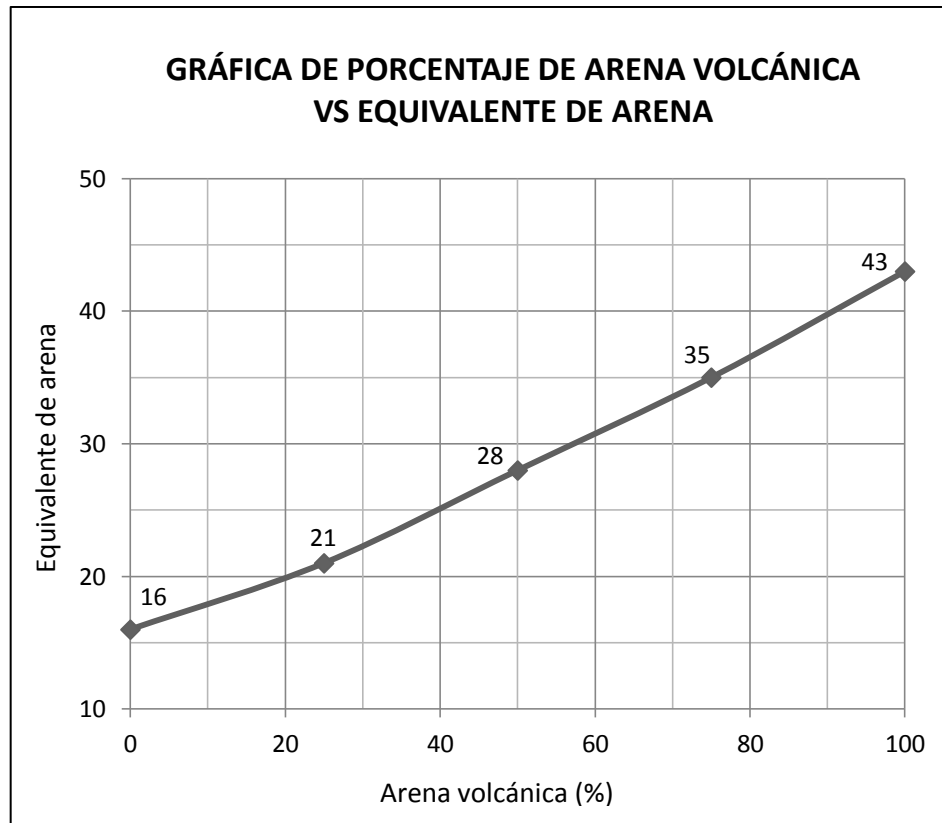
Arena volcánica (%)	Equivalente de arena
0	16
25	21
50	28
75	35
100	43

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Los valores obtenidos al realizar el ensayo de equivalente de arena, comprueban que efectivamente la muestra de suelo corresponde a un suelo plástico y arcilloso, que se ha mezclado con diferentes porcentajes de arena volcánica, y debido a esta acción, su valor de equivalente de arena aumenta al incrementarse el porcentaje de arena.

En la figura 34 se puede observar el comportamiento del equivalente de arena de las muestras.

Figura 34. **Variación del equivalente de arena a distintos porcentajes de arena volcánica**



Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC

5.2.7. Gravedad específica

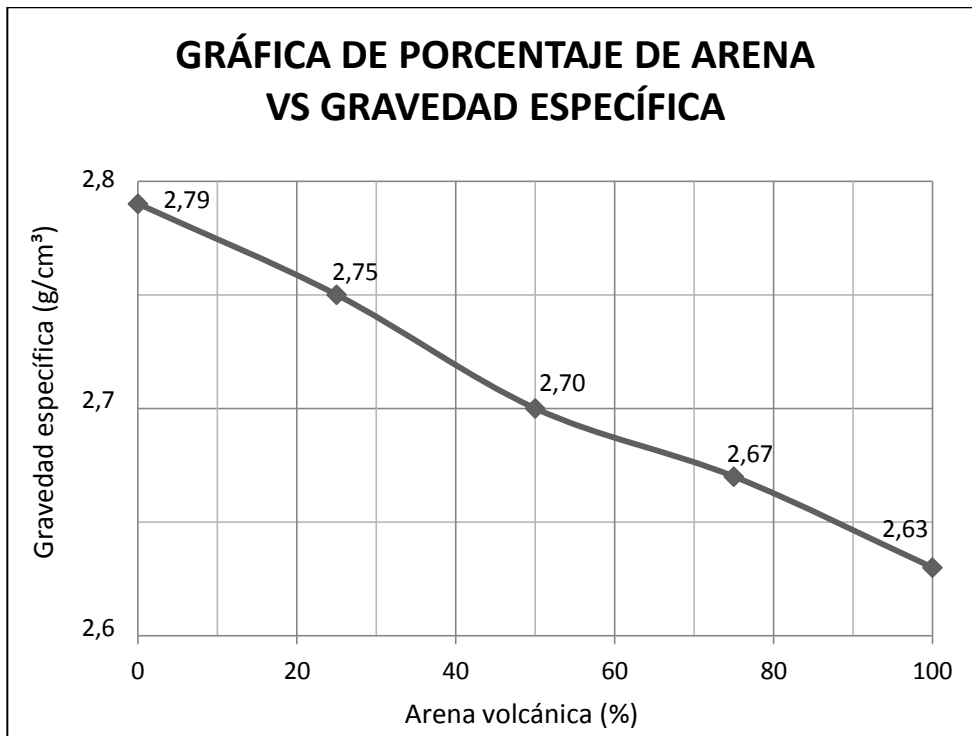
El ensayo de gravedad específica efectuado a las muestras de suelo, da como resultado la información que se presenta en la tabla XV y figura 35.

Tabla XV. **Gravedad específica adicionando arena volcánica**

Arena volcánica (%)	Gravedad específica (g/cm³)
0	2,79
25	2,75
50	2,70
75	2,67
100	2,63

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Figura 35. **Variación de la gravedad específica a distintos porcentajes de arena volcánica**



Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

La gravedad específica (Gs) indica que la muestra es arcilla. Corresponde a este tipo de suelo basado en el valor obtenido en el ensayo. Igual situación se presenta en el ensayo efectuado a la arena volcánica, demostrándose que ésta efectivamente se puede clasificar como arena, dado su valor de gravedad específica.

5.2.8. Permeabilidad por el método de cabeza variable

Al realizar el ensayo de permeabilidad por el método de cabeza variable, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla XVI. **Coefficiente de permeabilidad adicionando arena volcánica**

Arena volcánica (%)	Coefficiente de permeabilidad (cm/s)
0	$2,98 \times 10^{-7}$
25	$3,05 \times 10^{-7}$
50	$3,11 \times 10^{-7}$
75	$3,17 \times 10^{-7}$
100	$3,24 \times 10^{-7}$

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

El coeficiente de permeabilidad de las muestras de suelos va aumentando al incrementarse el contenido de arena volcánica, esto es lógico debido a que la cantidad de arena va aumentando, siendo el suelo granular más permeable que la arcilla.

Se puede decir que la muestra de suelo incrementa su permeabilidad conforme aumenta el porcentaje de arena en su composición.

CONCLUSIONES

1. Actualmente, al material piroclástico expulsado por las constantes erupciones del volcán de Pacaya, no se le da un uso comercial; debido a que no se han realizado ensayos físicos y mecánicos para caracterizarlo, el mismo se encuentra acumulado en las comunidades cercanas al volcán, sin que tenga ningún uso constructivo.
2. Al realizar el ensayo de Proctor modificado con muestras de arcilla, arena volcánica y mezclas de arcilla con arena volcánica al 25 por ciento, 50 por ciento y 75 por ciento, se obtuvo como resultado que la mayor densidad seca máxima la presentaba la mezcla: 25 por ciento arena volcánica – 75 por ciento arcilla.
3. El ensayo de valor soporte California (CBR) de la mezcla 25 por ciento arena volcánica – 75 por ciento arcilla, que fue la que mayor densidad seca máxima presentó, alcanzó un CBR del 10 por ciento a un 95 por ciento de compactación. Este resultado indica que esta mezcla es adecuada para utilizarse como sub rasante, ya que se clasifica cualitativamente como un suelo regular a bueno.
4. La granulometría de la muestra de arcilla color café, presenta una composición del 73,28 por ciento de finos, 26,50 por ciento de arena y 0,22 por ciento de grava. Esta distribución granulométrica indica que el porcentaje de finos es alto, lo cual es característico de los suelos arcillosos.

5. La granulometría de la muestra de arena volcánica color gris oscuro, muestra que ésta se compone por 11,61 por ciento de finos, 80,74 por ciento de arena y 7,66 por ciento de grava. Esta distribución granulométrica indica que el porcentaje de arena es alto, lo cual es característico de los suelos arenosos.
6. Al efectuar los límites de Atterberg a las muestras de arcilla y arena, se obtuvo que los límites presentados por la muestra de arcilla permiten que ésta se clasifique como una arcilla color café. La muestra de arena no presentó límites. Al no presentar los mismos, se puede clasificar como arena volcánica color gris oscuro.
7. El ensayo de compresión triaxial de la mezcla 25 por ciento arena volcánica – 75 por ciento arcilla, da como resultado un ángulo de fricción interna de 39,1 grados y una cohesión de 3,2 toneladas sobre metro cuadrado. Este resultado significa que esta mezcla se puede utilizar para estabilizar el suelo que vaya a utilizarse como cimentación para una construcción de dos niveles, siendo ésta una casa o un edificio pequeño.
8. Se obtuvo un valor de 16 en el ensayo de equivalente de arena realizado a la muestra de arcilla color café. Éste resultado permite clasificar la muestra como un suelo plástico y arcilloso.
9. La gravedad específica que se obtuvo de la muestra de arena volcánica color gris oscuro al realizar el ensayo fue de 2,63 gramos sobre centímetro cúbico. Dicho resultado permite que la muestra de suelo se clasifique como una arena.
10. Al realizar el ensayo de permeabilidad con cabeza variable a la mezcla 25 por ciento arena volcánica – 75 por ciento arcilla, se obtuvo como

resultado un coeficiente de permeabilidad de $3,05 \times 10^{-7}$ centímetros sobre segundo. Este valor indica que la muestra se puede clasificar como una arcilla prácticamente impermeable.

RECOMENDACIONES

1. Al estabilizar suelos cohesivos utilizando material piroclástico procedente del volcán de Pacaya, se debe tener en cuenta que el porcentaje de arena que se debe utilizar es 25 por ciento o lo más cercano posible a este valor, ya que de no ser así, los resultados que se obtengan no serán los esperados.
2. Organizar a los pobladores de las comunidades cercanas al volcán de Pacaya, para que depositen el material piroclástico en determinados lugares, de forma ordenada y debidamente identificada, para que les sea más fácil su comercialización.
3. Ser cuidadoso en la recolección de muestras de suelo, se debe evitar que éstas contengan material orgánico, debido a que éste no es de utilidad para la construcción.
4. Al realizar ensayos de laboratorio de suelos, se debe seguir las normas que especifican los mismos, ya que de no ser así, los resultados que se obtengan serán erróneos.
5. Al estabilizar suelos cohesivos adicionando arena volcánica, se debe tomar en cuenta utilizar el porcentaje de humedad óptima adecuado. De no ser así, el suelo se puede saturar en exceso y no obtener los resultados esperados.

6. Para realizar cualquier tipo de construcción, se deben efectuar ensayos al suelo, ya que de esta forma se verifica la calidad del suelo que se utilizará en la construcción.

7. Se debe tener presente que existen diversos materiales para estabilizar suelos cohesivos, entre los cuales se pueden mencionar la cal, cemento, enzimas, cloruro de sodio, etc.

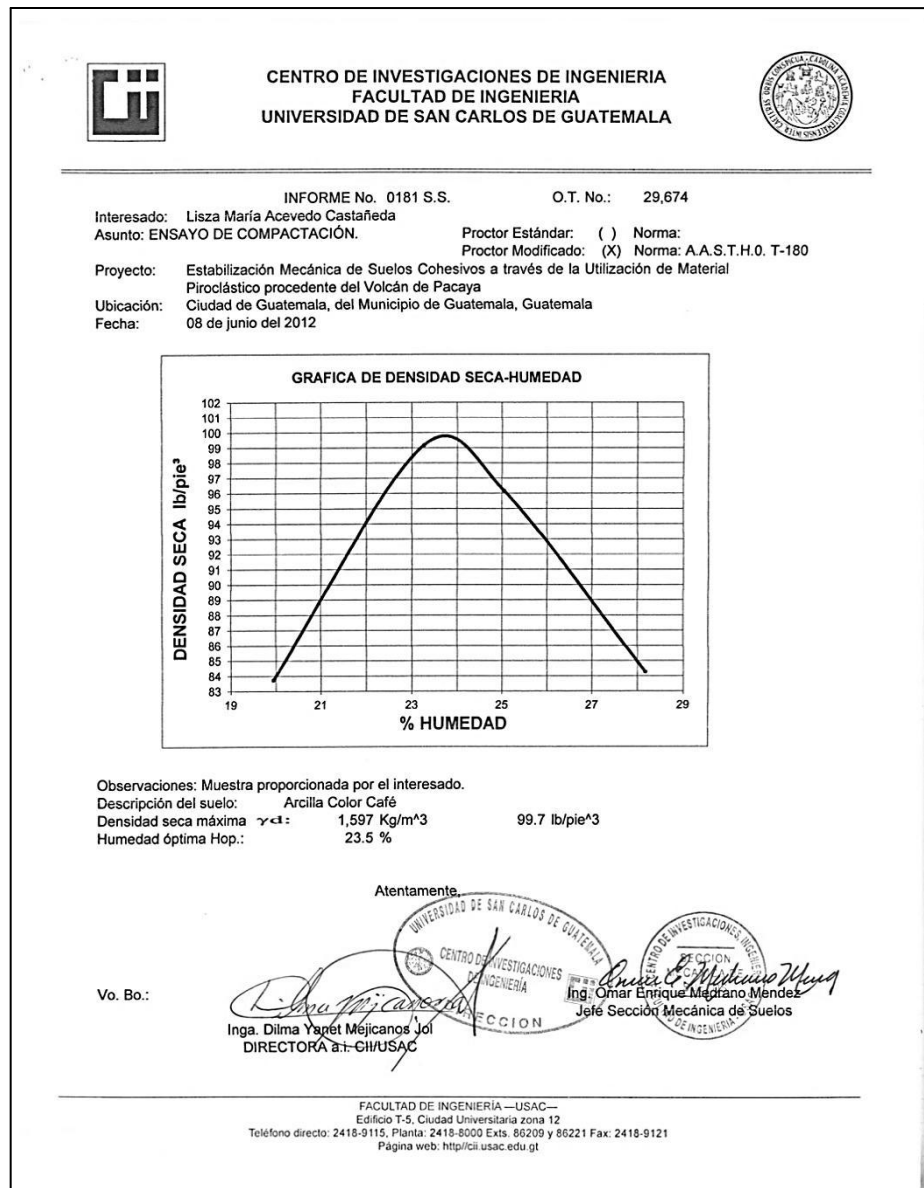
BIBLIOGRAFÍA

1. BAÑÓN, Luis; BEVIÁ, José. *Manual de carretera: construcción y mantenimiento, volumen II*. Colombia: Ortiz e hijos, 2000. 328 p.
2. CRESPO, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 5a ed. México: Limusa, 2005. 650 p.
3. GODOY, Juan. *Los volcanes de Guatemala: identificación y priorización para su manejo dentro de la estrategia de desarrollo del Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas (SIGAP)*. Guatemala: CONAP, 1999. 54 p.
4. HERNÁNDEZ, Juan. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 466 p.
5. *Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH)*. [en línea] <http://www.insivumeh.gob.gt/folletos/folletos.htm> [Consulta: 15 de agosto de 2011].
6. PAIZ, Gerardo. *Degradación ambiental y desastres en Guatemala*. Guatemala: PAMI, 2007. 40 p.

7. ROLDÁN, Jairon. *Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y sub bases*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 166 p.


ANEXOS

Anexo 1. Proctor de la arcilla color café




Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 3. Proctor de la mezcla: 50% arena – 50% arcilla



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

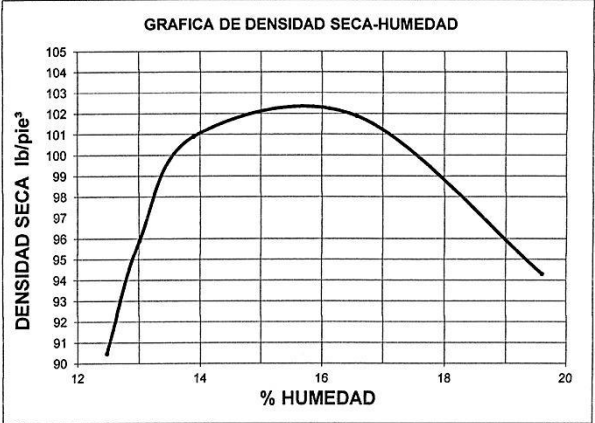


INFORME No. 0182 S.S. O.T. No.: 29,674

Interesado: Lisza María Acevedo Castañeda Proctor Estándar: () Norma:
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180

Proyecto: Estabilización Mecánica de Suelos Cohesivos a través de la Utilización de Material Piroclástico procedente del Volcán de Pacaya
 Ubicación: Ciudad de Guatemala, del Municipio de Guatemala, Guatemala
 Fecha: 08 de junio del 2012

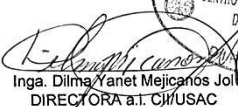
GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
12.5	90.5
13.5	98.5
14.5	101.5
15.5	102.1
16.5	101.5
17.5	99.5
18.5	97.5
19.5	95.5


Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado. 50% arcilla-50% Arena
 Descripción del suelo: Mezcla de Arcilla y Arena Volcánica
 Densidad seca máxima γ_d : 1,636 Kg/m³ 102.1 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 15.5 %

Vo. Bo.:



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
DIRECTORA a.T. CII/USAC

Atentamente




Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos


FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 5. Proctor de la arena volcánica color gris oscuro



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



INFORME No. 0242 S.S. O.T. No.: 29,674

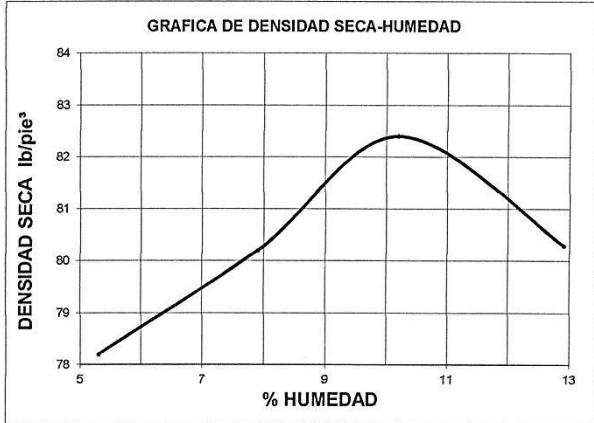
Interesado: Lisza María Acevedo Castañeda Proctor Estándar: () Norma:
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180

Proyecto: Estabilización Mecánica de Suelos Cohesivos a través de la Utilización de Material
 Piroclástico procedente del Volcán de Pacaya

Ubicación: Ciudad de Guatemala, del Municipio de Guatemala, Guatemala


Fecha: 16 de julio de 2012

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD




Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.
 Descripción del suelo: Arena limosa volcánica gris oscuro
 Densidad seca máxima γ_d : 1,320 Kg/m³ 82.4 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 9.2 %

Atentamente,



Vo. Bo.:
Inga. Telma Mariela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

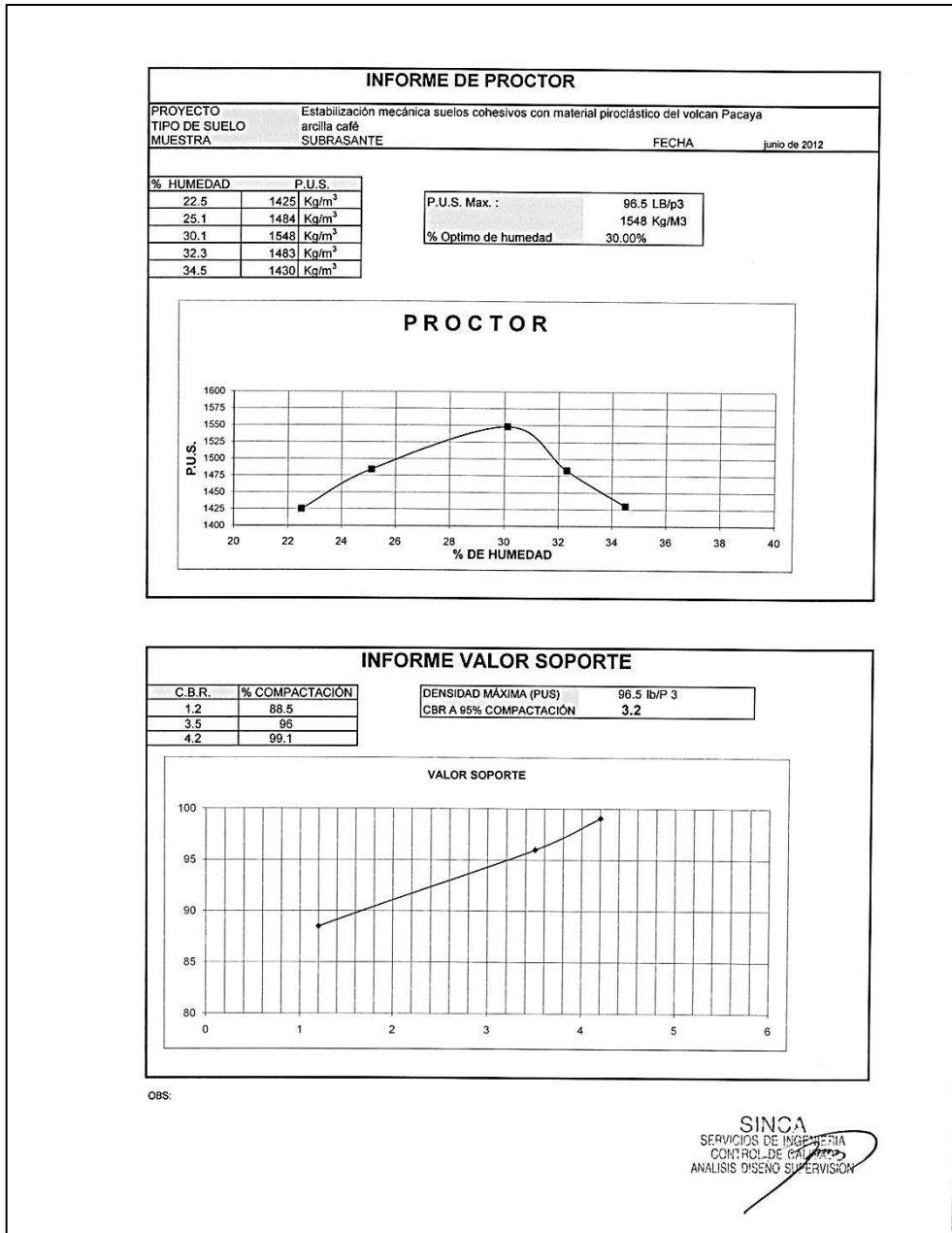


Ing. Omar Enrique Méndez Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

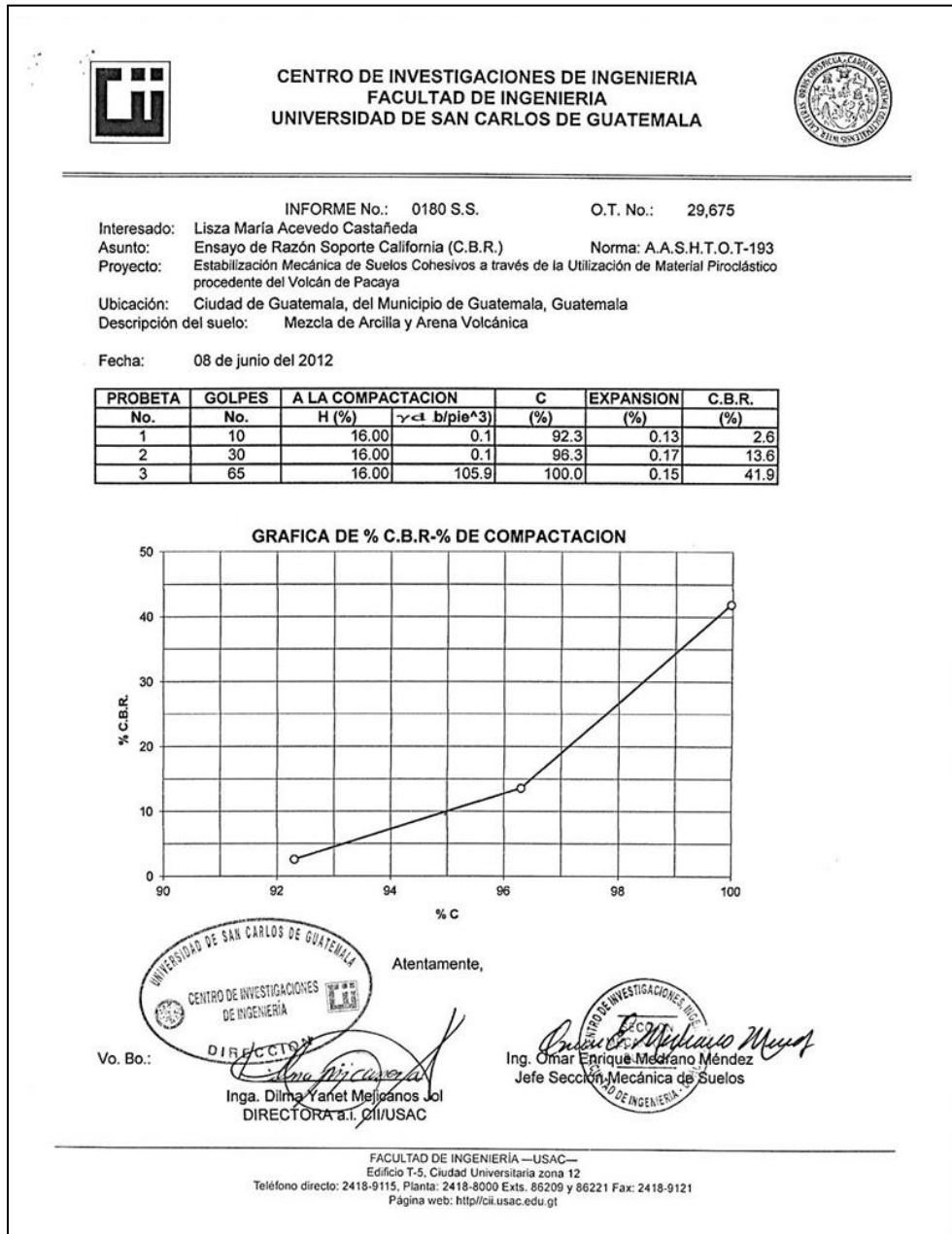
Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 6. CBR de la arcilla color café



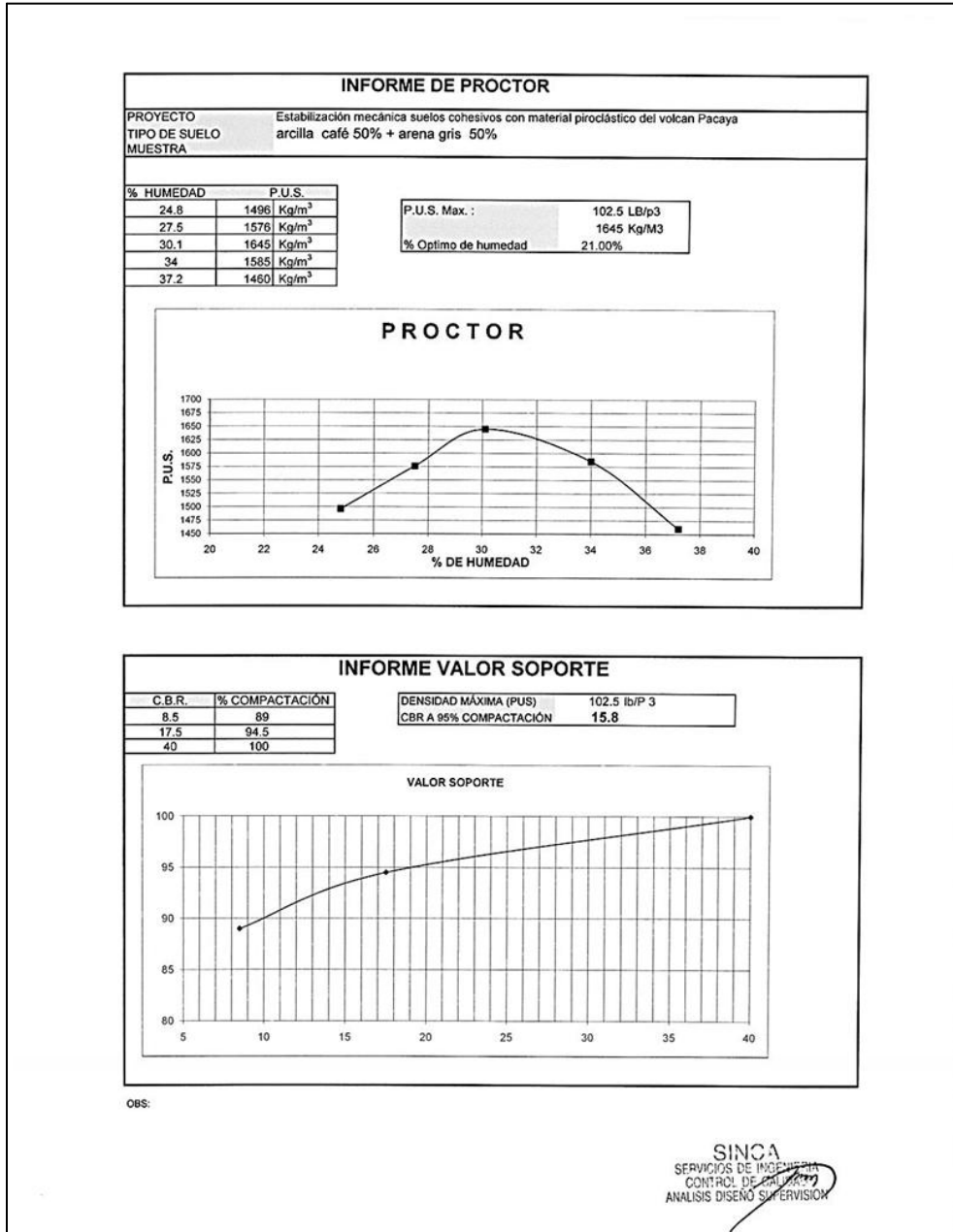
Fuente: laboratorio Servicios de Ingeniería, Control de Calidad, Análisis, Diseño y Supervisión (SINCA).

Anexo 7. CBR de la mezcla: 25% arena – 75% arcilla



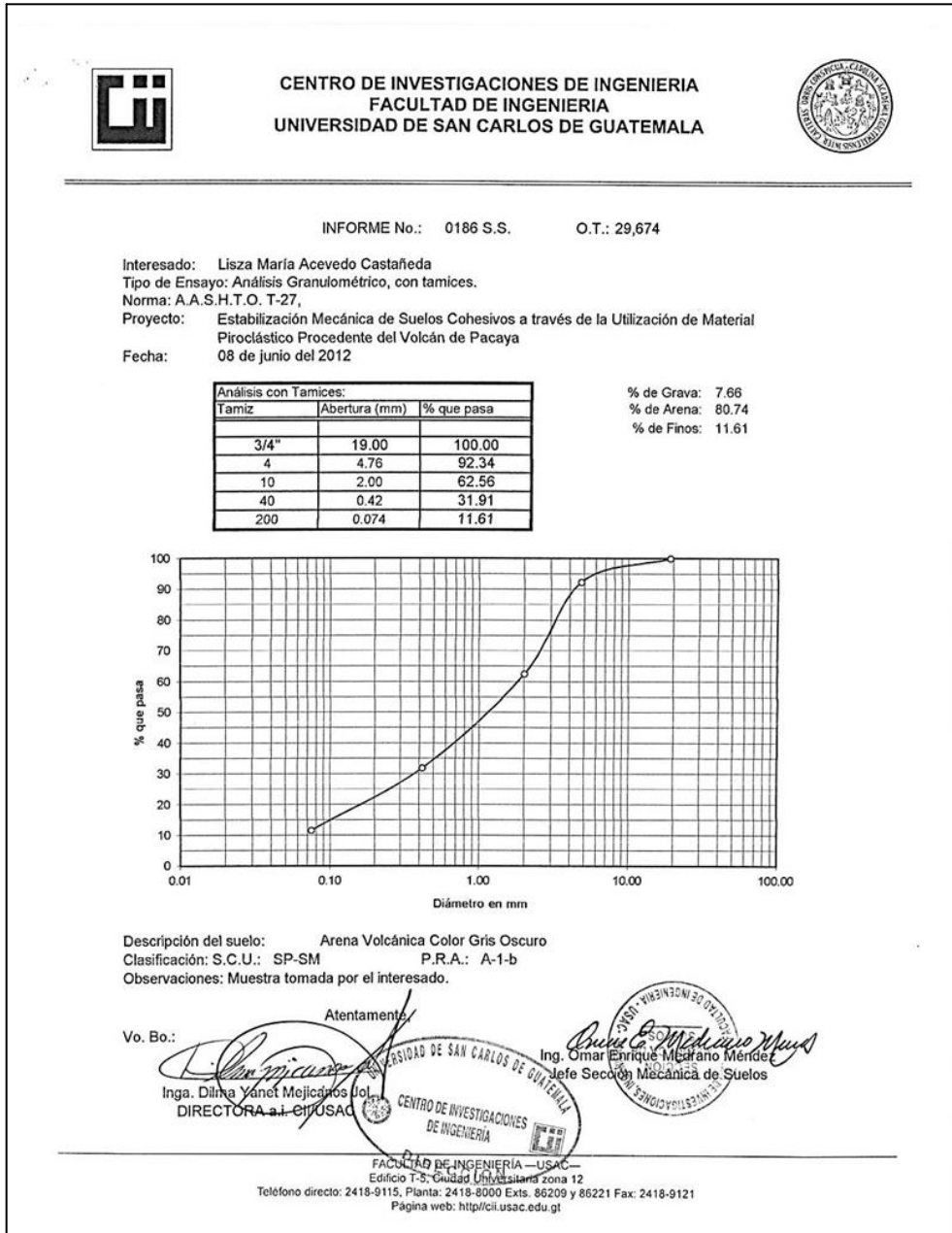
Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 8. **CBR de la mezcla: 50% arena – 50% arcilla**




Fuente: laboratorio Servicios de Ingeniería, Control de Calidad, Análisis, Diseño y Supervisión (SINCA).

Anexo 10. Granulometría de la mezcla: 25% arena – 75% arcilla




Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 11. Límites de Atterberg de la arcilla color café



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



INFORME No. 0184 S. S O.T.: 29,674

Interesado: Liza María Acevedo Castañeda
 Proyecto: Estabilización Mecánica de Suelos Cohesivos a través de la Utilización de Material Piroclástico Procedente del Volcán de Pacaya
 Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG
 Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Ciudad de Guatemala, del Municipio de Guatemala, Guatemala
 FECHA: 08 de junio del 2012

RESULTADOS:


ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	C.S.U. *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	42.7	18.2	C.L.	Arcilla Color Café

(*) C.S.U. = CLASIFICACION SISTEMA UNIFICADO


Observaciones:
Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,


Vo. Bo.



Inga. Dima Yáñez Mejicanos
DIRECTORA a.i. CIUDAD DE GUATEMALA




Ing. Omar Enrique Mejicano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos




FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 12. Límites de Atterberg de la arena volcánica color gris oscuro



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



INFORME No. 0183 S. S O.T.: 29,674

Interesado: Liza María Acevedo Castañeda
 Proyecto: Estabilización Mecánica de Suelos Cohesivos a través de la Utilización de Material Piroclástico
 Procedente del Volcán de Pacaya
 Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG
 Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Ciudad de Guatemala, del Municipio de Guatemala, Guatemala

FECHA: 08 de junio del 2012

RESULTADOS:


ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	C.S.U. *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	0	0	M.L.	Arena Volcánica Color Gris Oscuro

(*) C.S.U. = CLASIFICACION SISTEMA UNIFICADO

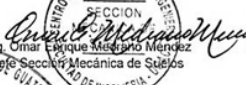
Observaciones:
Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,



Vo. Bo.



Inga Dilma Yagret Mejicanos, J.
DIRECTORA S.T. CHALSAK



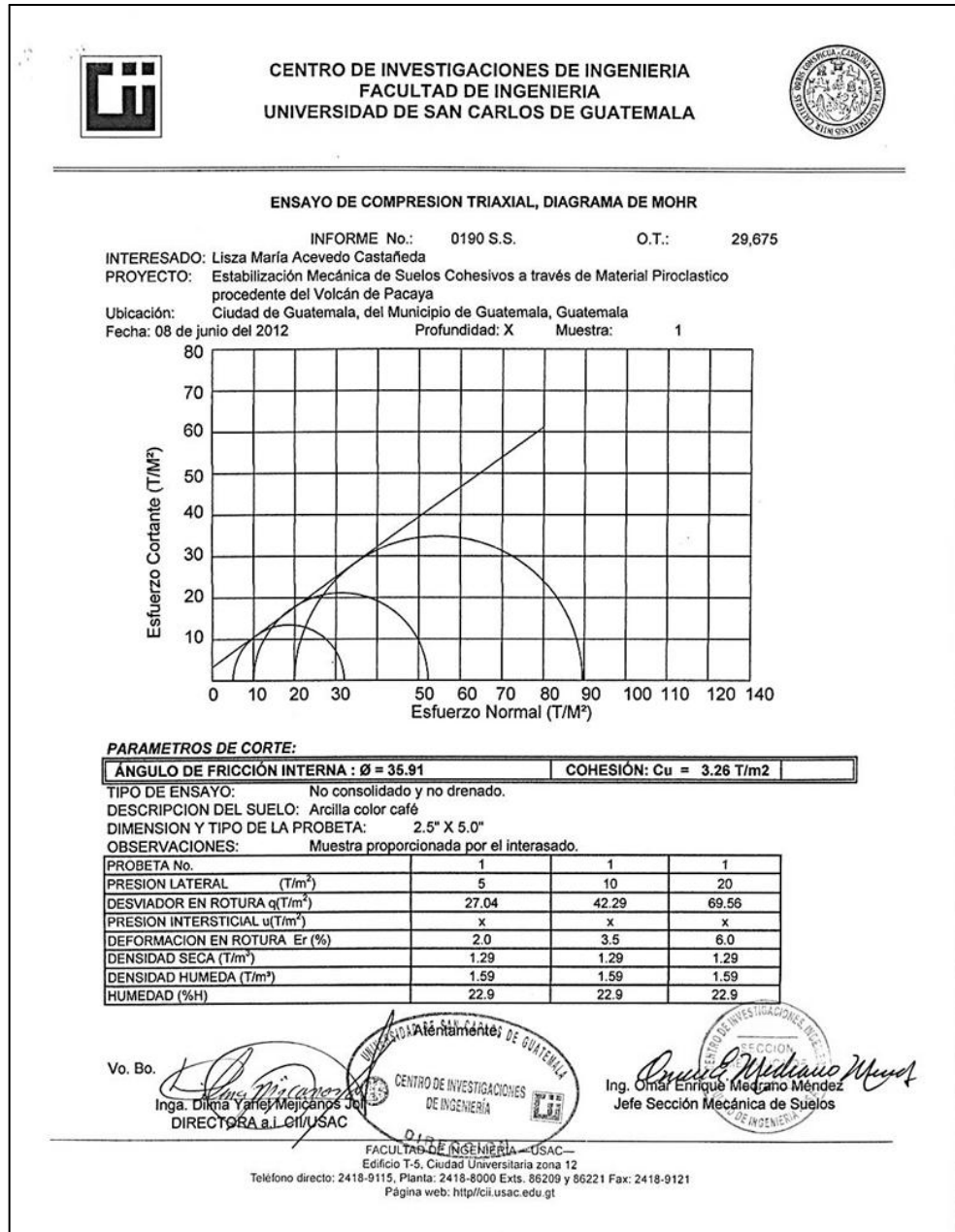
Omar Enrique Méndez
Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

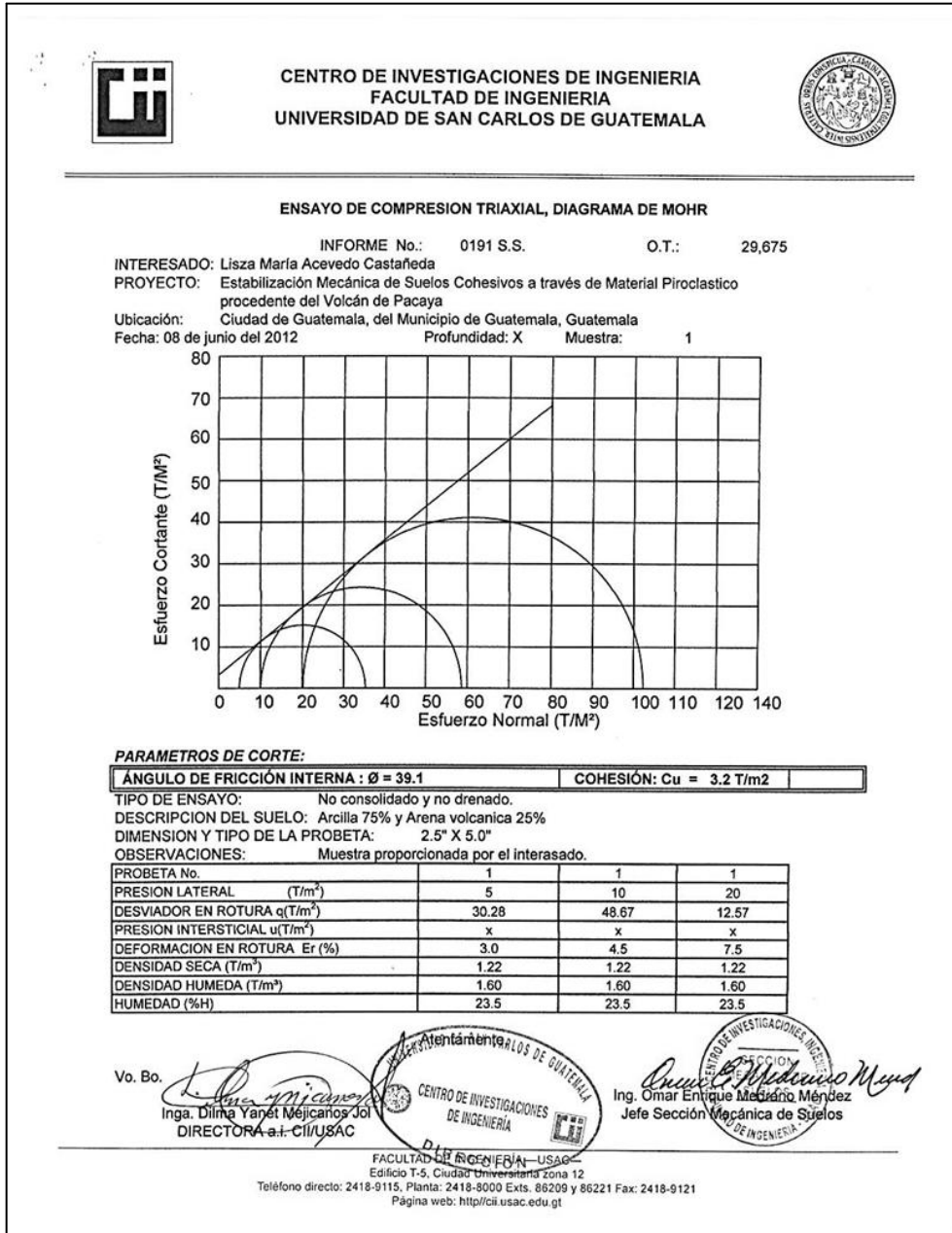
Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 13. Compresión triaxial de la arcilla color café





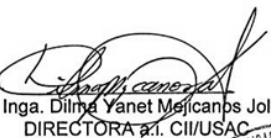


Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 14. **Compresión triaxial de la mezcla: 25% arena – 75% arcilla**








Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 15. Equivalente de arena

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA			
INFORME No.: 0187 S. S. O.T.: 29,675				
INTERESADO:	Lisza María Acevedo Castañeda			
PROYECTO:	Estabilización Mecánica de Suelos Cohesivos a través de la Utilización de Material Piroclástico Procedente del Volcán de Pacaya			
ASUNTO:	ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA			
Norma:	A.A.S.T.H.O T-176			
UBICACIÓN:	Ciudad de Guatemala, del Municipio de Guatemala, Guatemala			
DESCRIPCIÓN DEL SUELO:	Arcilla color Café			
FECHA:	08 de junio del 2012			
<u>RESULTADO DEL ENSAYO:</u>				
<table border="1"><tr><td>E.A=</td><td>16</td></tr></table>			E.A=	16
E.A=	16			
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el interesado				
Atentamente,				
Vo. Bc.	 Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol DIRECTORA a.i. CII/USAC	 Ing. Omar Enrique Madrano Mendez Jefe Sección Mecánica de Suelos		
				
FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC— Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121 Página web: http://cii.usac.edu.gt				



Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 16. Gravedad específica

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	
<hr/>		
INFORME No.:	0189 S. S.	O.T.: 29,674
INTERESADO:	Lisza María Acevedo Castañeda	
PROYECTO:	Estabilización Mecánica de Suelos Cohesivos a través de la Utilización de Material Piroclástico Procedente del Volcán de Pacaya	
ASUNTO:	ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA	
Norma:	A.A.S.T.H.O T-100 ASTM D854	
UBICACIÓN:	Ciudad de Guatemala, del Municipio de Guatemala, Guatemala	
DESCRIPCIÓN DEL SUELO:	Arena Volcanica	
FECHA:	08 de junio del 2012	
<u>RESULTADO DEL ENSAYO:</u>		
G.S.=	2.63 g/cm ³	
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el interesado		
Atentamente,		
Vo. Bo.		
	Inga. Dilma Yanet Mejicanos, UJOL DIRECTORA a.i. CII/USAC	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez Jefe Sección Mecánica de Suelos
		
<hr/>		
FACULTAD DE INGENIERIA —USAC— Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121 Página web: http://cii.usac.edu.gt		

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

Anexo 17. Permeabilidad por el método de cabeza variable

	<p>CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA</p>	
---	--	---

INFORME No.: 0188 S.S O.T. No.: 29,675

INTERESADO: Liza María Acevedo Castañeda

PROYECTO: Estabilización Mecánica de Suelos Cohesivos a través de la Utilización de Material Piroclástico Procedente del Volcán de Pacaya

ASUNTO: ENSAYO DE PERMEABILIDAD

NORMA: AASHTO T125-66

UBICACIÓN: Ciudad de Guatemala, del Municipio de Guatemala, Guatemala

MUESTRA No.: 1

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Arena volcanica 25%-Arcilla 75%

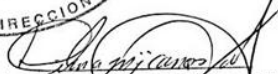



FECHA: 08 de junio del 2012

RESULTADO DEL ENSAYO:

Coefficiente de Permeabilidad= 3.05×10^{-7} cm/s

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.	 Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol DIRECTORA a.i. CII/USAC	 DIRECCION	 Ing. Omar Enrique Medrano Mendez Jefe Sección Mecánica de Suelos	
---------	---	--	---	--

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: laboratorio de mecánica de suelos, CII – USAC.

