

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE, GRADO Y POTENCIAL DE  
COLAPSO DE LA TIERRA BLANCA JOVEN EN EL ÁREA  
PROXIMAL Y DISTAL DE LA CALDERA VOLCÁNICA DE  
ILOPANGO**

PRESENTADO POR:

**RODRIGO ANTONIO LIMA MENJÍVAR**

**EVELIN LISSETH MIRANDA RIVAS**

**GERARDO ANTONIO QUINTANILLA MENJÍVAR**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO(A) CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2020

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

DIRECTOR :

**ING. ANIBAL RODOLFO ORTIZ**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO(A) CIVIL**

Título :

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE, GRADO Y POTENCIAL DE  
COLAPSO DE LA TIERRA BLANCA JOVEN EN EL ÁREA  
PROXIMAL Y DISTAL DE LA CALDERA VOLCÁNICA DE  
ILOPANGO**

Presentado por :

**RODRIGO ANTONIO LIMA MENJÍVAR  
EVELIN LISSETH MIRANDA RIVAS  
GERARDO ANTONIO QUINTANILLA MENJÍVAR**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

**INGRA. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA  
ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA  
PhD. ING. JOSÉ ALEXANDER CHÁVEZ HERNÁNDEZ  
(Asesor Externo)**

San Salvador, septiembre de 2020

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

**INGRA. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA**

**ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA**

**PhD. ING. JOSÉ ALEXANDER CHÁVEZ HERNÁNDEZ**  
**(Asesor Externo)**

## AGRADECIMIENTOS

En las siguientes líneas deseamos expresar nuestros sinceros agradecimientos a todas las personas que con su apoyo técnico, académico y humano han colaborado para la realización de este trabajo de investigación.

En primera instancia a **Dios** por habernos permitido desarrollar y llevar a término este trabajo de graduación.

A **nuestras familias**, por su apoyo incondicional, comprensión y estímulos para ser mejores cada día.

A nuestros asesores: Ingra. **Lesly Emidalia Mendoza Mejía**, Ing. **José Miguel Landaverde Quijada** y al PhD. Ing. **José Alexander Chávez Hernández** por su acertada orientación, el soporte y discusión crítica para el mejor aprovechamiento en el trabajo realizado; el compartir generosamente sus conocimientos académicos, técnicos y experiencia, a lo largo de nuestra carrera y durante este Trabajo de Graduación.

Al personal del Laboratorio de Suelos y Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador: Ing. **Ramón Evelio López**, al Tec. **Carlos Morataya** y Tec. **David Mejía**, por su disponibilidad al facilitar el equipo suficiente y necesario; su desinteresado apoyo en la ejecución de nuestros ensayos de laboratorio, aun cuando su tiempo era limitado, e incluso fuera de sus horas laborales.

A nuestra estimada señora **Mabel Vargas**, por su disponibilidad y amabilidad en la administración y gestión documental.

A todos nuestros compañeros y amigos y con mención especial a:  
**Jaime Reinaldo Reyes, Ing. Néstor G. Pérez Castaneda, Ing. Jairo  
Ramírez, Francisco Duarte e Ing. Erick Nill Cruz** por su apoyo en la  
ejecución de nuestros ensayos de laboratorio y aliento en todo  
momento.

Reiteramos de la manera más atenta a ustedes: ¡Muchísimas gracias!

## DEDICATORIA

A **Dios**, por haberme puesto en mi camino a las personas correctas, que han sido parte fundamental en mi vida personal y profesional, y por haberme permitido llegar hasta esta etapa.

A mi familia, a mi mamá **Rosa**, a mi hermanita **Carito**, porque me han enseñado que no solo se aprende de las personas mayores, sino también de las menores, porque no hay que ser adulto para ser siempre responsable.

A mi **Jairo**, por apoyarme en todo momento desde que lo conocí, por recordarme siempre que soy capaz de lograr todo lo que me proponga, por su respeto y amor hacia mí.

A la **Niña Miladi** e **Iván**, por haberme recibido con los brazos abiertos, y permitirme ser parte de su familia.

A **Don Denis**, a **Don Torres** y **Gabriel Martínez**, por su apoyo moral, y por compartirme sus conocimientos técnicos y tips profesionales en el área del laboratorio y sobre todo su amistad y por ser personas **calidad**.

A mi amigo de casi infancia **Rafael Rivera**, porque a pesar de la distancia siempre me brinda su amistad sincera y por creer que soy capaz de lograr muchas cosas en la vida.

A **Don Carlitos**, porque estuvo siempre cuando necesite su ayuda en los ensayos, por su amistad, sus consejos y por estar siempre cuando necesito de su ayuda.

A **Teto PC**, por brindarme su ayuda y apoyo moral en esos días largos de ensayos, y por esas pláticas largas constructivas.

A mis amigos y compañeros de la UES: a **Gerardo Quintanilla** (por su paciencia y dedicación a este trabajo de grado), **Gerver Laínez**, **Dimas Serrano**, **Carlos Hernández** (el Arqui), **Ed Velázquez**, **Samuel Acevedo**, **David Cruz**, **Moisés Lucero**, **Guillermo Gómez**, **Mirna Rivera**, **Samuel Ramírez**, **David Mejía**, **Kony Gutiérrez**, y no me olvido de **Don Luis Tepata** y **Antonio**, MUCHAS GRACIAS POR SU AMISTAD

**Evelin Miranda**



## DEDICATORIA

Dedico esta tesis:

A Dios Todopoderoso, por darme la vida, la salud, por ser mi fortaleza y haberme permitido alcanzar cada meta, en especial la culminación de mi carrera universitaria; a María Santísima por su Auxilio, guía y protección.

A mi familia: mis papás, a quienes debo todo, por su entrega generosa e incondicional en todo tiempo, por el amor y dedicación para guiarme en cada etapa de la vida, su comprensión, aliento, oraciones y correcciones oportunas, por inculcar valores y principios que han sido la orientación para la vida.

A hermanas y hermano: por su amor, su apoyo y acompañamiento en todas las formas en que han podido, desde siempre y en toda circunstancia.

A los docentes universitarios de la FIA y EIC, por transmitir su conocimiento y experiencias para nuestra formación.

A nuestros asesores de tesis: por su tiempo, conocimiento, orientación y exhortaciones a lo largo de la ejecución del trabajo de graduación, especialmente a la Ingra. Lesly Mendoza por su invaluable apoyo, dedicación y dirección técnica.

Al honorable Jurado que tuvo a bien evaluar y calificar éste trabajo de graduación.

A mis estimados compañeros de universidad -con orgullo, ahora colegas- aquellos con los que iniciamos la carrera, aquellos con los que continuamos en una etapa posterior, que por distintos motivos tuvimos que dividir nuestro tiempo y camino, y, con los que hemos realizado ésta última etapa; a quienes agradezco profundamente su amistad, su calidez, la

sinergia, empatía y cooperación en la que convivimos en nuestro tiempo como estudiantes, que sea la misma con la que sobrellevemos la vida profesional.

A la CEL, por abrir sus puertas, dándome la oportunidad y confianza para iniciar en esta institución mi vida laboral y profesional; a mis compañeros del Proyecto Hidroeléctrico El Chaparral quienes demostraron su calidad humana y profesional desde el inicio, apoyándome para el desarrollo de mis asignaciones, abonando desinteresadamente a mi conocimiento y experiencia, sin olvidar sus acciones que contribuyeron para mi avance en la tesis, y, de manera particular a mis jefes, quienes no dudaron en extender su mano, depositar su confianza y enseñar con el ejemplo, así también por su comprensión para posibilitarme llevar al mismo tiempo el trabajo y el estudio.

A mis amigos, con quienes estoy muy agradecido por ser incondicionales, por estar presentes siempre, por los momentos con cada uno, por el ánimo, el aliento, la paciencia y compartir conmigo la satisfacción y alegría de concluir ésta etapa de la vida.

A todos ustedes, con gratitud;

**Gerardo A. Quintanilla Menjívar.**

## DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso, por ser inicio y fin de todo mí existir; a mi madre María Santísima por ser el auxilio perfecto que en la peor de las batallas, sorprende con la victoria. A Jesucristo, señor de la historia. Razón y principio de todo sentido en mi vida. A San Oscar Romero que del todo de Dios, y nuestro nada, lograremos mucho.

A mi familia: mis padres hermanos y primos, que sin su entrega ni sacrificios desde siempre, no habría sido posible llegar a este punto. Por su amor, incondicional apoyo, disposición y oraciones, en todo momento.

A mí hermosa novia: quien fue testigo del desafiante proceso de culminación de esta carrera, en medio de realidades laborales y académicas. Por compartir con singular calidez y amor, este y otros retos conmigo.

A mis hermanos de la Cuarta Comunidad del Camino Neocatecumenal de El Salvador, en la parroquia El Calvario de Santa Tecla. Además de mis catequistas. Por marcar el cambio de rumbo en mi vida, a través de sus oraciones y apoyo moral o material, cuando así lo necesite. Además a los sacerdotes misioneros y laicos de familia Salesiana y comunidad Jesuita centroamericana, cuya inspiración y modo Cristiano de vida, orientaron mi camino como brújula en medio de aguas turbulentas.

A nuestros asesores de tesis: por su dedicación, perseverancia, y conocimientos del cual nos hicieron generosamente parte, especialmente a la Ingra. Lesly Mendoza por el reto de dirigir un equipo tan diverso en formas de trabajo y pensamiento. Con verdadero arte en la enseñanza y dirección del mismo.

A mis compañeros de la UES, ahora con orgullo: Ingenieros, a los que me acompañaron en cada etapa de la carrera y, con los que concretamos el desafío de este trabajo de graduación. Por su amistad, empatía, ayuda y apoyo.

Que sea el inicio de una relación profesional estable de otrora compañeros de lucha, en honor a todos los que a través de su aporte en la historia salvadoreña, nos permitan llevar en alto, la calidad de hijos de esta casa de estudios. En reconocimiento del legado de nuestros héroes y mártires.

A mis amigos, por estar presentes siempre, por los momentos especiales vividos con cada uno. Por ser uno de muchos triunfos que compartiremos en el camino. Por ser auténticas y brillantes luces en medio de las noches más oscuras.

**A.M.D.G.**

**Rodrigo Antonio Lima Menjívar.**

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>iv</b>
<b><u>CAPÍTULO No. 1</u> GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	<b>6</b>
<b>1.4 ALCANCES</b> .....	<b>7</b>
<b>1.5 LIMITACIONES</b> .....	<b>8</b>
<b>1.6 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>9</b>
<b><u>CAPÍTULO No. 2</u> MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)</b> .....	<b>11</b>
<b>2.3 FORMACIÓN DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS PRESENTES EN EL AMSS</b> .....	<b>12</b>
<b>2.4 GEOLOGÍA DEL AMSS</b> .....	<b>17</b>
<b>2.5 ORIGEN DE LOS SUELOS DEL AMSS</b> .....	<b>19</b>
<b>2.6 CARACTERÍSTICAS DE LA TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) DEL AMSS</b> .....	<b>22</b>
<b>2.7 COMPORTAMIENTO DE LA TBJ ANTE FACTORES EXTERNOS</b> .....	<b>26</b>
<b>2.8 COLAPSABILIDAD DE SUELOS</b> .....	<b>36</b>
<b>2.9 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS DEL COLAPSO</b> .....	<b>39</b>
<b>2.10 CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES FÍSICA QUE PERMITEN IDENTIFICAR LOS SUELOS COLAPSABLES</b> .....	<b>42</b>

2.11 DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE PARÁMETROS DE COLAPSO EN SUELOS.....	44
2.12 APLICACIÓN INGENIERIL DE LOS PARÁMETROS DE COLAPSABILIDAD .....	45
2.13 COLAPSABILIDAD DE LA TBJ DEL AMSS (ESTUDIOS PREVIOS).	49
<b><u>CAPÍTULO No. 3</u> METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>52</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	53
3.2 INVESTIGACIÓN CONCEPTUAL (BIBLIOGRÁFICA.....	53
3.4 SELECCIÓN DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN .....	55
3.5 SELECCIÓN DE ENSAYOS A REALIZAR PARA LLEVAR A CABO LA CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES DE TBJ Y CARACTERÍSTICAS DE COLAPSABILIDAD. ....	56
3.6 ESTUDIO Y DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE ESPECÍMENES E IDENTIFICACION DE LAS UNIDADES DE TBJ.....	56
3.7 MUESTREO .....	59
3.8 EJECUCION DE ENSAYOS .....	63
3.9 RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO .....	65
3.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	65
<b><u>CAPÍTULO No. 4</u> APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....</b>	<b>67</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	68
4.2 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	69
4.3 INVESTIGACION EN LUGARES DONDE SE HAN IDENTIFICADO UNIDADES DE TBJ.....	70
4.4 SELECCIÓN DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN .....	71
4.5 MUESTREO .....	89

4.6 EJECUCIÓN DE ENSAYOS .....	94
4.7 RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO .....	94
4.8 RESUMEN DE LAS UNIDADES OBTENIDAS .....	122
4.9 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE COLAPSO.....	123
4.10 RESULTADOS DE ENSAYOS DE COLAPSABILIDAD .....	123
<b><u>CAPÍTULO No.5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS</u></b>	<b>139</b>
5.1 INTRODUCCIÓN .....	140
5.2 RESUMEN DE LAS UNIDADES ESTUDIADAS .....	141
5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS .....	141
5.4 RESULTADOS DE COLAPSABILIDAD EN CONDICIÓN NATURAL .	147
5.5 RESULTADOS DE COLAPSABILIDAD EN CONDICIÓN COMPACTADA .....	171
<b><u>CAPÍTULO No. 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</u></b>	<b>198</b>
6.1 CONCLUSIONES .....	199
6.2 RECOMENDACIONES .....	205
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	207
ANEXOS.....	210
MANUAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE COLAPSO..	211
RESULTADO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y CÁLCULO DEL POTENCIAL DE COLAPSO DE LAS UNIDADES DE TBJ .....	226
NORMA DE REFERENCIA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE, GRADO Y POTENCIAL DE COLAPSO .....	259

## INTRODUCCIÓN

El presente documento de Trabajo de Graduación consistió en la determinación del Índice, Grado y Potencial de Colapso de las unidades de Tierra Blanca Joven en el Área Metropolitana de San Salvador.

Para el desarrollo de este trabajo y con el fin de cumplir con los objetivos plantearon, se desarrollaron diferentes actividades por capítulo, los cuales se detallan de forma resumida a continuación:

**Capítulo No. 1:** Se presentan los antecedentes relacionados a estudios de las TBJ y el fenómeno de colapsabilidad; el planteamiento del problema, objetivos, alcances, limitaciones y justificación que conceptualiza éste trabajo de graduación.

**Capítulo No. 2:** Contiene de manera organizada la información recopilada en la investigación bibliográfica a fin de definir aspectos geológicos, origen y características de las unidades de TBJ, causas que dan lugar al fenómeno de colapso; correlaciones entre las propiedades físicas para identificar suelos colapsables y las formas para determinar los parámetros de colapsabilidad así como su aplicación ingenieril.

**Capítulo No. 3:** Se expone y plantea la metodología de trabajo empleada para cumplir con los objetivos de esta investigación, programando una secuencia de pasos a seguir, iniciando por la conceptualización de las TBJ y el fenómeno de colapso (marco teórico), el estudio de investigaciones previas en donde se identificó la presencia de unidades de TBJ en distintos puntos del AMSS, se definieron los criterios de selección a utilizar, así como el tipo de muestras a extraer, se seleccionaron puntos definitivos, de donde se extrajeron muestras necesarios para la ejecución de los ensayos de caracterización y colapsabilidad, tanto en condición inalterada y compactada.



**Capítulo No. 4:** En éste capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología utilizada: se detalla la información de los sitios de extracción de muestras, los materiales encontrados, el tipo de muestras y manejo de las mismas, los resultados de ensayos de caracterización y de parámetros de colapsabilidad.

**Capítulo No. 5:** Contiene el análisis e interpretación de los resultados de ensayos de caracterización y colapsabilidad de las unidades de TBJ obtenidas en la condición natural, y de especímenes compactados de las unidades superficiales (unidades G y F) con variaciones de humedad respecto a su humedad óptima de compactación.

**Capítulo No. 6:** Se presentaron las conclusiones sobre los resultados obtenidos, y se proponen recomendaciones en que se destaca la invitación a continuar y ampliar la investigación del fenómeno de colapso en nuestro medio.

# **CAPÍTULO No. 1**

## **GENERALIDADES**

## 1.1 ANTECEDENTES

La Tierra Blanca Joven (TBJ), es en su mayoría producto de la última erupción pliniana de la Caldera de Ilopango, conformada por depósitos de caída, flujos piroclásticos (se llama *piroclasto*, del griego: «fuego»-«roto», o *tefra* del griego «ceniza» a cualquier fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva durante una erupción volcánica), oleadas piroclásticas, que conformaron sus unidades, denominadas por las letras: A, B, C, D, E, ignimbritas (Alfa y Beta), F y G; desde la base hasta la más superficial de acuerdo a Hernández [2004]. Esta erupción cubrió la mayoría del área metropolitana de San Salvador (AMSS) y es el origen del material más abundante en los suelos con mayor presión urbana del país.

Una de las primeras caracterizaciones de TBJ del AMSS se le atribuye al estudio de Rolo [1998]; en el que se determinó que los suelos del AMSS presentan una reducción importante de su resistencia al corte conforme alcanzan la saturación de los mismos. Dicho estudio incluyó la medición de la capilaridad del suelo y la ejecución de pruebas de consolidación ante carga mecánica. Se demostró a través de las curvas de compresibilidad por consolidación obtenida, que el comportamiento colapsable de las TBJ se debía a la naturaleza parcialmente saturada del suelo.

Lo anterior fue confirmado por Amaya y Hayem [2000] quienes estudiaron la TBJ desde una perspectiva de la mecánica de suelos parcialmente saturados y mecánica de suelos clásica (cohesión, ángulo de fricción y colapsabilidad), concluyendo que ésta se satura al tener un contenido de humedad del 40%. Luego Rolo et al. [2004], investigó sobre la colapsabilidad de TBJ y sobre la relación de la capilaridad y cementación en su cohesión aparente, concluyendo que el cambio de volumen o colapso repentino de las TBJ al ser saturadas es la causa más importante de los movimientos de ladera ante lluvias torrenciales.

Durante los años siguientes se continúan con estudios formales de la TBJ; en los que se hizo uso de la mecánica de suelos clásica; lo que presenta una mala aproximación, ya que en el AMSS predominan los suelos cuyo comportamiento mecánico es el de parcialmente saturados.

Al estudiar los suelos como parcialmente saturados; se observa una aparente elevación de esfuerzos debido a la succión (presión de poros) presente en éstos y a la presencia de cementantes. En El Salvador se han realizado pocos estudios sobre este tema, ya que se no se tiene el equipo necesario para su determinación, parámetro de gran importancia en el estudio del comportamiento de las TBJ.

Chávez et al. [2012] menciona en las conclusiones de su estudio, la importancia de la comprensión y modelamiento del comportamiento correcto de los suelos parcialmente saturados, debido a que se continúa aplicando para la determinación del comportamiento del suelo, el modelo de Mohr-Coulomb, (para suelos saturados), tanto en la enseñanza universitaria como en el diseño de obras de construcción.

Ayala Valdez [2013] presentó el uso de modelos constitutivos de análisis de suelos que estudian la relación entre cambios de volumen y capacidad de esfuerzo de suelo. Entre los modelos aplicados a muestras de Tierra Blanca Joven (unidad G) estaba el modelo Cam Clay modificado, Hipoplasticidad y Mohr – Coulomb, que, al ser comparados los resultados se demostró que existen diferencias entre ellos. Siendo Mohr - Coulomb y Cam Clay modificado los que reflejan mayores discrepancias con el comportamiento real del suelo. El modelo de Hipoplasticidad (no-lineal e inelástico) representó de manera más aproximada los resultados obtenidos en laboratorio.

Por lo anterior, es importante continuar con los estudios relacionados con el comportamiento que presentan las TBJ, con el fin de comprender su comportamiento.

Debido a que en nuestro medio se cimientan proyectos de diferentes magnitudes sobre la TBJ por parte de planificadores urbanos, Ingenieros Civiles e instituciones gubernamentales es fundamental el reconocimiento de las características geológicas, propiedades geotécnicas y geomorfológicas de las unidades de TBJ así como de su comportamiento, como suelo predominante en el AMSS, además en miras a la elaboración de instrumentos (como los mapas de conveniencia de urbanización basado en geomorfología) para mejorar la estrategia de gestión de riesgos y estar preparados para futuros problemas relacionados con su comportamiento.[Chávez et al. 2015].

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En todo el territorio salvadoreño se han presentado distintas problemáticas en los suelos, siendo algunos de estas: movimientos de laderas, erosión, asentamientos y colapso, este tipo de comportamiento no solo se debe a sus propiedades físicas y mecánicas, sino también a factores externos (medioambientales) e incluso químicos.

Uno de los mayores problemas que se presentan en los suelos finos es el *colapso*, este fenómeno se atribuye a las características propias del suelo tales como:

- Relación de vacíos alta, que conforma una estructura macro –porosa;
- Granulometría predominantemente fina, poco distribuida, y,
- Estructura del suelo en que las partículas de mayor tamaño se encuentran separadas por espacios muy abiertos o unidos por puentes de material arcilloso, oxido o cuarzo (cementantes).

A estas características se le suma el incremento en la humedad natural y una tensión media actuante sobre la masa de suelo dará origen al fenómeno de

colapsabilidad, clasificando a estos suelos como estructuralmente inestables o metaestables.

Debido a la naturaleza del clima, y la ubicación de las fallas tectónicas en la región, los suelos del AMSS están expuestos a lluvias y fenómenos sísmico, pero, también ha sido notorio el mal estado en que se encuentran los sistemas de agua potable, negras y lluvias, factores que crean las condiciones para la ocurrencia del colapso, provocando así afectaciones a las estructuras construidas sobre éstos materiales, y a la población que las ocupa.

El colapso de un suelo se puede definir como la **disminución súbita del volumen de la masa de suelo cuando éste se encuentra bajo una condición de carga constante.**

Se ha identificado que el colapso se origina por los cambios en la humedad en la masa de suelo, por lo que en el pasado se han realizado estudios con el objetivo de determinar qué tan susceptibles al colapso son los suelos del AMSS, por medio de la determinación del índice y potencial de colapso, estos estudios se enfocaron principalmente en la unidad G de la TBJ; En dicha investigación [Rolo et al 2004], se realizaron pruebas en laboratorio en especímenes, tanto en estado natural como compactados, determinando la variación de la relación de vacíos de los especímenes (tanto estado natural y saturados), mediante la aplicación de diferentes valores de esfuerzos, y se determinó lo siguiente:

- El índice de colapso se encuentra entre moderado y severo,
- Que mediante la prueba de doble edómetro las muestras inalteradas y compactadas presentaron resultados de potencial de colapso similares cuando son sometidos a esfuerzos bajos, pero al aumentarse los esfuerzos estos cambian,
- Que las muestras con humedad natural colapsan abruptamente cuando se cargan y saturan.

A partir de estudios previos relacionados tanto con las TBJ como con el fenómeno de colapsabilidad, se observa que se tiene poco conocimiento del comportamiento que presentan los materiales presentes en el AMSS, y particularmente sobre la colapsabilidad.

Definido el fenómeno de colapsabilidad, los factores que inciden y sobre qué tipo de suelos tiene efecto, se puede determinar que debido a la geología presente en nuestro medio, existen suelos en los que se puede presentar el fenómeno, específicamente cuando nos referimos a suelos con altos contenidos de finos (limos), por lo que el objetivo de este trabajo de graduación, es determinar el índice, grado y el potencial de colapso, en muestras obtenidas de las unidades de la TBJ, que permitan conocer como es el comportamiento de estos suelos ante el fenómeno de colapsabilidad.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **OBJETIVO GENERAL**

Determinar la propensión al colapso en la Tierra Blanca Joven (TBJ) a través de la obtención del índice, grado y el potencial de colapso en puntos ubicados en el área proximal y distal de la Caldera Volcánica de Ilopango.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar información acerca de las propiedades y comportamiento de la Tierra Blanca Joven en las unidades que conforman los suelos del AMSS.
- Identificar las causas que provocan el colapso en los suelos de Tierra Blanca Joven del AMSS.
- Obtener muestras de suelos en zonas específicas del AMSS para la realización de pruebas en laboratorio que permitan determinar las características físicas de las TBJ.

- Realizar pruebas de laboratorio para determinar las características físicas de las muestras de suelos obtenidas.
- Aplicar el procedimiento de la norma ASTM D5333 “Método para medir el potencial de colapso de los suelos” en muestras de suelos en estado natural de TBJ y muestras de suelos compactadas
- Analizar los resultados obtenidos de los ensayos en laboratorio.
- Determinar el índice, grado y potencial de colapso en las unidades de TBJ estudiadas y concluir en relación a su propensión al colapso de cada una.

## **1.4 ALCANCES**

- La investigación será enfocada a muestras correspondientes a TBJ obtenidas de puntos de interés en el AMSS, donde se cumpla con adecuadas condiciones de accesibilidad y seguridad.
- La determinación del índice, grado y potencial de colapso se llevará a cabo a través de pruebas de laboratorio.
- La caracterización de las muestras de Tierra Blanca Joven se llevará a cabo a través de la realización de las siguientes pruebas de laboratorio: Análisis Granulométrico por Tamizado (ASTM D422); Determinación de la gravedad específica de partículas sólidas (ASTM D854); Determinación de humedad por masa (ASTM D2216); Determinaciones de humedad óptima y densidad máxima para compactación (ASTM D698).
- El análisis del comportamiento de las TBJ en las unidades de interés se apoyará en los resultados de las pruebas de laboratorio anteriormente planteadas, además del método de ensayo estándar para la determinación del potencial de colapso basado en la norma ASTM D 5333, para muestras en estado natural y muestras compactadas por la prueba próctor estándar (ASTM D 698).



## 1.5 LIMITACIONES

- El muestreo para la realización de pruebas de laboratorio se limitarán a la accesibilidad y condiciones de seguridad de los sitios de estudio.
- Las unidades en estudio de la TBJ para este trabajo de graduación se verán limitadas por la facilidad de extracción u obtención de muestras de las mismas, según las condiciones del punto de interés.
- Las pruebas de laboratorio a desarrollarse dependerán del equipo de laboratorio disponible en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la UES; según la capacidad y equipo existente.
- La determinación de las propiedades del colapso de las muestras de TBJ, a diferentes humedades y grados de compactación se verán limitadas por la disponibilidad de equipo de laboratorio necesario.
- La determinación de las propiedades del colapso de las muestras de TBJ a diferentes humedades y grados de compactación se realizarán a las unidades superficiales, ya que la mayoría de las edificaciones se apoyan sobre estas.

## 1.6 JUSTIFICACIÓN

En vista del crecimiento poblacional que experimenta principalmente el AMSS y al origen de los suelos donde se encuentra asentada, toma mucha importancia la investigación de este tipo de suelo (TBJ), que uno de los principales problemas que ha experimentado es el fenómeno de colapso, pero muy poco se ha estudiado sobre este, sin poder determinar a la fecha que tan propensos son ante este fenómeno.

En investigaciones preliminares, se ha podido determinar que los estudios realizados se aplicaron principalmente en la unidad 'G' de las TBJ, y, han indicado que el colapso es provocado por un aumento en el porcentaje de humedad de la masa de suelo, y que, al llegar a la saturación sucede un súbito cambio de volumen de la misma por el reacomodo de las partículas en su estructura, por lo que con esta investigación se busca abarcar otras unidades de la TBJ del AMSS a las que se determinará el índice, grado y potencial de colapso por medio de pruebas realizadas en laboratorio a muestras de suelo en su estado natural y compactadas (unidades superficiales G y F) con el fin de poder hacer una comparación del comportamiento que pueda presentarse, entre las dos condiciones de las unidades en estudio.

Como resultado de este estudio, se buscará contribuir al conocimiento del comportamiento de las TBJ en cuanto al fenómeno de colapso, apoyando a los diseñadores a tomar las mejores decisiones a la hora de proyectar cimentaciones o mejoras del terreno, como técnicas que prevengan las fallas estructurales o de servicio que pueden sobrevenir sobre estas, debido al comportamiento colapsable de las TBJ.

# **CAPÍTULO No. 2**

## **MARCO TEÓRICO**

## **2.1 INTRODUCCIÓN**

Dado que el presente trabajo de graduación está delimitado al AMSS, y con el fin de profundizar en la comprensión del fenómeno de colapso en las TBJ locales, se iniciará con una revisión de aspectos relacionados a la geología de la zona.

Resaltando los aspectos más importantes de la formación de las tierras blancas, su relación a las formaciones geológicas predominantes, ubicación geográfica de centros de emisión, su interacción con los núcleos urbanos cercanos. Además, se abordará una revisión general a las características ya conocidas de la TBJ, producto de investigaciones anteriores.

Asimismo, se presentarán las características más importantes que definen al colapso como un factor de importancia en suelos parcialmente saturados. También se mencionarán algunas de las relaciones del colapso con otras propiedades físicas y geotécnicas de estos suelos. Finalizando con una revisión de los avances en el desarrollo del concepto del colapso a través de diferentes investigaciones ya realizadas y aplicaciones a la ingeniería civil del mismo.

## **2.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)**

### **Concepto de Geología**

La palabra Geología procede de dos vocablos griego *geo* (tierra) y *logos* (tratado, estudio); por tanto, es el estudio o conocimiento de la Tierra, su origen, su formación, especialmente de los materiales que la componen, así como el carácter químico de los mismos, su distribución en el espacio y en el tiempo y los procesos de transformación que experimentan.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> <https://conceptodefinicion.de/geologia/>

## **Origen del Vulcanismo**

El Graben centroamericano es un bajo estructural que en El Salvador tiene un ancho irregular que varía de unos 15 a 30 km, y que en cuyo interior y sobre el borde sur se ha desarrollado una cadena de volcanes activa. Esta estructura localmente es conocida como “Graben Central” y se formó aproximadamente entre el plioceno y el pleistoceno Inferior (5.3 - 2 m.a.) [Hernández, W, 2004].

La actividad volcánica del Graben central es producida por el fenómeno de subducción, donde la placa de Cocos se va consumiendo bajo la placa del Caribe, donde la parte que se va fundiendo en la profundidad, es la que se convierte en el magma para el cinturón volcánico.

## **2.3 FORMACIÓN DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS PRESENTES EN EL AMSS**

El intenso magmatismo – vulcanismo activo de los territorios que conforman la república de El Salvador, dio origen a las siguientes formaciones geológicas que lo atraviesan:

- Formación Morazán.
- Formación Chalatenango.
- Formación Bálsamo.
- Formación Cuscatlán.
- San Salvador.
- Todos Los Santos.
- Valle de Ángeles.
- Grupo Yojoa.

En el caso del AMSS las formaciones cuya interacción han originado los suelos y estructuras geológicas de esta zona en estudio son las formaciones Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador, (ver Figura No 2.1) las cuales se describen de manera breve a continuación:

**Formación San Salvador:** De origen en el periodo Holoceno hasta Pleistoceno. Comprende las estructuras geológicas que se encuentran sobre la cadena volcánica joven que atraviesa la parte Sur del país y están compuestas por productos extrusivos de los volcanes individuales.

**Formación Cuscatlán:** originada en el periodo del Pleistoceno hasta el Plioceno superior y se encuentran en la cadena volcánica vieja que atraviesa la parte Norte del país y están compuestas por productos extrusivos de los volcanes individuales.

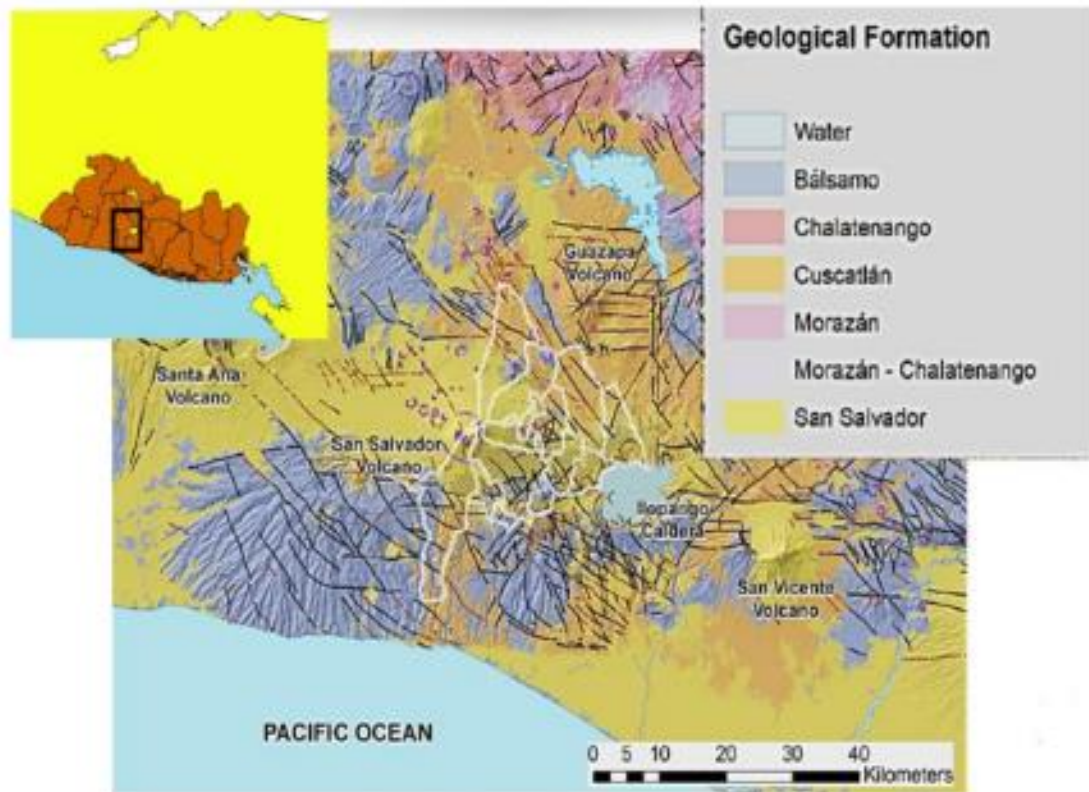
**Formación Bálsamo:** originada en el periodo del Plioceno y está compuesta por productos volcánicos en los cuales destaca los aglomerados con intercalaciones de tobas volcánicas endurecidas y corrientes de lava basáltica-andesítica.

Como se mencionó en el apartado anterior; los materiales geológicos que se encuentran presentes en el AMSS son principalmente producto de la interacción de los complejos volcánicos cercanos, cuya distribución geográfico-temporal se comprende de manera gráfica, (ver Figura No 2.2), ordenados desde el más antiguo hasta el más joven.

La secuencia geológica del AMSS, en orden de aparición está compuesta por las formaciones Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador (ver Figura No 2.3)

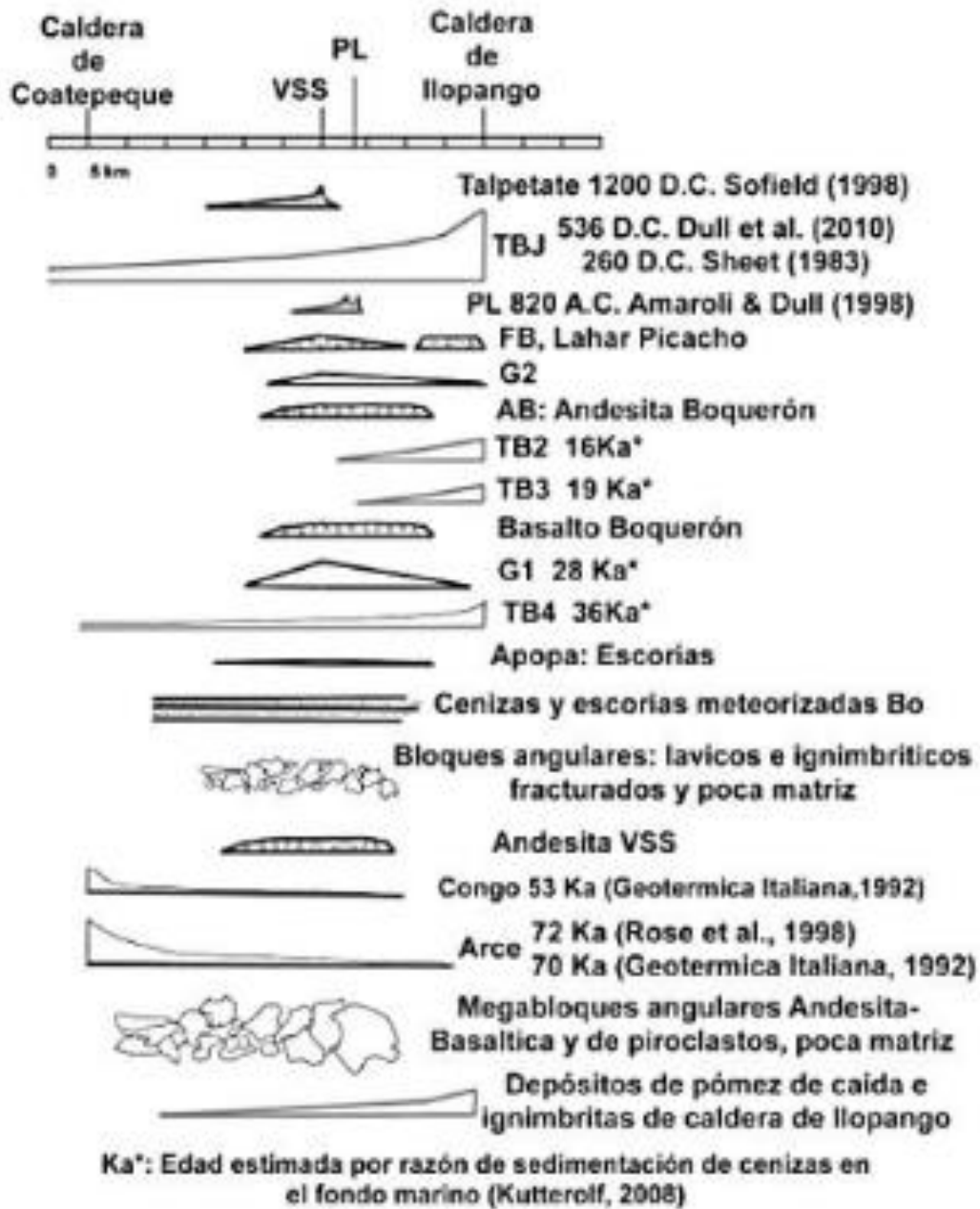
La formación Bálsamo está subyacente a la formación Cuscatlán, constituida por importantes ignimbritas ácidas y lavas básicas intercaladas; sobre esta última se encuentra la **formación San Salvador** que está representada por las Tefras del volcán San Salvador, caldera de Ilopango, caldera de Coatepeque y el cráter de Plan de la Laguna (PL). De las Tefras en cuestión la mayoría están constituidas por productos piroclásticos, siendo el más importante por su gran predominancia en contraposición a su reciente aparición en edad geológica la Tierras Blanca Joven (TBJ).

Cabe destacar que la distribución de dichos materiales geológicos también depende de la dirección de los vientos, procesos erosivos y explosividad durante la erupción.



**Figura No 2. 1. Mapa Geológico del AMSS representando las formaciones geológicas que confluyen en la región de interés.**

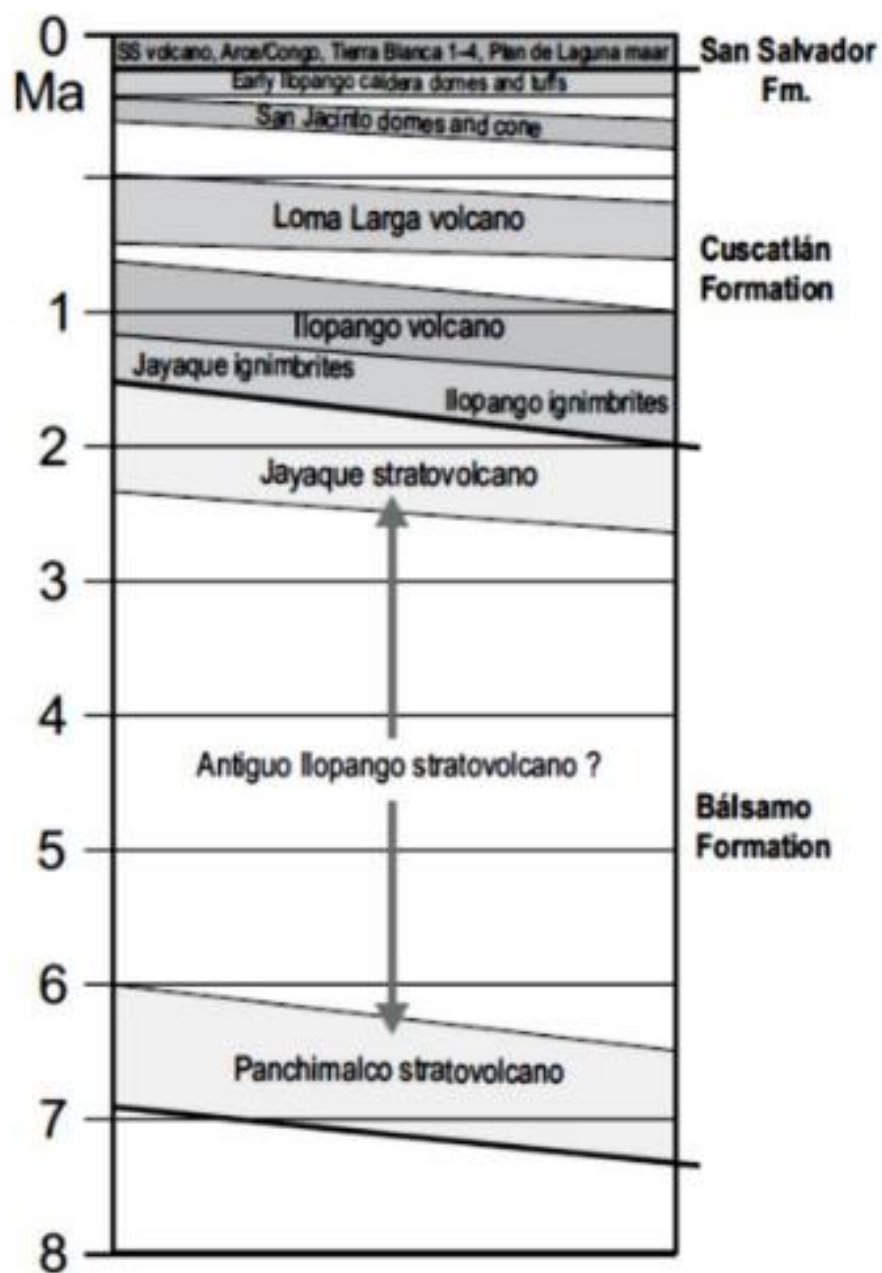
Fuente: Kowalski Z., Graniczny M., Przytucka M., Sebesta J., Chávez A. (2017) "Vertical ground motion of the San Salvador metropolitan area (AMSS) seen at the ALOS InSAR data"



**Figura No 2. 2. Esquema que muestra la distribución espacio-temporal de distintos materiales volcánicos en el AMSS respecto a sus centros de emisión.**

Fuente: Chávez et al (2012)





**Figura No 2. 3. Sucesiones y edad más probables de las unidades geológicas que constituyen las formaciones Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador. La escala con respecto a la edad es de 1 Ma.**

Fuente: Lexa et al, (2011). "Geology and volcanic evolution in the southern part of San Salvador Metropolitan Area", Pag.134

## 2.4 GEOLOGÍA DEL AMSS

El área Metropolitana de San Salvador se limita al norte entre Nejapa y Apopa, al sur por el bloque elevado de la cordillera de El Bálsamo, al oeste la ladera del cráter Boquerón y al este por la Caldera de Ilopango. La estructura del graben Central juega un papel muy importante en la geología del país por lo tanto del AMSS, puesto que esa depresión o graben, se ha formado concomitantemente con el surgimiento de la cadena volcánica y ha sido rellenada por los productos de esos volcanes (ver Figura No 2.4),

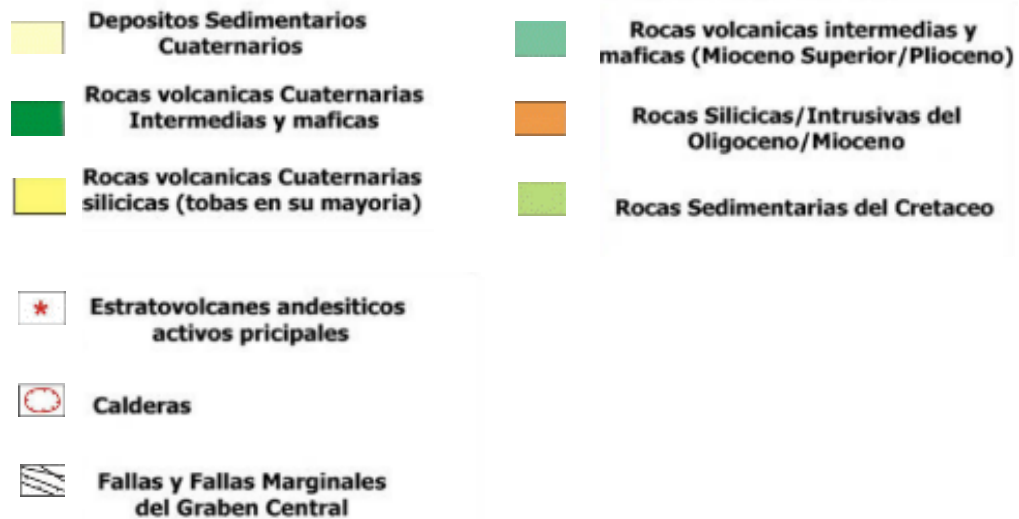
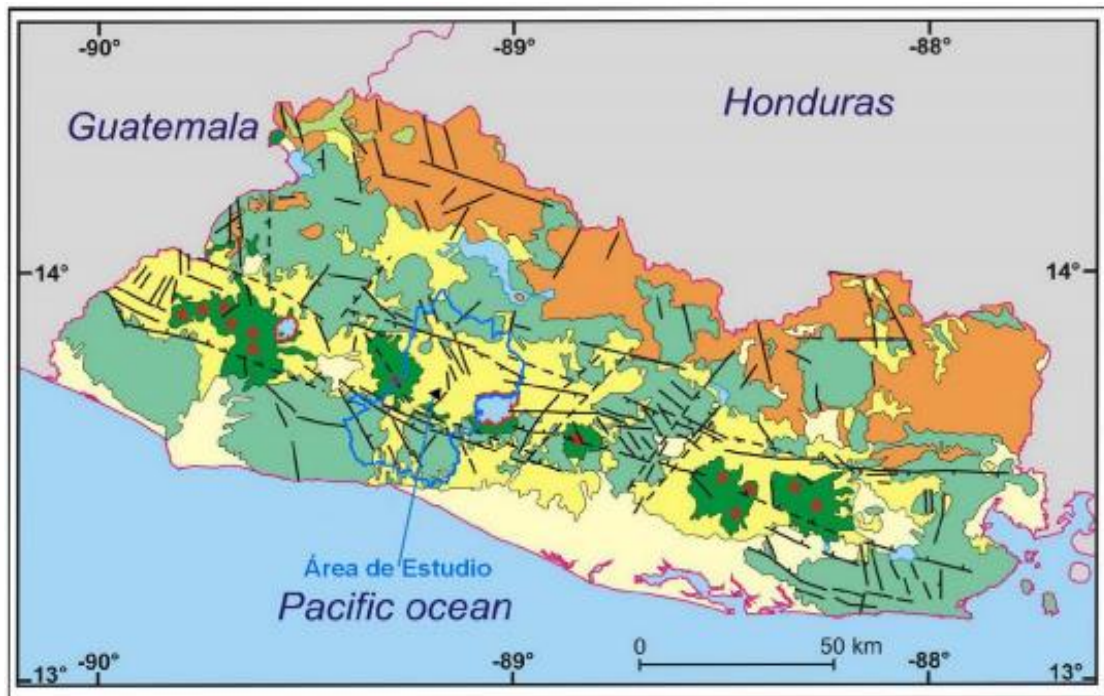
Entre las estructuras del volcán de San Salvador y la Caldera de Ilopango encuentran otras menores, tales como el cono El Carmen en Ayutuxtepeque y los domos Cuscatancingo y Santa Rosa, este último en Soyapango, todos de edades desconocidas, El domo San Jacinto se localiza contiguo al borde occidental del Ilopango y al relicto de la Caldera de Planes de Renderos. El cráter de explosión Plan de la Laguna yace contiguo a la cordillera del Bálsamo y el cono de la Hoya se localiza en la ladera oriental del volcán San Salvador<sup>2</sup>.

El AMSS se encuentra en su mayoría dentro de la unidad geológica rocas volcánicas plio-pleistocénicas y orogénicas que comprende los edificios volcánicos que se han establecido en el interior de la estructura del Graben central y aquellos localizados en la proyección hacia el sur del graben de Ipala en El Salvador.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Hernández, W. (2006). "Aspectos Geológicos que Influyen en las Aguas Subterráneas y en la Respuesta Sísmica del Área Metropolitana de San Salvador",

<sup>3</sup> Hernández, W, (2004). "Características Geotécnicas y vulcanológicas de las Tefras de Tierra Blanca Joven, de Ilopango, El Salvador".



**Figura 2.4. Esquema estructural de El Salvador (Modificado de Bosse et al. 1978, Hernández 2004, Corti et al. 2005). Hay una coincidencia espacial del arco volcánico activo y el Graben Central con dirección WNW-ESE (Modificados de Lexa et al. 2011)**

Fuente: Lexa J., Sebasta J., Chávez A., Hernández W. (2011) "Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area". *Journal of Geosciences*.

## 2.5 ORIGEN DE LOS SUELOS DEL AMSS

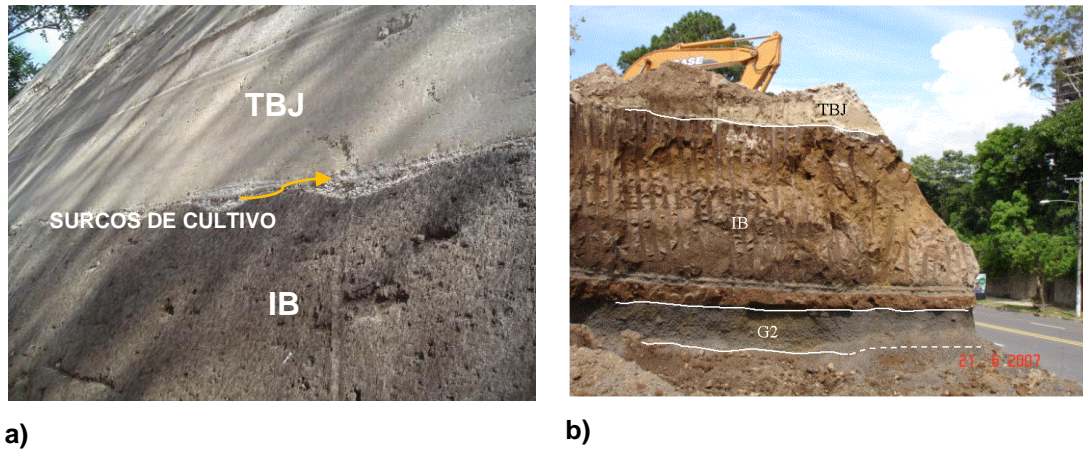
Hernández [2004] describe que el orden de los depósitos eruptivos presentes en la zona, en función de los centros de emisión son: **caldera de Coatepeque, volcán San Salvador, Plan de la Laguna, Picacho, y caldera de Ilopango**, los cuales se resumen en la Tabla siguiente (ver Tabla No. 2.1):

**Tabla No. 2.1. Correlación de los depósitos eruptivos a los centros de emisión**

<b>Caldera de Coatepeque</b>	
<b>Arce</b>	Cenizas compuestas por arenas medias a finas de pómez con biotita de color beige claro amarillento, poco consolidado. Se le estima una edad entre 69 y 75 mil años.
<b>Congo</b>	Compuesto por cenizas finas de color beige claro, poco cementadas. Se le estima una edad entre 50 a 56 mil años.
<b>Volcán San Salvador</b>	
<b>Erupción pliniana G1</b>	La erupción más grande que se conoce de este volcán que produjo una estructura caldérica de forma elíptica de 6 km por 4.5 km de diámetro. Estos depósitos están compuestos por pómez de caída vesicular, de composición dacítico oxidada y angular (ver Figura No 2.6). Se le estima una edad de 28 mil años.
<b>Erupción pliniana G2</b>	Erupción pliniana posterior y de bastante menor volumen que G1, compuesta por escoria poco vesicular más densas, afanítica, de color gris claro a gris pardo, mostrando mezclas de magma. Rico en líticos basálticos rojizos densos y andesitas café amarillentas y líticos hidrotermalizados, granulometría poco distribuida con pocos finos (ver Figura No 2.5.b).
<b>Ignimbrita Boquerón (IB)</b>	El tiempo de erupción entre IB y G2 es relativamente corto, pero aun así son independientes una de la otra. Compuesta por dos flujos piroclásticos de color café oscuro, mostrando intercalaciones de delgadas oleadas (suges) de color café claro a pardo, aunque algunas veces no están juntas (Figura No 2.5.b). Tiene poca consolidación, posee matriz de cenizas finas medianamente meteorizadas, con fragmentos de escoria gris con baja meteorización, fragmentos de escoria juvenil, líticos andesíticos con oxidación.
<b>Apopa</b>	Depósito de una pequeña erupción estromboliana del volcán de San Salvador, ocurrida cuando el antiguo edificio volcánico tenía forma de un cono previo a la erupción G1. Compuesta por escoria básica subyacente a TB4, con suelo color café poco desarrollado, constituido por lapilli

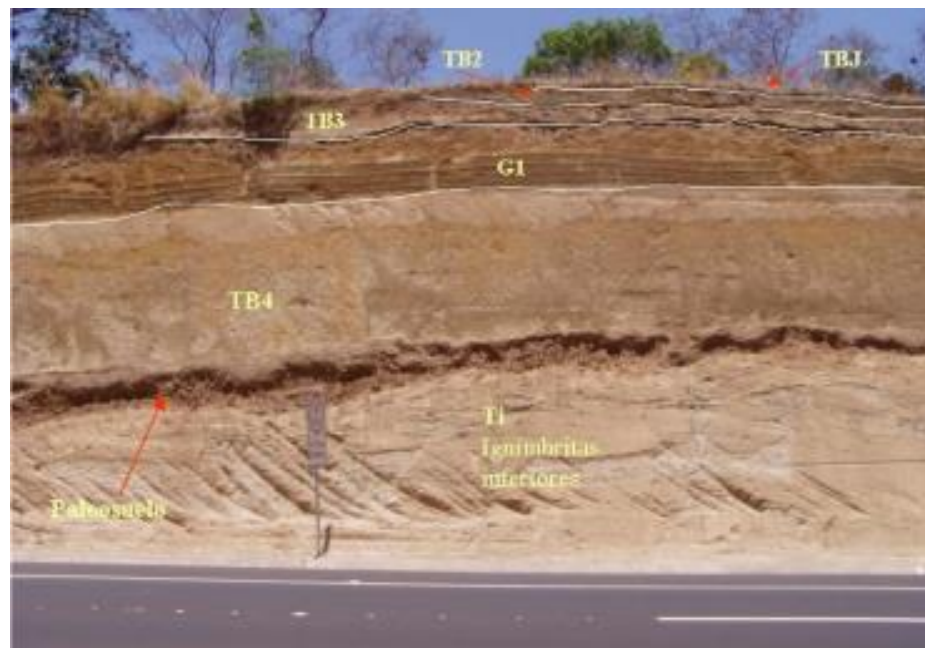
	escoriáceo basáltico, gris oscuro, vesicular y suelto cuando no presenta oxidación, y de color café cuando si presenta oxidación.
<b>Plan de la Laguna (PL)</b>	
Se caracteriza por tener en la base lapilli andesítico, vesicular gris, superpuesto por oleadas, la parte intermedia laminada compuesta por cenizas de caída y oleadas, y el techo formado por lapilli acrecional, se le estima una edad de 820 años A.C	
<b>Picacho</b>	
<b>Lahares</b>	No corresponde a una erupción, sino a un proceso exo-geodinámico de la ladera del Picacho, que corresponde a flujos de escombros y procesos continuos de erosión que tratan de buscar su equilibrio.
<b>Caldera de Ilopango</b>	
<b>Pómez TB4</b>	Es el depósito más antiguo del último ciclo de la caldera de Ilopango, constituido por una capa de pómez color blanco, producto de una erupción pliniana de importante magnitud, se caracteriza por tener una capa de lapilli de pómez con gradación normal. La base la constituye una ceniza de caída fina, blanca de espesor delgado (25 -10 cm), el techo por ceniza fina de casi 1 metro de espesor color amarillento (ver Figura No 2.6). Se caracteriza por la ausencia de aleadas y flujos piroclásticos.
<b>Pómez TB3</b>	Compuesta por pómez y cenizas de caída de granulometría fina, blanca con presencia de lapilli acrecional y flujos piroclásticos basales (ver Figura No 2.6)
<b>Pómez TB2</b>	Con espesores de 1m dentro del radio de 10 km del centro de emisión, compuesto por caída de pómez ligeramente mayor que TB3, mal seleccionado con abundantes minerales oscuros (hornblenda). El techo presenta un paleosuelo de delgado espesor color café oscuro (ver Figura No 2.6).
<b>Tierra Blanca Joven (TBJ)</b>	Representó la última erupción explosiva, de composición dacítica ubicados dentro del lago de Ilopango (ver Figuras No 2.5 y 2.6). Las TBJ son el producto de una erupción ultrapliniana cuyas cenizas de caída cubrieron completamente todo el territorio actual de El Salvador y se extendieron a las fronteras de Guatemala, Honduras, Nicaragua y Costa Rica.

*Fuente: Hernández, W, (2004). "Aspectos Geológicos que influyen en las aguas subterráneas y en la respuesta sísmica del Área Metropolitana de San Salvador".*



**Figura No 2.5. Representación de depósitos intercalados de diferentes erupciones volcánicas: a) Afloramiento de IB en Blvd. Monseñor Romero, mostrando surcos de cultivos subyaciendo a las tefras TBJ. b) Ignimbrita Boquerón IB de color café sobreyaciendo al pómez gris G2 y subyaciendo a TBJ.**

Fuente: Hernández, W, (2004). "Aspectos Geológicos que influyen en las aguas subterráneas y en la respuesta sísmica del Área Metropolitana de San Salvador".



**Figura No 2. 6. Representación de distintos depósitos de Ilopango con la intercalación de G1 del volcán San Salvador en talud de Anillo Periférico, Paquete III.**

Fuente: Hernández, W, (2004). "Características Geotécnicas y vulcanológicas de las Tefras de Tierra Blanca Joven, de Ilopango, El Salvador".

## 2.6 CARACTERÍSTICAS DE LA TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) DEL AMSS

La TBJ y sus diferentes unidades estratigráficas conforman el material geológico de mayor presencia en el AMSS. Particularmente en zonas de gran presión urbana. Por tanto, es necesaria una descripción más detallada de las mismas.

Además, la región con mayor inestabilidad del AMSS corresponde a depósitos de espesor importante de TBJ. Estas tefras tienen origen en la última erupción pliniana de la caldera de Ilopango, en el año 536 DC. Según Dull et al [2010] el volumen de tefra depositada durante el evento eruptivo fue de aproximadamente 84 km<sup>3</sup>. Por lo general los taludes o laderas de TBJ son verticales y sufren una gran cantidad de movimiento de ladera debido a fenómenos climáticos o sísmicos<sup>4</sup>.

La TBJ está conformada por depósitos de caída, surges, depósitos de piedra pómez (vidrio volcánico), cenizas de arena fina, polvo volcánico (tamaño limo) que se acumuló en áreas cercanas a la caldera. Es así como en la cuenca alta del río Las Cañas se pueden encontrar espesores que superan los 50 m.

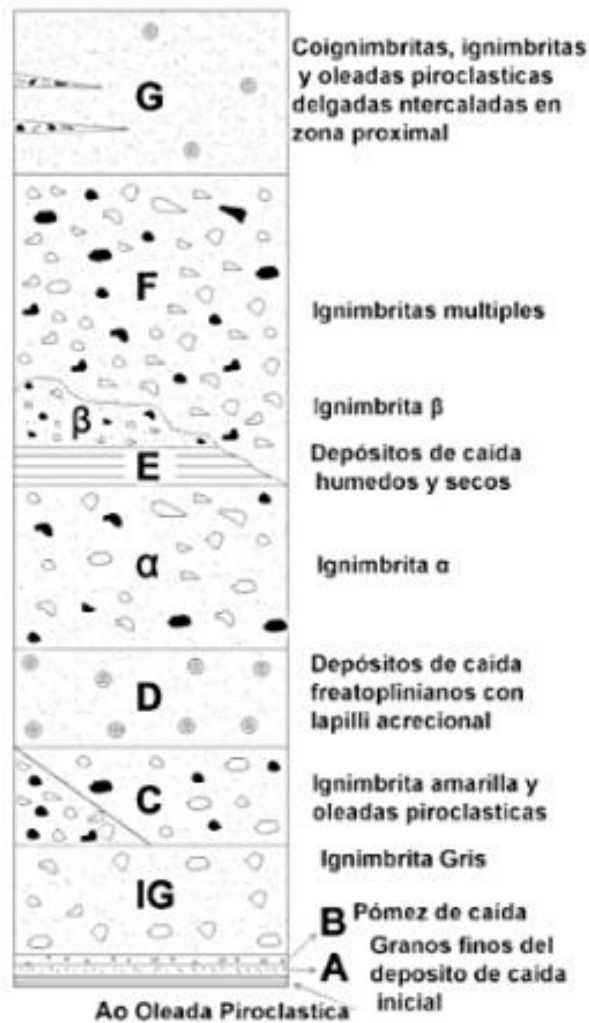
La estratigrafía conocida de los depósitos de TBJ fue realizada inicialmente y de carácter preliminar por Hart y Steen-McIntyre en 1983, donde se consideraron las unidades T1 y T2. Fue hasta 1998, donde Vallance y Houghton, hacen una revisión de campo de estas unidades y las subdividen en 6 unidades.

Actualmente se trabaja con la estratigrafía propuesta por Hernández (2004), donde identificó 8 unidades denominadas de la "A" a la letra "G", entre las que se incluye la Unidad Ignimbrita  $\alpha$  y  $\beta$ . Esta calificación de los productos de la TBJ permite una mejor definición de características de los estratos de TBJ (ver Figura No 2.7)

---

<sup>4</sup> Chávez et al, (2012) "Problemática y conocimiento actual de las tefras tierra blanca joven en el área metropolitana de San Salvador, El Salvador". Revista geológica de América Central

A pesar de que la TBJ es considerada un único material con fines de clasificación general; cada unidad estratigráfica de la TBJ posee diferentes características geológicas y geotécnicas. Dichas propiedades influyen de manera decisiva en el comportamiento mecánico ante la aparición de fenómenos externos tales como (lluvias torrenciales, sismos) o la interacción de las mismas con obras de ingeniería civil. En por esto que se resumen en la Tabla No. 2.2 las propiedades más importantes de las TBJ según la clasificación recientemente mencionada:



**Figura No 2. 7. Perfil estratigráfico de las unidades de Tierra Blanca Joven.**

Fuente: Chávez et al, (2012). "Problemática y conocimiento actual de las tefras tierra blanca joven en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador"

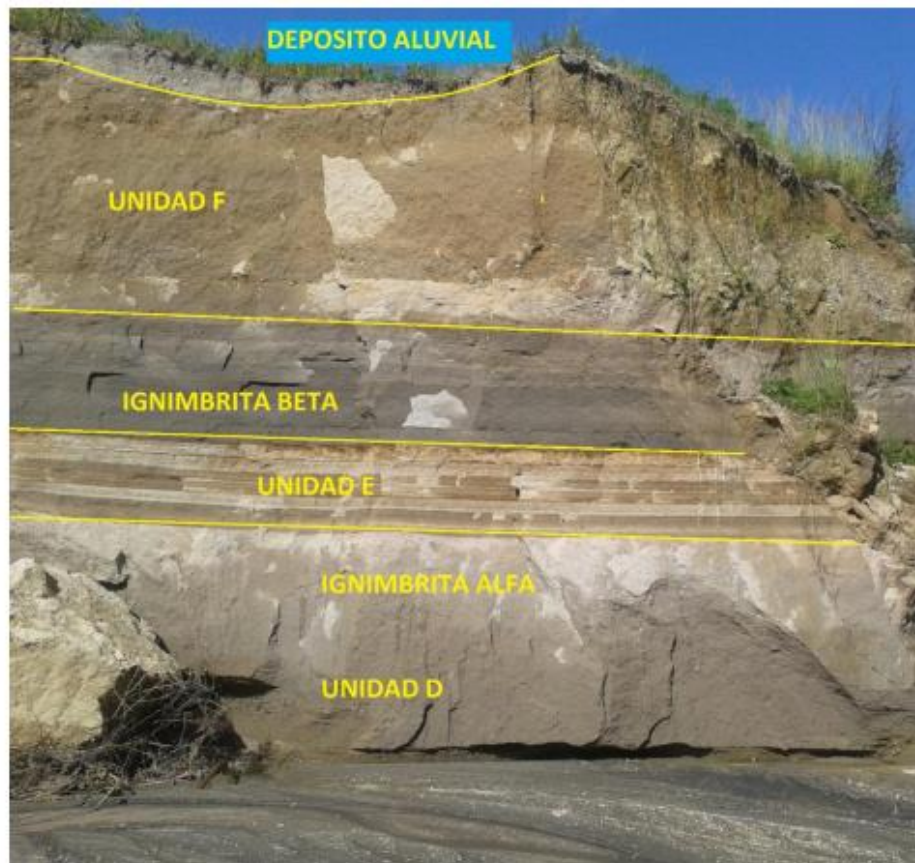


**Tabla No. 2.2 Descripción de las unidades de la Tierra Blanca Joven (TBJ)**

UNIDAD	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	TIPO DE DEPOSITO
<b>Unidad A</b>	Es un depósito fino, granular y localmente disperso de color café. Está compuesto por pómez, y abundantes líticos; ambos con tamaño de arena hasta grava.	Depósito de caída
<b>Unidad B</b>	Cenizas gruesas basales, y lapilli de caída en el techo. Presenta un color amarillento y cementación de óxidos de hierro.	Depósito de caída.
<b>Unidad C</b>	Compuestos por dos flujos piroclásticos; el basal de color gris (Ignimbrita Gris), rico en líticos andesíticos, de cohesión similar al sobreyacente. Este último es el más importante, de color amarillento (Ignimbrita Amarilla), rico en líticos hidrotermalizados.	Depósito de flujos piroclásticos
<b>Unidad D</b>	Es un depósito que se caracteriza por ser rico en cenizas de granos finos. En las facies intermedias y distales es no consolidado, sin embargo, hacia el borde caldérico esta unidad está bastante cementada por minerales sulfatados y silicatados.	Depósito de caída
<b>Ignimbrita Alfa</b>	Ignimbrita masiva, con techo de color rosado tenue y beige en todo el depósito, posee matriz rica encenizas finas, pómez centimétricos y pocos líticos, cementada en la base por sulfatos y silicatos, el resto de la unidad está no consolidada.	Depósito de flujos piroclásticos
<b>Unidad E</b>	Depósitos secos y húmedos alternados. Los depósitos secos son color claro, compuestos por cenizas gruesas con lapilli fino pomítico y líticos andesíticos (gravas y arenas); se caracterizan por ser no consolidados, y bastante deleznable. Los depósitos húmedos están constituidos por cenizas muy finas, bien seleccionadas, color café claro, y café oscuro cuando están húmedos, se caracterizan por estar bastante consolidados y son ricos en fragmentos vítricos y en cristales	Depósitos de caída
<b>Ignimbrita Beta</b>	Está constituida por una Ignimbrita de color café claro, muy compacta, con abundante matriz fina con pómez y lítico en moderada presencia.	Depósitos de flujos piroclásticos
<b>Unidad F</b>	Compuesta por varios flujos piroclásticos masivos, no soldados, de color claro a beige claro, con granulometría muy poco distribuida. Presentan matriz de cenizas gruesas con abundantes fragmentos de pómez y líticos.	Depósitos de flujos piroclásticos
<b>Unidad G</b>	Los flujos son de matriz fina, poco cementados y se caracterizan por tener baja consolidación. Las coignimbritas están formadas por capas delgadas de cenizas finas relativamente bien seleccionadas con moderada presencia de lapilli acrecional, El conjunto da un aspecto estratificado debido a los cambios granulométricos y en la estación lluviosa adoptan tonalidades claras y beige.	Depósitos de caída, flujos y oleadas piroclásticas.

*Fuente: Hernández, W, (2004). "Características Geomecánicas y Vulcanológicas de las Tefras Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango, El Salvador", Tesis M.Sc., Tutor: Miguel Galera, Universidad Politécnica de El Salvador".*

Sin embargo, para una mejor comprensión de la disposición de las unidades estratigráficas en un talud de TBJ, se presenta el siguiente perfil (ver Figura No 2.8). En muchos puntos del AMSS la Unidad G no se encuentra presente, debido a procesos erosivos que han ido degradando el estrato de material, con el pasar del tiempo.



**Figura No. 2.8. Perfil estratigráfico de TBJ de un talud constituido representativo Talud ubicado en la quebrada El Arenal Seco, Ilopango.**

Fuente: Gómez (2018). Universidad de El Salvador "Obtención de la tasa de erosión en taludes conformados por Tierra Blanca Joven (TBJ) en la zona Oriente del AMSS". P-24

## 2.7 COMPORTAMIENTO DE LA TBJ ANTE FACTORES EXTERNOS

De acuerdo a Hernández [2004]; Las observaciones de campo realizadas en varios taludes en ignimbritas del AMSS, muestran el apareamiento de fisuras que progresan a grietas, que aparecen de manera regular en los taludes.

La naturaleza isotrópica de los depósitos de flujos piroclásticos permite que el intemperismo físico opere en estos materiales cuando en los taludes incide la acción solar. Esas discontinuidades surgen lentamente debido a varios factores como la variación diurna de la temperatura, a la acción de las lluvias, emplazamiento y desarrollo de raíces en su interior, y a las sacudidas producidas por los sismos. Estos factores que se describen a continuación operan conjuntamente para el desarrollo de las grietas.

### **Factores que afectan el comportamiento de las TBJ:**

**Cambios diarios de temperatura:** Los cambios de temperatura que experimenta el ciclo diurno, causan efectos térmicos en los depósitos de flujos piroclásticos expuestos a la actividad solar. Estos cambios de temperatura producen contracciones y expansiones en la cara y en la cabecera del talud, llegando a producir un debilitamiento de la sección más externa del mismo, de la que derivan la formación de fisuras y grietas. En la estación seca, abril es el mes más caliente (31.4°C máx.- 19.5°C min.) y diciembre el menos caliente (27.2 °C máx. – 16.1°C min.). Durante la estación lluviosa, el mes de mayo es el más caliente (29.1 °C máx.- 20.5°C min.) y septiembre el menos caliente (26.4 °C max.-19.8 °C min.). Estos registros de temperatura indican que durante la época seca los suelos se enfrían y se calientan más que en la época lluviosa [Zimmerman, R. 2004].

**Sismos:** El paso de una onda sísmica de un medio más duro a otro sin consolidación, como es el caso de los depósitos de TBJ, produce una disminución de la velocidad de la onda al pasar por esos materiales, tal cambio de velocidad

es acompañado por una amplificación de la onda sísmica en dichos materiales; teniendo como resultado vibraciones del suelo más fuertes, contribuyendo a la abertura de las discontinuidades.

Cuando un sismo es fuerte puede producir vuelco de la porción más externa de la cara del talud y una cara nueva aparece en la que se repetirá este proceso. La influencia de los terremotos de enero y febrero de 2001 en El Salvador produjeron una gran cantidad de derrumbes y deslizamientos de TBJ en el AMSS [Bommer, J. et al. 1998, 2001; Bommer, J. y Rodríguez, C. 2003; Rolo et al. 2004].

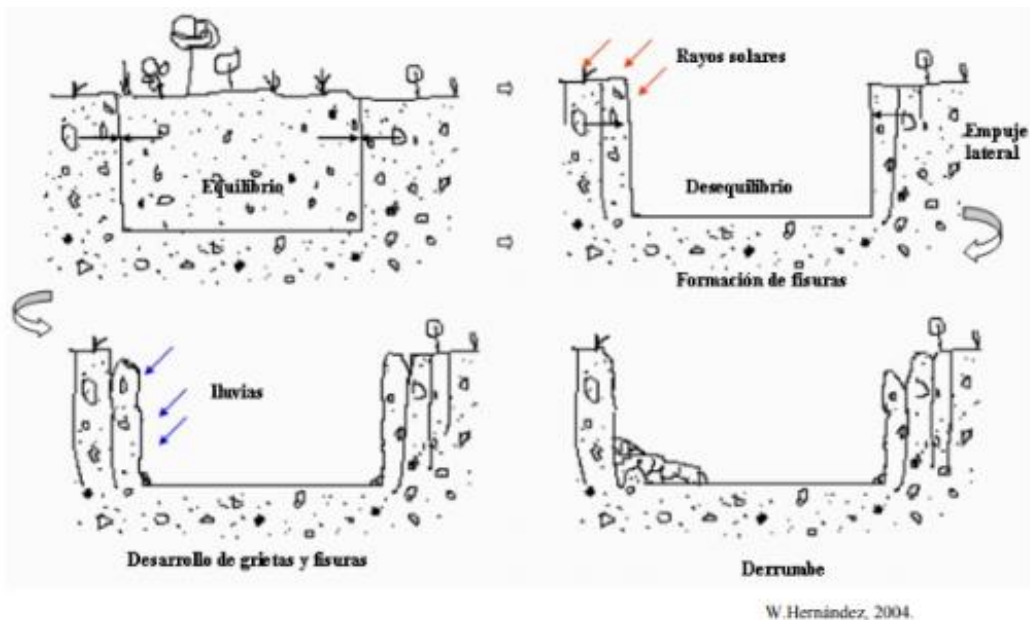
**Lluvias.** El largo período de la estación lluviosa y las altas precipitaciones en la AMSS a que están expuestos los materiales ignimbríticos, favorecen la infiltración y el proceso de erosión. El agua dentro de las grietas produce un aumento de la presión de poro, erosión diferencial tubificación y ensanchamientos de las grietas. En estas condiciones y ante la presencia de una lluvia torrencial, la sección en forma de cuña formada por la discontinuidad se cae al aumentar el esfuerzo cortante por el aumento de peso del agua intersticial, venciendo así las fuerzas resistentes. Este tipo de derrumbes es muy frecuente en las ignimbritas TBJ en el AMSS durante la estación lluviosa.

**Vegetación.** Las raíces se desarrollan más fácilmente cuando penetran los taludes a lo largo de sus fisuras y grietas de los taludes. Cuando las raíces se tornan más gruesas producen presión lateral en el interior de las discontinuidades, siendo la porción más externa la que se separa formando grietas abiertas e inestabilizando el talud. El engrosamiento de las raíces es mayor durante la estación lluviosa que en la seca y también es cuando la humedad es mayor en TBJ, por eso, en la estación lluviosa son más numerosos los derrumbes en este tipo de suelos.

En la Figura No 2.9 se muestra esquemáticamente el progreso del ataque de estos factores.

**Antropogénicos.** A lo anterior, se debe considerar que el AMSS se constituye como la metrópoli salvadoreña debido a la alta densidad poblacional que en ella se registra, según el PLAMATRANSS; en algunos municipios se destaca la presión de los diferentes usos frente a sus áreas verdes y su respectiva reserva ecológica.

En otros, especialmente San Salvador, Soyapango, Mejicanos, Apopa, Santa Tecla, Antiguo Cuscatlán y Ciudad Delgado la presión del uso habitacional es representativa; en conjunto cubren el 86% de dicho uso.

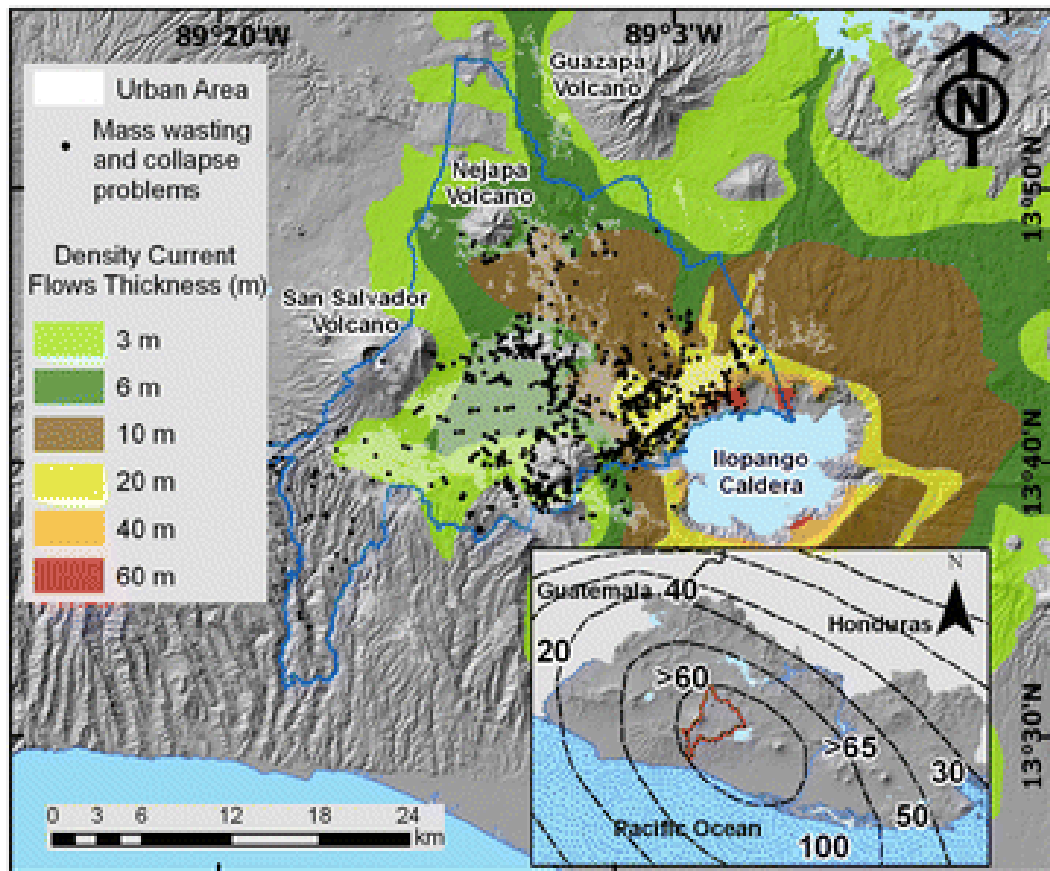


**Figura No. 2.9. Intemperismo, Ruptura y derrumbe de ignimbritas.**

Fuente: Hernández, W, (2004). "Características Geomecánicas y Vulcanológicas de las Tefras Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango, El Salvador", Tesis MSc., Tutor: Miguel Galera, Universidad Politécnica de El Salvador".

Chávez [2012] añade que la mayor parte de las tuberías de agua potable, servidas y pluviales se encuentran en mal estado y cuando fallan es posible esperar el colapso del suelo y estructuras sobre el mismo; refiérase a Figura 2.10 en que se presentan superpuestas las áreas de concentración urbana del AMSS

y los sitios en que se han registrado problemas de erosión y colapso. Šebesta y Chávez [2010] afirman que una problemática actual es la urbanización en las zonas de *badlands*, donde realizar rellenos es un procedimiento normal, que al presentarse un evento sísmico, se han presentado asentamientos pronunciados en las zonas de relleno de TBJ, dándose daños estructurales graves, por tanto, a parte de los fenómenos naturales, los cambios antropogénicos como la urbanización, deforestación, extracción de suelos, son los principales controles externos de las altas tasas de erosión, y afecta a la infraestructura civil cercana a ríos y quebradas.



**Figura No. 2.10** Detalle de concentraciones urbanas (Sombreado blanco), y los sitios donde se han presentado problemas de erosión y colapso (puntos negros). Recuadro presenta líneas con iguales espesores de piroclastos en el territorio nacional.

Fuente: Chavez (2016) "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

**Erosión.** Suarez, [1980] define la erosión como un proceso de arrastre del suelo por acción del agua o del viento; o como un proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas de suelo causado por el agua y el viento.

Uno de los catalizadores más importantes de la erosión es la escorrentía superficial y subterránea, de acuerdo a Šebesta et al. [2010], la erosión puede catalogarse en alguna de las siguientes maneras:

- **Retrograda:** se presenta en la cabecera de drenajes debido al aumento de la pendiente, o si hay un cambio en la relación carga-caudal, acelerando la corriente y como resultado, la erosión se propaga progresivamente aguas arriba.
- **Planar:** proceso que impacta las laderas sin vegetación y muy frecuentemente inicia los flujos del tipo *flowage*.
- **Subterránea:** Este mecanismo se da con la infiltración del agua al suelo, disolviendo progresivamente los minerales solubles, o se lleva las partículas más finas del sedimento fuera del escarpe, se producen cavernas pequeñas y después más grandes en el suelo. El resultado de éste proceso es la degradación de la superficie, el colapso o la erosión superficial.
- **Vertical:** profundiza los lechos de cañones y quebradas.
- **Lateral:** amplía las quebradas y cañones.

**Colapso.** El colapso de un suelo se caracteriza por la brusca reducción de volumen ocasionado por el aumento de humedad. Molina et al. [2009] expresa que, el colapso se debe a que el humedecimiento de los suelos provoca la destrucción de las fuerzas estabilizadoras, con una disminución de su resistencia, lo que genera un desplazamiento relativo entre las partículas, de tal forma que estas pasan a ocupar los espacios vacíos de la estructura de suelo lo que da como resultado la reducción brusca de los vacíos. La magnitud de la deformación

de los suelos depende principalmente de su grado de saturación, entre otros factores.

**Licuefacción.** La licuefacción de los suelos es un fenómeno en el cual los terrenos, a causa de saturación de agua pierden firmeza y fluyen como resultado de los esfuerzos provocados en ellos debido a temblores. La licuefacción es una causa de mayor destrucción relacionada con terremotos, más aún que por la acción directa de las ondas sobre los edificios. En otras palabras, la licuefacción es capaz de desplazar, hundir, o incluso volcar infraestructura.

Se habla de la licuefacción de un suelo o también llamada en algunos países licuación de suelos cuando el terreno pierde su resistencia al corte y por tanto se comporta como un líquido debido a que se desarrollan presiones intersticiales de forma rápida (sin drenaje) como consecuencia de un sismo o terremoto. El fenómeno de la licuefacción en geotecnia afecta, en general, a cimentaciones y taludes.

Generalmente los suelos potencialmente más licuables son las arenas finas y poco densas y los limos y arenas mal graduados, aunque también se han dado casos en arenas gruesas y gravas y en turbas o suelos altamente orgánicos.

De acuerdo con Houston [2001] los suelos que exhiben un importante potencial de colapso en condición seca son más susceptibles a asentamientos dinámicos, movimientos laterales, y licuefacción, que otros suelos cuando se eleva el nivel freático. Esto se debe a que son sumamente contractivos ante esfuerzos cortantes. La detección de la propensión a la licuación y a los asentamientos dinámicos puede ser encubierta por una alta resistencia de los suelos en condición seca producto de la cementación, y presión negativa de los poros, que usualmente resulta en altos valores de N para SPT.

Aunque cualquier suelo puede compactarse una vez se humedezca, dependiendo de la densidad, del contenido de agua, y el esfuerzo aplicado, los



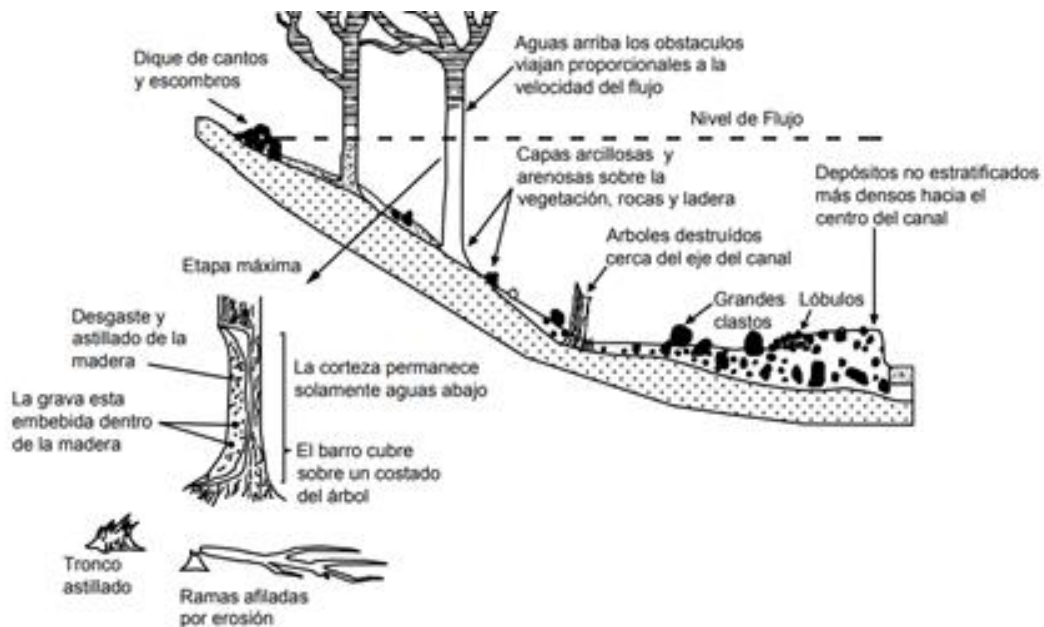
suelos que exhiben importantes reducciones de volumen (*colapso*) ante la humedad generalmente son *limos no plásticos y arenas limosas*, - clasificación que se atribuye a los suelos objeto de este trabajo de investigación: TBJ – En general no puede asumirse que habrá suficientes finos en los suelos colapsables para hacer que estos suelos no sean licuables si están saturados, ya sea en condición natural o compactada. Adicionalmente, se ha demostrado que los suelos metaestables colapsan bajo cargas dinámicas, si la fuerza de cohesión entre partículas es baja.

### **Flujos.**

Los flujos son deslizamientos que adquieren grandes velocidades y que se comportan como fluidos viscosos en movimiento. Las masas se comportan como un fluido, pero su comportamiento es diferente al de los fluidos convencionales como el agua. Los deslizamientos tipo flujo son fenómenos muy complejos que involucran grandes volúmenes de roca, residuos y suelo, (ver Figura No 2.11).

Estos fenómenos presentan diferentes tipos de movimiento inicial seguidos de un movimiento de flujo de fragmentos de roca o residuos con una movilidad anormal [Hungar 2001].

En un flujo ocurren movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre un cauce o canal. La ocurrencia de flujos generalmente está relacionada con la saturación de los materiales sub-superficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente y la saturación conduce a la formación de un flujo. Generalmente si los flujos son saturados, la saturación no es pre-requisito para su ocurrencia y en ocasiones, se presentan flujos de materiales secos.



**Figura No. 2.11 Ilustración de la United States Geology Services de un perfil típico de rastro (o evidencia) de paso de flujo de escombros.**

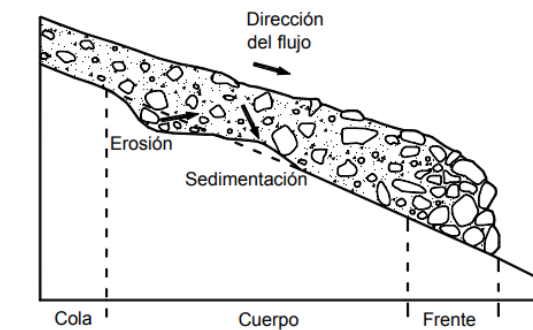
Fuente: Suarez (2013) "Deslizamientos: Análisis Geotécnico".

Generalmente, los flujos se originan en otros tipos de deslizamiento, los cuales, al desintegrarse la masa deslizada, forman el flujo a lo largo de un canal. Por lo general, al disminuirse la pendiente o al ampliarse el ancho del canal, los sedimentos del flujo se depositan formando abanicos.

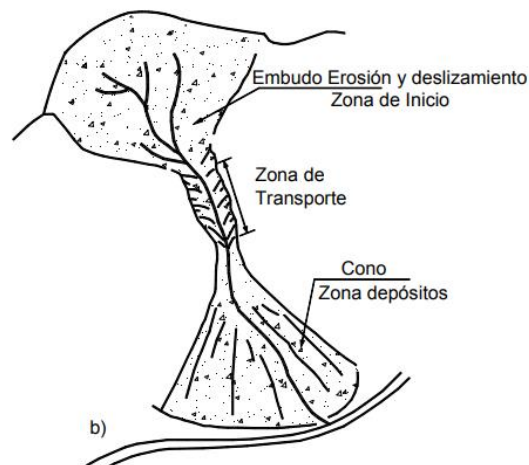
De acuerdo con un criterio físico en que se toma en cuenta las condiciones de viscosidad y turbulencia del flujo, se utilizan los nombres de "flujos de lodo", "flujos hiperconcentrados" y "flujos de residuos".

El perfil de un flujo en movimiento se divide básicamente en tres partes, el "frente" donde se concentran los materiales más gruesos, el "cuerpo" y la "cola" donde se acumula parte del agua libre de sedimentos y la mezcla de agua con sedimentos finos. El perfil (refiérase a Figura No 2.12 a) puede tener varios pulsos con varios frentes intermedios. En planta (refiérase a Figura No 2.12b) el flujo muestra una zona de iniciación que forma un embudo, una zona de transición o

zona de tránsito de flujo y una zona de deposición en abanico [Bateman, 2006]. En los flujos hay un origen de los sólidos, una distancia de recorrido y una zona de deposición [Iverson, 1997]. El flujo pasa de una zona de alta pendiente (más de 40°) a una zona de deposición menor o igual a 3°.



a)



b)

**Figura No. 2.12 Ilustraciones de la United States Geology Services, a) Perfil de tipo de flujo. b) Disposición de las zonas que componen un flujo en Planta.**

Fuente: Suarez (2013) "Deslizamientos: Análisis Geotécnico".

En los flujos de residuos pueden ocurrir, además, colisiones entre los granos. La combinación de fricción entre los granos, colisiones entre las partículas y el flujo de fluido viscoso, puede transferir un momentum significativo en forma simultánea. La masa viscosa se mueve en pulsos u ondas en las cuales el frente de la onda transporta los materiales más gruesos y el cuerpo del flujo los materiales más finos, prácticamente licuados, por la presión de poros alta. En el frente de los pulsos predominan las fuerzas de los sólidos y en el cuerpo, las fuerzas del fluido [Iverson, 1997].

El factor que más se tiene en cuenta al describir el comportamiento de los flujos es el porcentaje de concentración de sedimentos, el cual define el modelo de flujo. Igualmente, la proporción de sedimentos finos (arcillas y limos) afecta en forma determinante, el tipo de flujo.

## **2.8 COLAPSABILIDAD DE SUELOS**

### **DEFINICIÓN DE COLAPSABILIDAD**

El colapso se define como la disminución súbita del volumen de la masa de la estructura del suelo al entrar en contacto con el agua y/o al actuar sobre ello una carga adicional.

### **SUELOS COLAPSABLES**

Los suelos colapsables o metaestables, son suelos no saturados que sufren un gran cambio de volumen al saturarse y puede o no ser el resultado de la aplicación de carga adicional.

La mayoría de los suelos colapsables de origen natural son *eólicos*, es decir, arenas o limos depositados por el viento, como los loess, las playas eólicas y los depósitos de polvo volcánico. Los depósitos tienen relaciones de vacíos altas y pesos específicos bajos y sin cohesión o con poca cohesión. Los depósitos de loess tienen partículas de tamaño de limo. La cohesión en los loess puede ser el resultado de recubrimientos de arcilla que rodean a las partículas de tamaño de limo. Los recubrimientos mantienen a las partículas en una condición muy estable en un estado no saturado. La cohesión también puede ser el resultado de la presencia de precipitados químicos lixiviados por el agua de lluvia. Cuando el suelo se satura, los materiales cementantes pierden su resistencia y experimentan un colapso estructural<sup>5</sup>.

### **Causantes del fenómeno de colapsabilidad**

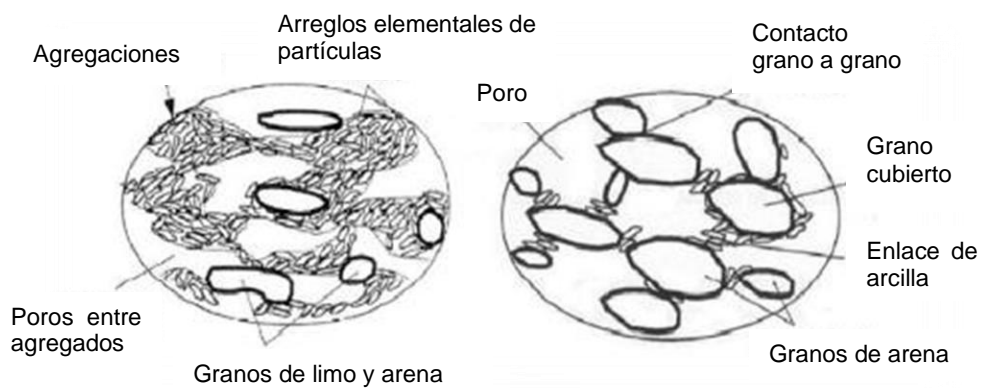
Las dos condiciones típicas para que el fenómeno de colapso se produzca son:

- **El incremento en la humedad natural de la masa de suelo**

---

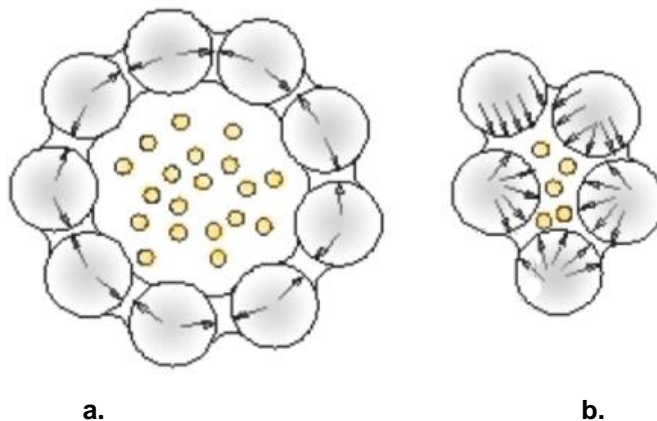
<sup>5</sup> Das, Braja M, (7ma ed.). (2011). "*Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*"; (J. L. Cárdenas, Trans.). Cengage Learning.

Una de las características más importantes de los suelos colapsables es su relación de vacíos, las partículas se encuentran unidas entre sí por puentes de materiales cementantes (ver Figura No 2.13 y 2.14) que proporcionan cierta cohesión estructural entre las partículas y que en presencia de agua estos puentes se disuelven provocando que las partículas se deslicen o rueden haciendo que se reacomoden.



**Figura No 2.13. Representación de la estructura típica de los suelos colapsables**

Fuente: Rodríguez, Oscar E. et al (2014). "Revisión teórica de evaluación del potencial de colapso en las dunitas de Medellín".

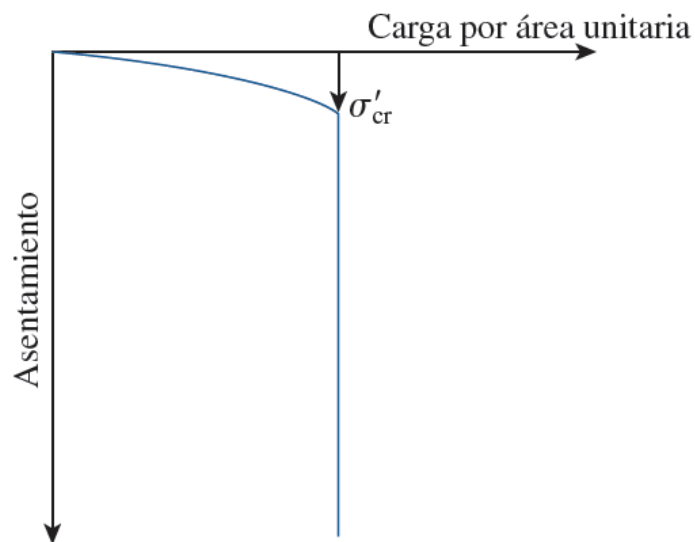


**Figura No 2.14. Representación de la estructura de un suelo a) antes del colapso, b) después del colapso**

Fuente: Valencia González, Y. et al (2015). "Evaluación por diferentes métodos del potencial de colapso de algunos suelos residuales en los Valles de Aburra y San Nicolás"

- **Al alcanzar un valor de carga crítica**

Otra de las circunstancias que deben ser concurrentes es la de una carga, y que por lo general debe ser mayor de la que previamente actúa sobre la masa de suelo. Este tipo de falla se presenta en suelos que poseen altos contenidos de humedad, y además no es susceptible a sufrir cambios. En la Figura No 2.15 puede observarse el comportamiento típico de este tipo de suelos, en los cuales el asentamiento es directamente proporcional al esfuerzo aplicado, hasta que se alcanza el valor de esfuerzo crítico ( $\sigma'_{cr}$ ), para el cual se presenta la rotura de la estructura intergranular del suelo y por tanto un asentamiento de gran magnitud. Este tipo de Gráficos se obtienen mediante ensayos con placa de carga en los cuales se aplica al suelo una carga estática, incrementando de forma gradual, haciendo uso de la placa de acero, Aragón et al. [1999].



**Figura No. 2.15. Prueba de carga en un suelo que muestra la relación carga por área unitaria contra asentamiento. Se observa que la relación carga- asentamiento es esencialmente lineal hasta una cierta presión crítica donde se tiene la ruptura y un asentamiento grande de la estructura del suelo**

Fuente: Das, Braja M, (7ma ed.). "Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones" pág. 692

Otras causas que pueden desencadenar el colapso son: tuberías rotas de agua, drenajes con fugas, drenaje del agua de depósitos y albercas, incremento lento del nivel freático.

### **Características físicas de los Suelos Colapsables**

Los suelos colapsables presentan una serie de características comunes tales como<sup>6</sup>:

- **Estructura macroporosa**, con índice de vacíos ( $e$ ), entre relativamente alto, a muy alto.
- **Granulometría predominantemente fina**, con predominio de fracciones de limos y de arcilla. El tamaño de los granos es generalmente poco distribuido y con los granos más grandes escasamente meteorizados. La mayoría de las veces, la cantidad de la fracción arcilla es relativamente escasa, sin embargo, tiene una influencia importante en el comportamiento mecánico de la estructura intergranular.
- **Estructura mal acomodada**, con partículas de mayor tamaño separadas por espacios abiertos, y unidas entre sí por acumulaciones o "puentes" de material predominantemente arcilloso u óxidos de cuarzo. En muchos casos existen cristales de sales solubles insertados en tales puentes o uniones arcillosas.

## **2.9 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS DEL COLAPSO**

De acuerdo a las normas para el estudio de propiedades de estos suelos, es importante el cuantificar el colapso; de manera que se necesitan de parámetros que puedan obtenerse a través de la interacción de propiedades geológicas de estos suelos que sean de fácil obtención y que impliquen dependencia entre

---

<sup>6</sup> Dr. Ing. Emilio R Redolfi, (2007). "Suelos colapsables". Córdoba. Argentina



variables de características que sean extensivas en tiempo en los suelos en estudio. Dentro de las cuales se definen:

### Índice de Colapso

El índice de colapso ( $I_e$ ), es el valor del colapso determinado, para un esfuerzo vertical de 200 kPa, que se presenta como el porcentaje de disminución en relación a la altura inicial que experimenta una muestra de suelo al ser inundada, una vez alcanzado el equilibrio bajo la acción de presión vertical a la cual está siendo evaluada, con respecto a la altura de la probeta en el momento de proceder a la inundación (ver ecuación No 2.1 y 2.2). El Índice de colapso,  $I_e$ , se usa para medir el índice básico de la propiedad del suelo, y en él no se intenta reproducir ninguna condición particular de campo, ni la carga colocada a la estructura del suelo, y su clasificación se presenta a continuación (ver Tabla No. 2.4):

**Tabla N 2.4. Clasificación de Índice de Colapso**

Grado de Colapso	Índice de Colapso $I_e$ %
Ninguno	0
Ligero	0.1 a 2.0
Moderado	2.1 a 6.0
Moderadamente severo	6.1 a 10.0
Severo	>10

*Fuente: ASTM D 5333-03. "Método de prueba estándar para medir el potencial de colapso de los suelos"*

### Grado de Colapso

Clasificación cualitativa de la propensión de un suelo a experimentar el Colapso. Tomando en cuenta el correspondiente valor del **Índice de colapso** obtenido durante la aplicación del método de ensayo de colapso. De acuerdo al criterio establecido en la Tabla de norma ASTM D5333-03, presentada en el apartado anterior.

## Potencial de Colapso

El potencial de colapso ( $I_c$ ) es la magnitud de colapso relativa del suelo, determinado para cualquier valor de presión vertical, que actúa sobre el mismo. Se determina; en medición directa a través de instrumentos de laboratorio por medio de la ecuación No 2.1:

$$I_c = \frac{d_f - d_i}{h_o} \times 100 \quad \text{Ecuación No 2.1}$$

Dónde:

$I_c$  = potencial de colapso (%)

$d_i$  = lectura del dial con el esfuerzo vertical predeterminado aplicado antes de la saturación (mm)

$d_f$  = lectura del dial bajo el esfuerzo vertical aplicado después de la saturación (mm)

$h_o$  = altura inicial de la muestra (mm)

También se puede evaluar en términos de relación de vacíos (Ecuación No 2.2)

$$I_c = \frac{\Delta_e}{1 + e_o} \times 100 \quad \text{Ecuación No 2.2}$$

Dónde:

$\Delta_e$  = cambio de relación de vacíos bajo el antes y después de la inundación.

$e_o$  = relación de vacío inicial

El potencial de colapso se usa para determinar el asentamiento que podría ocurrir en una capa de suelo en un sitio particular. El asentamiento de la capa de suelo, para una presión vertical aplicada es obtenido de acuerdo a la ecuación No 2.3:

$$\delta h = I_c \times \frac{H}{100} \quad \text{Ecuación No 2.3}$$

Dónde:

$H$  = espesor del estrato en situ (m o cm)

## 2.10 CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES FÍSICA QUE PERMITEN IDENTIFICAR LOS SUELOS COLAPSABLES

Algunos investigadores han propuesto diversos métodos para evaluar los parámetros físicos de los suelos colapsables para su identificación. Dado que los materiales que se estudiarán en esta investigación son suelos limo arenoso y/o arenas limosas los criterios que más se adaptan a estos se presentan a continuación (ver Tabla No. 2.5):

**Tabla No. 2.5. Criterios reportados para identificación de suelos colapsables**

Investigador	Año	Criterios
<b>Clevenger</b>	1958	Si el peso seco es menor que 80 lb/pie <sup>3</sup> (=12.6 kN/m <sup>3</sup> ), el asentamiento será grande; si el peso específico seco es mayor que 90 lb/pie <sup>3</sup> (= 14.1 kg/m <sup>3</sup> ); el asentamiento será pequeño. Nota: Asentamiento es sinónimo de colapso para este autor
<b>Soviet Building Code</b>	1962	$L = \frac{e_o - e_1}{1 + e_o}$ Dónde: $e_o$ = Relación de vacíos natural, y $e_1$ = relación de vacíos en el límite líquido. Para un grado de saturación menor al 60%, si $L > -0.1$ , se trata de un suelo colapsable.
<b>Benites</b>	1968	Una prueba de dispersión en que 2g de suelo se vierten en 12 ml de agua destilada y el espécimen se cronometra hasta que se dispersa; tiempos de dispersión de 20 a 30 segundos fueron obtenidos para suelos colapsables en Arizona.

Investigador	Año	Criterios												
Handy	1973	Loes de lowa con contenido de arcilla (<0.002 mm) <16%: Alta probabilidad de colapso 16%-24%: probabilidad de colapso 24%-32%: menos del 50% de probabilidad de colapso >32%: usualmente seguro contra el colapso												
Clemence y Finbarr	1981	Resume la correlación de Jennings y Knight (1975): Relación del potencial de colapso para la severidad de problema de cimentación. <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Potencial de colapso <math>C_p</math></th> <th>Severidad del problema</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-1</td> <td>Sin Problema</td> </tr> <tr> <td>1-5</td> <td>Problema moderado</td> </tr> <tr> <td>5-10</td> <td>Problema</td> </tr> <tr> <td>10-20</td> <td>Problema severo</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>Problema muy severo</td> </tr> </tbody> </table>	Potencial de colapso $C_p$	Severidad del problema	0-1	Sin Problema	1-5	Problema moderado	5-10	Problema	10-20	Problema severo	20	Problema muy severo
Potencial de colapso $C_p$	Severidad del problema													
0-1	Sin Problema													
1-5	Problema moderado													
5-10	Problema													
10-20	Problema severo													
20	Problema muy severo													

Fuente: Das, Braja M, (7ma ed.). "Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones" pág. 689

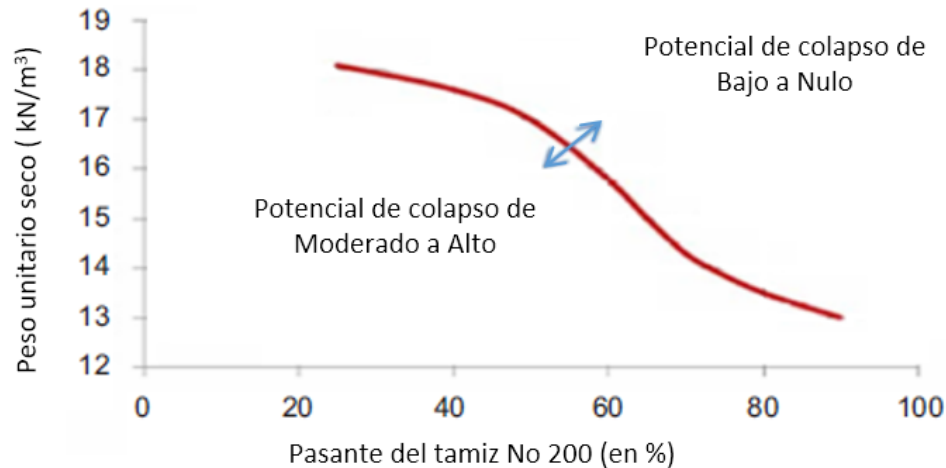
Además, Gonzáles de Vallejo [2002] propuso la correlación entre el peso específico seco aparente del suelo y los ensayos de colapso para caracterizar la peligrosidad que presentan los suelos limo arenosos (ver Tabla No. 2.6). También en el Gráfico No 2.1 se muestra la relación entre el peso unitario seco y el porcentaje que pasa el tamiz No 200, para caracterizar el potencial de colapso de los suelos.

**Tabla No. 2.6. Relación entre densidad seca y grado y potencial de colapso**

Grado de colapso	Peso específico seco (T/m <sup>3</sup> )	Potencial de Colapso (%)
Bajo	>1.4	<0.25
Bajo a medio	1.2-1.4	0.25-1.0
Medio a alto	1.0-1.2	1.0-5.0
alto a muy alto	<1.0	>5.0

Fuente: Luis I. González de Vallejo. (2002). "Ingeniería Geológica".

**Gráfico No 2.1 Relación entre el peso unitario seco y el porcentaje que pasa el tamiz No 200, para caracterizar el potencial de colapso de los suelos (Moghadam et al, 2006)**



*Fuente: Behzad Kalantari. (2013). Foundations on collapsible soils: a review. Forensic Engineering, 166, 57 - 63. 04/07/2012, De ICE Publishing Base de datos.*

## **2.11 DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE PARÁMETROS DE COLAPSO EN SUELOS.**

Definidos los parámetros concernientes a la cuantificación y calificación de la colapsabilidad de los suelos, se explican los métodos a utilizar para determinar estos parámetros. En esta investigación se adoptará el procedimiento de la norma ASTM D 5333-03 «MÉTODO ESTÁNDAR PARA LA MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE COLAPSO DE LOS SUELOS», misma que Figura como ANEXO C de éste documento.

Los parámetros identificados provienen principalmente de la simulación de los ensayos edométricos con inundación a esfuerzo vertical constante, con enfoque a caracterizar el comportamiento de los diferentes materiales frente a procesos de reducción de la succión (saturación) a diferentes esfuerzos verticales, especialmente el potencial de colapso de los limos en condiciones naturales y el contraste con el de los limos compactados.

## 2.12 APLICACIÓN INGENIERIL DE LOS PARÁMETROS DE COLAPSABILIDAD

Se sabe que el suelo es uno de los materiales más antiguos y versátil en la construcción, además de su complejo comportamiento ya sea por causas intrínsecas tales como su naturaleza, estructura, características físicas y mecánicas, o por factores externos que actúan sobre los suelos.

En el caso de los suelos colapsables, es importante conocer los parámetros que definan esta característica para identificar el comportamiento estructural aproximado que estos suelos podrían presentar, y que, al predecirlo, se puedan evaluar y sugerir los tratamientos o soluciones ingenieriles para mejorar el suelo y que sea apto para las obras que se proyecten sobre él.

Los estudios recomendados para una obra civil dependerán de su ubicación, magnitud, tipo e importancia, teniendo que tomar en cuenta que toda obra civil se apoya en suelo o en roca, vuelve imprescindible que se conozca las propiedades geológicas, litológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas, geodinámicas, estructurales y geotécnicas que podrían llegar a afectar la obra. El conocer estas propiedades es el punto de partida para proyectar una obra civil. [Chávez et al, 2012].

De acuerdo a Redolfi [2007], la primera situación que debe analizarse cuando se diseñan cimentaciones en suelos susceptibles al colapso, es la probabilidad que el agente desencadenante del fenómeno, el agua, pueda o no introducirse en el terreno y por ende *sensibilizar* al suelo en donde se apoyarán las estructuras. Por definición, sin la presencia del agua, el suelo no colapsa. Esta situación es significativa, puesto que pueden existir numerosos casos en donde la probabilidad que el agua se infiltre en el suelo sea lo suficientemente baja como para analizar la posibilidad de fundar la estructura, considerando el comportamiento del suelo en su estado natural. Por lo tanto, cuando se hable de suelos potencialmente colapsables por humedecimiento, no debe pensarse

unívocamente en las soluciones ingenieriles que se utilizan en suelos colapsables.

Se presenta a continuación, una recopilación de distintas soluciones ingenieriles aplicables en suelos colapsables por humedecimiento, ante la posibilidad que se produzca el fenómeno. El objeto de ellas es prevenir las fallas en que están expuestas las estructuras construidas sobre estratos de suelos colapsables.

De las soluciones con las que se dispone, se pueden clasificar según:

- **Tratamiento o mejoramiento del suelo, anulando la susceptibilidad al colapso.**

El objetivo principal de estas soluciones es eliminar o disminuir apreciablemente la susceptibilidad al colapso del suelo, bien disminuyendo la porosidad del suelo (compactación) o bien aumentando la resistencia estructural entre las partículas del suelo (métodos físico-químicos). A continuación, se presenta una serie de métodos de mejoramiento de suelos problemáticos:

- Mejoramiento de suelos por compactación.
- Mejoramiento de suelos por modificación de su granulometría.
- Mejoramiento de las propiedades de los suelos, por la creación de nuevos contactos cohesivos.
- Sustitución de suelos.
- Incorporación de elementos resistentes a la tracción dentro del suelo.
- Uso de Geotextiles.
- Drenajes adecuados
- Protección de taludes y terraplenes.

- **Diseño de elementos constructivos que disminuyan la posibilidad de iniciar el colapso.**

Se propone la adopción de medidas constructivas tendientes a aislar el agua, de manera de evitar o disminuir la presencia de condiciones favorables al colapso, admitiendo no obstante ciertos riesgos. Anteriormente, en el apartado 2.8 (Causantes del fenómeno de colapsabilidad) de este capítulo, se menciona que los humedecimientos del suelo pueden ser por rotura de conexiones hidráulicas, infiltraciones de agua lluvia, ascenso del nivel freático, etcétera. Como puede inferirse, parte de las razones de la presencia del agua está supeditada a un adecuado proceso constructivo de la red de abastecimiento de aguas, se pueden sugerir medidas de protección a las obras como:

- Diseño de terracería adecuada para evitar las acumulaciones de agua cerca de las fundaciones, y que cualquier pérdida de agua sea evacuada con rapidez.
- Canalización de agua lluvia de áreas tributarias hacia fuera de la construcción.
- Instalación de membranas impermeables o pavimentación de las superficies circundantes a la obra.
- Un adecuado sistema de evacuación de aguas servidas, a fin de detectar posibles pérdidas.

Algunas de las medidas, conllevan implícitamente a dar mantenimiento periódico durante la vida útil del proyecto, de manera que sean minimizados las pérdidas o daños o en su defecto, ser oportunamente identificados y subsanados.



- **Diseño de estructuras (o fundaciones de las mismas) insensibles a los asentamientos por colapso.**

Se abordan las soluciones tradicionales por medio de fundaciones profundas, como el diseño de estructuras con fundaciones superficiales insensibles a los asentamientos diferenciales provocados por el colapso.

Las fundaciones superficiales sobre suelos colapsables pueden ser divididas en dos grupos:

- **Fundaciones Rígidas**: utilizadas principalmente en estructuras livianas y con cargas puntuales, por ejemplo, torres de líneas de alta tensión, columnas de naves industriales o depósitos. En general, este tipo de estructuras tienen algunos rasgos comunes, como son, por ejemplo: cargas verticales bajas, cargas horizontales importantes, y en general suelen aceptar asentamientos admisibles mayores.
- **Fundaciones de baja rigidez longitudinal**: en este caso se trata de estructuras con cargas lineales (muros de carga, canales, etc.) con baja rigidez en el sentido de las cargas. Este tipo de estructuras son sensibles a humedecimientos localizados del terreno que generan asentamientos diferenciales importantes. En general, las medidas que suelen tomarse para disminuir los efectos de los asentamientos diferenciales son las siguientes: diseño de elementos que rigidicen la estructura, y el diseño de elementos constructivos que eviten la introducción del agua en el terreno, señalados anteriormente.

Diversos autores concuerdan en que los mejores resultados, y la idoneidad del tipo de solución, o la combinación de estas, depende de la calidad de las investigaciones geotécnicas realizadas, que a priori, se requiere conocer el

espesor de los suelos colapsables, la magnitud del colapso, tanto del peso propio del estrato o del conjunto de estratos en el perfil.

La experiencia ha comprobado que las medidas constructivas y las medidas de aislamiento del agua por sí solas no pueden resolver todos los problemas de inestabilidad que provoca el colapso del suelo. Así, la adopción de soluciones exclusivamente para la superestructura (por ejemplo: fundaciones profundas), sin un adecuado diseño que eviten daños en los otros elementos de la construcción, como pisos, desagües, etc., han provocado serios daños en estas partes de la construcción, que podrían haber sido evitados aplicando medidas tendientes a evitar el ingreso del agua en el terreno.

### **2.13 COLAPSABILIDAD DE LA TBJ DEL AMSS (ESTUDIOS PREVIOS)**

El estudio de la colapsabilidad de la TBJ del AMSS, es un tema que se ha venido desarrollando en diferentes investigaciones desde hace aproximadamente una década. En la siguiente Tabla (Ver Tabla No. 2.7) se presenta un resumen de investigaciones previas realizadas a la caracterización de las propiedades físicas y colapsabilidad en suelos, las cuales sentaron las bases para futuras investigaciones.

**Tabla No. 2.7. Resumen de estudios previos sobre caracterización y colapsabilidad en la TBJ del AMSS.**

Autor	Año	Resultados
<b>ESTUDIOS PREVIOS A LA CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA TBJ</b>		
Guzmán y Burgos	1981	<p><b>Objeto de Estudio:</b> Características físicas y propiedades mecánicas de muestras inalteradas y alteradas de suelos obtenidos en diferentes puntos del AMSS.</p> <p>Se determinó la necesidad de estudiar mejor el comportamiento de las TBJ del AMSS porque estos experimentan una disminución de la resistencia al corte al corte cuando se saturan.</p>
Guzmán y Melara	1996	<p><b>Objeto de Estudio:</b> Estabilidad y otras características de las estructuras geotécnicas de los suelos del AMSS.</p> <p>Se determinó que la macro estructura porosa de la mayoría de los suelos de la zona está directamente relacionada con el origen volcánico de los mismos. Ceniza volcánica y otros productos volcánicos como la TBJ posee compuestos minerales que provocan el efecto de cementación de los mismos, cuando no están saturados. (Altas relaciones de vacíos, etc.).</p>
<b>ESTUDIOS SOBRE COLAPSO DE LAS TBJ DEL AMSS</b>		
Rolo et al	1998	<p><b>Objeto de Estudio:</b> Características físicas y mecánicas de la TBJ del AMSS.</p> <p>Se determinó a través de mediciones de saturación del suelo en diferentes puntos y épocas que la TBJ del AMSS es un suelo en condición <b>PARCIALMENTE SATURADO</b>. Además, se confirma a través de la interpretación de curvas de compresibilidad, obtenidas de ensayos consolidación doble, el comportamiento <b>COLAPSABLE</b> de la TBJ.</p>
Rolo et al	2004	<p><b>Objeto de Estudio:</b> Caracterización geológica e ingenieril de las TBJ del AMSS, con énfasis en Colapso, Succión capilar y Resistencia a esfuerzos cortantes.</p> <p>Se determinó que el máximo índice de colapso que se registra en muestras inalteradas TBJ del AMSS no es superior a 0.15. (Que equivalen a 421 KPa). En condición de saturación de suelo arriba del 25%, provocarán el cambio de volumen repentino de la masa del suelo.</p>

Autor	Año	Resultados
Molina et al; Ávalos y Castro; Ascencio y Zúñiga	2009 2010 2010	<p><b>Objeto de Estudio:</b> Caracterización geológica e ingenieril de las TBJ del AMSS, unidades G y D. En zona proximal a la caldera volcánica de Ilopango. El Colapso fue la característica más importante de dichos estudios.</p> <p>Se resumen de acuerdo a distancias de emisión:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Grado de Colapso (Unidad G Proximal):</b> Moderado a Severo (13% &lt;w%&lt; 21%)</li> <li>• <b>Grado de Colapso (Unidad G Intermedia):</b> Moderado a Ligerito (26.7% &lt;w%&lt; 36.7%)</li> <li>• <b>Grado de Colapso (Unidad D Proximal):</b> Ligerito (13.6% &lt;w%&lt; 17.2%)</li> </ul> <p>Con este estudio se confirmó, la existencia de Colapso cuando se presenta la combinación de presiones mayores a 200 KPa y condición de saturación de los suelos.</p>
Chávez et al	2012	<p><b>Objeto de Estudio:</b> Resumen de la problemática y conocimiento actual de las TBJ del AMSS. (Colapso, succión y capilaridad, erosión, etc.)</p> <p>Se confirma la necesidad de profundizar en el estudio del Colapso, así como de las demás propiedades de las TBJ relacionadas para actualizar el enfoque académico y técnico con el que se enfrentan las situaciones de riesgo en el AMSS. (Desde la academia hasta el diseño de edificaciones de importancia)</p>

*Fuente: De los Autores.*

# **CAPÍTULO No. 3**

## **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presenta la metodología con que se desarrollará este trabajo; el contenido está distribuido de acuerdo a las actividades a realizar para la ejecución de éste; se inicia con la Investigación conceptual, se explica cómo será recopilada, la información referente a las TBJ y el fenómeno de colapsabilidad, continuando con la selección de ensayos que serán utilizados para la caracterización de las unidades de TBJ. Se continúa con un apartado en que se resumen los sitios en que se han identificado las unidades de TBJ en investigaciones previas, que serán tomados como base para definir los puntos de investigación. En estos se determinarán las características físicas y de colapsabilidad, a las unidades de interés, por lo que se debe considerar la extracción de muestras tanto alteradas como inalteradas. Para la prueba de colapso se presenta un manual de procedimiento basado en la norma ASTM D 5333. Los datos que se obtengan de la ejecución de ensayos, serán presentados y procesados para la interpretación de los mismos, y finalmente concluir al respecto.

### **3.2 INVESTIGACIÓN CONCEPTUAL (BIBLIOGRÁFICA)**

La información bibliográfica que permita la comprensión del fenómeno de colapsabilidad en las TBJ del AMSS, y de los conceptos relacionados será obtenida a través de la consulta de literatura técnica: Libros, trabajos de investigación relacionados, publicaciones en revistas científicas y o medios oficiales. También se consultará a expertos en la materia sobre las características geológicas y geomorfológicas de las zonas.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior; previamente se han realizado investigaciones con el fin de caracterizar las diferentes unidades de TBJ, además se han realizado investigaciones de colapsabilidad en las unidades G y D de TBJ, destacando entre ellos:

Los estudios de Hernández [2004], Bautista et al [2016], y Gómez [2018], serán tomados como referencia para las propiedades físicas de estos suelos: Distribución granulométrica, Gravedad Específica de los sólidos del suelo, y densidad.

La información contenida en las investigaciones anteriores será el criterio de referencia para comparar y validar los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

### 3.3 INVESTIGACIÓN DE LUGARES DONDE SE HAN IDENTIFICADO UNIDADES DE TBJ.

Se tomarán como posibles puntos de investigación, las zonas en donde se hayan identificado la presencia de las unidades de TBJ. Para este trabajo se tomarán en cuenta estudios anteriores y las unidades que se han identificado en algunas zonas del AMSS, que se encuentra resumido en la Tabla No. 3.1.

**Tabla No. 3.1. Descripción de unidades de TBJ identificadas en investigaciones anteriores**

Autor	Nombre	Zonas y unidades identificadas
<p><b>Walter Hernández (2004)</b></p>	<p>CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS Y VULCANOLÓGICAS DE LAS TEFRAS DE TIERRA BLANCA JOVEN, DE ILOPANGO, EL SALVADOR</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rio las Cañas, Urbanización la Campanera y Quebrada El Limón: <b>Unidades C, D, E, F y G; unidades A y B con espesores muy delgados; Ignimbritas Alfa y Beta.</b></li> </ul>
<p><b>Ayala Valdez (2013)</b></p>	<p>CARACTERÍSTICAS Y ESTUDIOS DE MODELOS CONSTITUTIVOS DE LA UNIDAD G DE LA TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Padre Arrúpe: <b>Unidades D, E, F y G</b></li> <li>• Bosques de la Paz, Rio las Cañas: <b>Unidad G.</b></li> </ul>

Autor	Nombre	Zonas y unidades identificadas
Bautista et al (2016)	DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLASTICOS EN EL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Villa Galicia, Ilopango: <b>Unidad F</b></li> <li>• Universidad de El Salvador: <b>Unidades G y F</b></li> <li>• Padre Arrúpe: <b>Unidades D, E, F y G</b></li> </ul>
Cristian Gómez (2018)	OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN TALUDES CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quebrada El Arenal Seco, Ilopango</li> <li>• Zona Franca San Bartolo: <b>Ignimbrita Alfa y Unidades F y E</b></li> <li>• Aeropuerto de Ilopango: <b>Ignimbrita Alfa, Unidades F, E y D</b></li> <li>• Cementerio los Cipreses: <b>Ignimbrita Alfa y Unidad D</b></li> </ul>

Fuente: De los Autores

### 3.4 SELECCIÓN DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de este apartado se realizarán las siguientes actividades:

#### Visitas de campo

Se realizará una visita de carácter general a las zonas potenciales de estudio con la finalidad de identificar sitios que reúnan las condiciones que se requieren para llevar a cabo la investigación.

#### Selección de lugares

Los lugares seleccionados serán aquellos donde se encuentren expuestas las unidades de TBJ, tomando en cuenta condiciones como: mayor cantidad de unidades expuestas, espesores de los estratos, facilidad de extracción de muestras alteradas e inalteradas, facilidad de acceso y seguridad.

Los lugares seleccionados serán identificados con parámetros como:



- Ubicación (coordenadas geográficas)
- Descripción del lugar
- Altura y pendiente de taludes
- Unidades presentes de TBJ en el lugar
- Espesor de las unidades
- Se tomarán fotografías de referencia del talud y de las unidades presentes.

### **3.5 SELECCIÓN DE ENSAYOS A REALIZAR PARA LLEVAR A CABO LA CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES DE TBJ Y CARACTERÍSTICAS DE COLAPSABILIDAD.**

Serán ejecutados los ensayos que permitirán determinar las características físicas y de colapsabilidad de las unidades de TBJ, como son:

- Humedad natural
- Gravedad específica
- Densidad húmeda y seca
- Distribución del tamaño de las partículas
- Compactación próctor ASTM D698 a las unidades G y F
- Colapsabilidad de suelo en estado natural y compactado.

### **3.6 ESTUDIO Y DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE ESPECÍMENES E IDENTIFICACION DE LAS UNIDADES DE TBJ.**

Dada la naturaleza de este trabajo de investigación, es indispensable poder diferenciar las unidades que conforman los taludes en las zonas a estudiar.

Para poder distinguir y caracterizar las distintas unidades de TBJ, se valdrá de la metodología No 2 descrita por Ayala Valdés [2013]; que consiste en el empleo

de un perfil estratigráfico de TBJ, obtenido de la investigación realizada por Hernández [Modificado, 2008] a la Tierra Blanca Joven (ver Figura No. 2.9 del capítulo 2); con éste perfil se procederá a realizar la identificación en campo de las unidades de TBJ, obtener muestras y realizar ensayos de granulometría a las muestras de las unidades del talud o ladera y obtener sus curvas granulométricas, posteriormente comparar éstas, con las curvas granulométricas obtenidas de la investigaciones previas a la Tierra Blanca Joven, que se utilizarán únicamente como referencia:

Inicialmente deben identificarse diferentes unidades dentro del talud o ladera a estudiar, esto podrá realizarse observando los cambios en las características del suelo, el estrato de la Unidad E de TBJ (tiene una especial relevancia al servir como guía en la identificación del resto de unidades de la Tierra Blanca Joven).

- **Identificación de la Unidad E**

La Unidad E se podrá identificar porque presenta intercalación de dos estratos que posean las siguientes características:

1. **Estrato húmedo:** Color café claro cuando está seca y café oscuro cuando está húmeda, siendo de granulometría fina.
2. **Estrato seco:** Alternancia de niveles de depósitos de caída secos color gris, de granulometría gruesa suelta (grava y arena gruesa hasta fina) (ver Figura No 3.1).



**Figura No 3.1. Representación de la Unidad E y las intercalaciones de los estratos secos y húmedos**

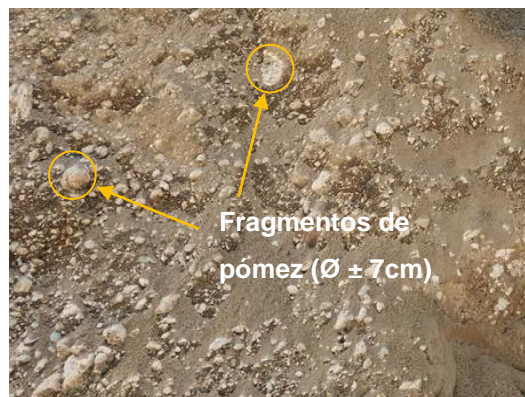
*Fuente: De los Autores, fotografía tomada el 11/01/2019*

- **Identificación de la Ignimbrita Beta**

La Ignimbrita Beta se podrá identificar porque está justo por encima de la unidad E, con una matriz muy fina muy consolidada de color café claro.

- **Identificación de la Unidad F y G**

La Unidad F se identificará porque está justo sobre la Ignimbrita Beta, con matriz de ceniza volcánica gruesa, con abundantes partículas de pómez de hasta 8 cm de diámetro y líticos de color café claro a beige (ver Figura No 3.2).



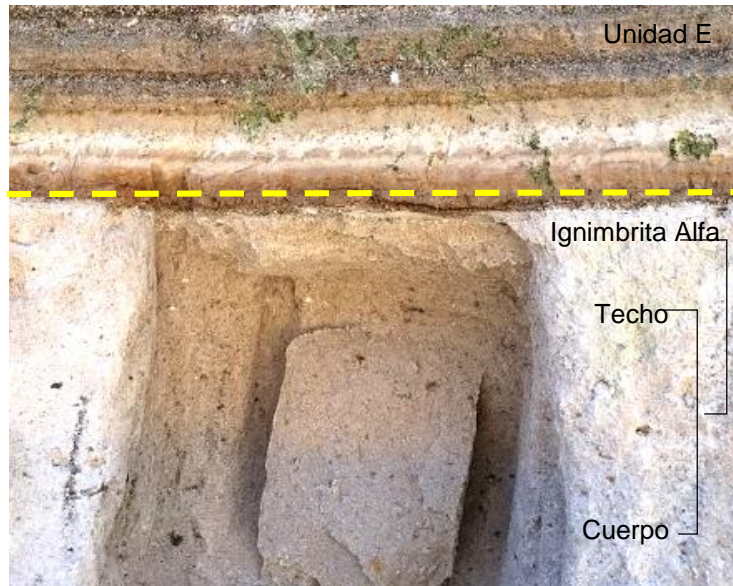
**Figura No 3.2. Representación de la apariencia de la Unidad F y el tamaño máximo del grano que contiene.**

*Fuente: De los Autores fotografía tomada el 07/09/2018*

La unidad G se identificará por ser la unidad más superficial de la TBJ, con una matriz de ceniza volcánica fina de color café claro a beige, con partículas de pómez y lapilli acrecional. Se encuentra arriba de la unidad F.

- **Identificación de la Ignimbrita Alfa**

La Ignimbrita Alfa se podrá identificar por debajo de la unidad E, con un techo de color rosa tenue, con matriz de ceniza fina, con pómez y líticos cementada en la base y no consolidada en el resto (ver Figura No 3.3)



**Figura No 3.3. Representación de la Ignimbrita Alfa, donde se observa la corona (techo) color rosa.**

*Fuente: De los Autores fotografía tomada el 11/01/2019*

- **Identificación de la Unidad D**

Se podrá identificar porque está por debajo de la Ignimbrita Alfa, posee una matriz de cenizas finas con presencia de lapilli acrecional.

Al haber identificado las unidades presentes, se obtendrán muestras alteradas de cada uno de los estratos definidos y se deberá especificar; la profundidad a la que se obtuvo, espesor de capa y características visuales (color, textura, grado de consolidación, etc.).

### **3.7 MUESTREO**

El muestreo se llevará a cabo con el fin de extraer muestras de TBJ determinar las características físicas y de colapsabilidad de los estratos presentes en los puntos seleccionados. Se sabe por procedimientos de laboratorio estandarizados para ciertos ensayos, que se necesitan obtener muestras tanto alteradas como inalteradas (Según sea el ensayo a realizar).

Para tal fin se retomarán los procedimientos descritos por el Ing. Cristian Antonio Gómez Gonzales en el trabajo de investigación “OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN TALUDES CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)” en el año 2018.

Los procedimientos se describen a continuación:

### **MUESTRAS INALTERADAS**

Este tipo de muestra debe conservar las condiciones que el suelo posee in situ (ver Figura No 3.4 a), y se usaran para realizar ensayos de colapso.

Por lo cual, las obtenciones de éstas podrán seguir procedimiento:

- Identificar cada estrato presente en el talud, utilizando la metodología que se describe en el apartado 3.6 de este capítulo.
- Se descubre la capa de material a la que se pretende tomar la muestra.
- Se limpia la superficie de maleza o raíces.
- Se excava una pequeña zanja alrededor de la marca, dejando entre el borde de la muestra y el borde interno de la zanja unos 10cm, de manera que esta pequeña excavación no afecte la muestra. La zanja deberá ser suficientemente ancha para permitir las operaciones de tallado, parafinado in situ y corte.
- Con las herramientas adecuadas, se le dará una forma aproximadamente cubica y se tallará hasta que tenga el tamaño final que se requiere, cuidando la muestra a medida que el proceso de tallado se acerque a la cara superior y a las cuatro caras laterales.
- Una vez que la zanja está suficientemente profunda y las caras de la muestra estén perfiladas, se procederá a extraer la muestra utilizando cuchillos, paletas o sierras, y se retira cuidadosamente. Si la muestra tiene

una buena consistencia, se tallará la cara inferior antes de proceder a parafinar.

- Utilizando una brocha, se aplicará la parafina: una primera capa y se cubre con una venda.
- El proceso se repite hasta obtener un recubrimiento impermeable de 3 mm de espesor como mínimo.

Si la muestra no tiene suficiente consistencia, antes de proceder a la extracción, una vez tallada la cara superior y las cuatro caras laterales, estas deben parafinarse como se describió en el párrafo anterior.

Luego se confina la muestra con una caja y se procede a la extracción.

La última cara (inferior), se parafina inmediatamente después de la extracción.

Se debe colocar a la muestra, una etiqueta con la siguiente información: procedencia, especificando con marcas las caras superior e inferior, y ubicación dentro; se cierra la caja y se coloca exteriormente otra etiqueta con los mismos datos, indicando adicionalmente advertencias de las precauciones requeridas para el transporte de la misma (ver Figura No 3.4 b).

Registrar la altura del estrato a donde se extrajo la muestra y tomar fotografías para tener referencia visual.

La altura a la que se extrajo la muestra se registrará a partir del pie del talud hasta el lugar de la extracción, y si fuese posible, desde la corona del talud hacia la misma.



**Figura No 3.4. Obtención de muestras inalteradas a) Extracción y labrado en campo de una muestra inalterada. b) Muestras inalteradas parafinadas e identificadas con la información de campo.**

*Fuente: de los Autores, fotografías tomadas a, 07/09/2018. b, 11/01/2019*

## **MUESTRAS ALTERADAS**

Las muestras alteradas se extraen con la finalidad de ser utilizadas para identificación y caracterización del material que se está investigando. Para llevar a cabo la extracción de muestras alteradas se seguirá el siguiente procedimiento:

- Identificar cada estrato presente en el talud, utilizando la metodología que se describe en el apartado 3.6 de este capítulo.
- Extraer muestras alteradas de cada estrato que se haya identificado
- Recolectar la cantidad suficiente de material de cada estrato según lo que indican los métodos para la realización de los ensayos de laboratorio que se pretenden realizar.
- Registrar la altura del estrato a donde se extrajo la muestra y tomar la respectiva fotografía como referencia visual.
- Identificar cada muestra colocando en la bolsa el nombre del talud y nombre del estrato al que pertenece el suelo extraído.

- Introducir en una segunda bolsa si es necesario la muestra, debido a que se necesita conservar las condiciones que posee In Situ cada estrato.

### 3.8 EJECUCION DE ENSAYOS

Para determinar tanto los parámetros físicos como los de colapsabilidad de las unidades de TBJ, se realizarán los ensayos que se describen a continuación (ver Tabla No. 3.2):

**Tabla No. 3.2. Descripción de los métodos de pruebas físicas de laboratorio y cantidad de ensayos a realizar a las unidades de TBJ a investigar.**

Norma	Descripción	Cantidad de ensayos
<b>ASTM D2216</b>	Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Al menos 2 para humedad natural por cada muestra de unidad extraída de cada punto de muestreo.</li> </ul>
<b>ASTM D422</b>	Determinación del tamaño de las partículas de suelos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 ensayos por unidad de TBJ extraída.</li> </ul>
<b>ASTM D854</b>	Gravedad específica de los sólidos del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 ensayos por unidad de TBJ extraída.</li> </ul>
<b>ASTM D5333</b>	Método de Prueba Estándar para medir el Índice y Potencial de Colapso de los Suelos.	<p><b>En estado natural</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 ensayos por unidad extraída para determinar índice.</li> <li>• 2 ensayos por unidad para determinar potencial.</li> </ul>
		<p><b>Compactadas</b></p> <p>Para determinar potencial de colapso serán:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 ensayos con humedad óptima,</li> <li>• 2 ensayos con humedad arriba de la óptima y,</li> <li>• 2 ensayos con humedad debajo de la óptima.</li> </ul>
	Determinación de la humedad optima de compactación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 ensayo por unidad de TBJ</li> </ul>



Norma	Descripción	Cantidad de ensayos
ASTM D698 <sup>7</sup>	Compactación de muestras con humedad óptima, y variación de $\pm 2\%$ en la rama seca y húmeda.	<ul style="list-style-type: none"> <li>6 especímenes por unidad de TBJ</li> </ul>
-	Determinación de la Densidad Húmeda y seca	<ul style="list-style-type: none"> <li>Al menos 2 por unidad extraída</li> </ul> Serán determinados a partir del peso y el volumen requerido para moldear en un anillo un espécimen para un ensayo de colapso

*Fuente: De los Autores*

### Ensayos de colapsabilidad

Para la ejecución del ensayo de Colapso se aplicará el procedimiento del **Método estándar para el cálculo del potencial de colapso de los suelos** (ASTM D 5333), cuyo procedimiento se explica en el ANEXO A.

Para la ejecución de esta investigación, se realizarán los ensayos de colapsabilidad tanto al suelo natural (a todas las unidades extraídas), como compactado (unidades G y F), siguiendo el procedimiento de la norma de referencia y con las secuencias de cargas siguientes:

- Índice de colapso: 12, 25, 50, 100, y 200 kPa.
- Potencial de colapso: 60, 120, 240, 480 y 950 kPa.

### Especímenes compactados

Para determinar el potencial de colapso sobre muestras compactadas, la humedad de compactación que se usara será: humedad óptima y se variara en un rango de  $\pm 2\%$  en la rama seca y húmeda.

---

<sup>7</sup> La determinación de la humedad óptima de compactación y la compactación de especímenes para el ensayo de colapso, se realizará únicamente a las unidades superficiales F y G.

### **3.9 RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO**

Con los datos obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio a cada muestra de la unidad se harán los cálculos necesarios para determinar las gravedades específicas, distribución del tamaño de las partículas, pesos volumétricos e índice, potencial y grado de colapso.

### **3.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para cada uno de los ensayos se realizará un análisis de resultados, que nos permita determinar tanto las características físicas como de colapsabilidad a las unidades de TBJ estudiadas, lo que se realizará de la forma siguiente:

#### **Distribución del tamaño de las partículas y gravedad específica**

Los resultados que se obtengan de las pruebas de distribución del tamaño de las partículas y las gravedades específicas obtenidas, ayudaran en la identificación de las unidades de TBJ estudiadas, al comparar los resultados de las curvas granulométricas obtenidas por Walter Hernández [2004], Bautista et al [2016], y Gómez [2018]. Los cuales se mencionaron el en apartado 3.2 de este capítulo. La comparación de los resultados obtenidos con los tomados de trabajos anteriores, se puede verificar la veracidad o no de los mismos, para repetir algunos ensayos si estos no son congruentes o no pertenecen a la unidad previamente identificada.

#### **Prueba de colapso**

Con los resultados de los índices, grado y potencial de colapso se compararán con la clasificación de la Tabla No. 2.4 presentada en el capítulo No 2. De esta forma se identificará que tan propenso será el suelo a colapsar cuando se encuentra en: su estado natural de confinamiento y en estado compactado. Además, se realizará una revisión de sus humedades, relaciones de vacíos,

densidades, grados de saturación iniciales y finales, y con ello evaluar el comportamiento que se tuvo, para dar por validos los resultados obtenidos, o determinar la necesidad de repetir más ensayos.

Con los suelos compactados se logrará determinar en qué medida se logrará disminuir la propensión al colapso.

# **CAPÍTULO No. 4**

## **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA**

## **4.1 INTRODUCCIÓN**

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la Metodología de la Investigación planteada en el capítulo anterior.

Se inicia por presentar la forma en que fue obtenida toda la información bibliográfica utilizada para conceptualizar las TBJ y la problemática del fenómeno de colapso. Posteriormente se expone la información recopilada en visitas y exploración de campo, los parámetros o condiciones que fueron decisivos para determinar en qué sitios de los explorados se realizarían los muestreos de material, y el tipo de muestras extraídas.

Mientras se hacía la recopilación de muestras, cada una de estas se iba codificando con un correlativo, asignado según el orden en que se obtuvieron los especímenes en los distintos sitios de exploración, se identificó que las muestras pertenecían a unidades específicas de TBJ, según estas estaban dispuestas en los taludes, y las propiedades visuales que se les asocia, sin embargo para establecer la procedencia de cada una de las muestras, se realizaron ensayos de caracterización: granulometría y gravedad específica, los resultados obtenidos de esta serie de ensayos fueron comparados con los resultados obtenidos por los investigadores que en capítulos anteriores han sido citados como referencia.

Posteriormente, al contar con la identificación de cada una de las muestras, en función de la Unidad de TBJ asociada, se reportan los resultados de los ensayos de colapsabilidad ejecutados, tanto para especímenes en condición natural, como compactada.

## 4.2 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los conceptos obtenidos por la investigación bibliográfica son presentados en el Capítulo 2: **MARCO TEÓRICO**; y fueron tomados en cuenta los aspectos más relevantes relacionados con el fenómeno de colapso que presenta la TBJ en sus distintas unidades, pero para comprender qué condiciones son necesarias para propiciar este fenómeno y particularmente en estos suelos, se aborda desde la génesis de este material piroclástico, las formaciones geológicas existentes en la región, las características que presenta la TBJ, su comportamiento o el efecto descrito ante las acciones de factores externos, entre ellos, el colapso que posteriormente es definido detallando su concepto, las causas que lo producen, las características que presenta un suelo para ser catalogado como colapsable.

Posteriormente, fueron definidos los parámetros físicos que se utilizan para cuantificar el colapso y el método para determinarlos y finalizando con la aplicación ingenieril de los parámetros de colapso.

Del Capítulo 2 se retoma la Tabla No. 2.2 que fue de utilidad para la identificación de las muestras obtenidas en campo, en ella se presentó la descripción de las propiedades de cada Unidad de TBJ, según Walter Hernández (2004):

**Tabla No. 2.2 Descripción de las unidades de la Tierra Blanca Joven (TBJ)**

Unidad	Descripción de material	Tipo deposito
Unidad A	Es un depósito fino, granular y localmente disperso de color café. Está compuesto por pómez, y abundantes líticos; ambos con tamaño de arena hasta grava.	Depósito de caída
Unidad B	Cenizas gruesas basales, y lapilli de caída en el techo. Presenta un color amarillento y cementación de óxidos de hierro.	Depósito de caída.
Unidad C	Compuestos por dos flujos piroclásticos; el basal de color gris (Ignimbrita Gris), rico en líticos andesíticos, de cohesión similar al sobreyacente. Este último es el más importante, de color amarillento (Ignimbrita Amarilla), rico en líticos hidrotermalizados	Depósito de flujos piroclásticos
Unidad D	Es un depósito que se caracteriza por ser rico en cenizas de granos finos. En las facies intermedias y distales es no consolidado, sin embargo, hacia el borde caldérico está unidad está bastante cementada por minerales sulfatados y silicatados.	Depósito de caída

<b>Unidad</b>	<b>Descripción de material</b>	<b>Tipo deposito</b>
Ignimbrita Alfa	Ignimbrita masiva, con techo de color rosado tenue y beige en todo el depósito, posee matriz rica en cenizas finas, pómez centimétricos y pocos líticos, cementada en la base por sulfatos y silicatos, el resto de la unidad está no consolidada.	Depósito de flujos piroclásticos
Unidad E	Depósitos secos y húmedos alternados. Los depósitos secos son color claro, compuestos por cenizas gruesas con lapilli fino pomítico y líticos andesíticos (gravas y arenas); se caracterizan por ser no consolidados, y bastante deleznales. Los depósitos húmedos están constituidos por cenizas muy finas, bien graduadas, color café claro, y café oscuro cuando están húmedos, se caracterizan por estar bastante consolidados y son ricos en fragmentos vítricos y en cristales	Depósitos de caída
Ignimbrita Beta	Está constituida por una Ignimbrita de color café claro, muy consolidado, con abundante matriz fina con pómez y lítico en moderada presencia.	Depósitos de flujos piroclásticos
Unidad F	Compuesta por varios flujos piroclásticos masivos, no soldados, de color claro a beige claro, con granulometría muy poco distribuida. Presentan matriz de cenizas gruesas con abundantes fragmentos de pómez y líticos.	Depósitos de flujos piroclásticos
Unidad G	Los flujos son de matriz fina, poco cementados y se caracterizan por tener baja consolidación. Las coignimbritas están formadas por capas delgadas de cenizas finas relativamente bien graduadas con moderada presencia de lapilli acrecional, El conjunto da un aspecto estratificado debido a los cambios granulométricos y en la estación lluviosa adoptan tonalidades claras y beiges.	Depósitos de caída, flujos y oleadas piroclásticas.

*Fuente: Hernández, W, (2004). "Características Geomecánicas y Vulcanológicas de las Tefras Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango, El Salvador", Tesis M.Sc., Tutor: Miguel Galera, Universidad Politécnica de El Salvador".*

### **4.3 INVESTIGACION EN LUGARES DONDE SE HAN IDENTIFICADO UNIDADES DE TBJ**

Tomando en cuenta las zonas de estudio del AMSS de donde se han identificado unidades de TBJ y que fueron estudiadas en investigaciones anteriores (Tabla No. 3.1 del apartado 3.3 del capítulo 3), se llevó a cabo la exploración en las siguientes zonas:

- Ciudad Universitaria, Universidad de El Salvador.
- Fundación Padre Arrúpe, Soyapango.
- Quebrada Arenal Seco, Ilopango.

## **4.4 SELECCIÓN DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN**

### **Visitas y reconocimiento del lugar**

Para identificar los puntos preliminares donde se podría llevar a cabo la extracción de muestras, se realizaron visitas de campo a los lugares que anteriormente fueron mencionados en el apartado 4.3 de este capítulo. Los objetivos principales de las visitas de campo fueron: reconocimiento de la zona (acceso y seguridad), identificación de las unidades presentes y su facilidad de extracción.

Las zonas donde se realizaron visitas de campo y reconocimiento de unidades de TBJ presentes, se describen a continuación:

- **Taludes Campus UES**

La primera visita se llevó a cabo en el campus de la UES específicamente en la zona conocida como *La Bóveda* y en la zona Norte de la escuela de Ingeniería Civil. Preliminarmente fueron seleccionados 3 puntos y la descripción de estos se presentan a continuación (ver fichas No 4.1. 4.2 y 4.3):



### Ficha No 4.1. Identificación y reconocimiento del punto No 1

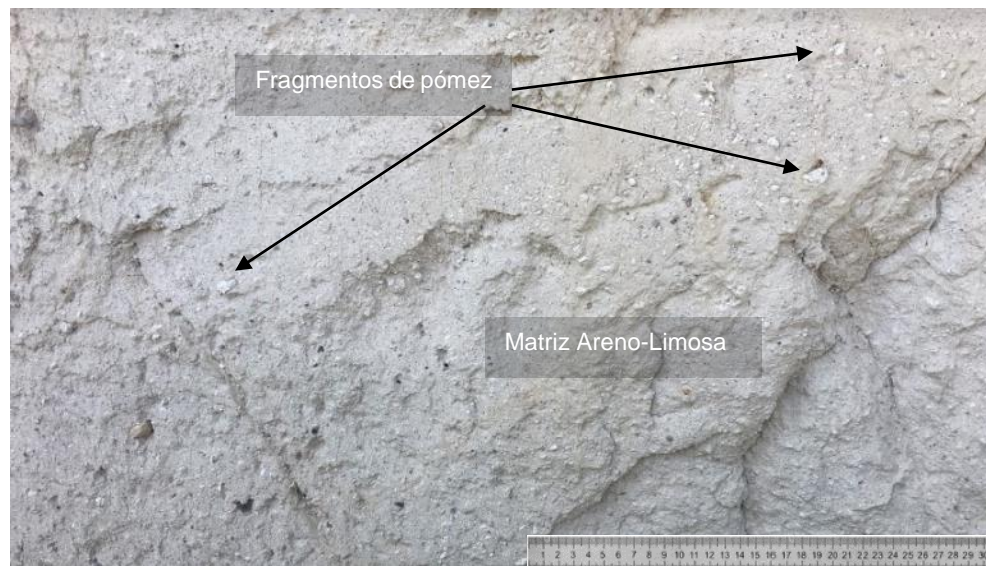
Nombre de talud	Talud No. 1 UES
 <p data-bbox="493 1062 1240 1094"><b>Figura No 4.1. Ubicación de talud No1 UES de “La Bóveda”</b></p> <p data-bbox="753 1094 980 1121"><i>Fuente: Google Maps</i></p>	
<b>Ubicación</b>	Bóveda Campus Universitario, delimitada al Norte y Oriente por la Circunvalación Universitaria, al Sur por El campus de la UES, y al Poniente por la Avenida Don Bosco.
<b>Coordenadas</b>	13°43'19.6" N; 89°12'01.4" W (13.722100, -89.200400)
<b>Descripción de la zona</b>	Se tienen presencia de TBJ. Se considera de fácil acceso y adecuado para la extracción de muestras.
<b>Seguridad y permisos de acceso</b>	Zona muy segura (por encontrarse dentro del Campus Universitario). Se concedió el permiso para extracción de muestras
<b>Altura de Talud</b>	3.00 m aproximadamente
<b>Pendiente del talud</b>	80° aproximadamente
<b>No de unidades visibles</b>	1
<b>Posibles unidades presentes</b>	Se considera que este talud puede estar conformado por la Unidad G de TBJ, presenta una matriz limo-arenosa color gris claro con presencia de pómez de tamaño máximo aproximado de 10 a 15 mm, ligeramente consolidado a suelto, y su corona está cubierta por vegetación y una capa de suelo orgánico (ver Figuras No. 4.2 y 4.3)

*Fuente: de los Autores*



**Figura No 4.2. Talud No1 UES del punto No 1 en la zona de La Bóveda dentro del Campus universitario de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura**


*Fuente: de los Autores, fotografía tomada el 07/09/2018*



**Figura No 4.3. Representación del material que conforma al Talud No1 UES del punto No 1 en la zona de La Bóveda dentro del Campus universitario de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura (regla en centímetros). El material, presenta una matriz limo-arenosa color café claro con presencia de pómez de tamaño máximo aproximado de 10 a 15 mm**

*Fuente: de los Autores, fotografía tomada el 07/09/2018*

### Ficha No 4.2. Identificación y reconocimiento del punto No 2

Nombre de talud	Talud No. 2 UES
 <p data-bbox="493 1062 1240 1094"><b>Figura No 4.4. Ubicación de talud No2 UES de “La Bóveda”</b></p> <p data-bbox="753 1094 980 1121">Fuente: Google Maps</p>	
<b>Ubicación</b>	Bóveda Campus Universitario, delimitada al Norte y Oriente por la Circunvalación Universitaria, al Sur por El campus de la UES, y Poniente por la Avenida Don Bosco.
<b>Coordenadas</b>	13°43'20.5" N; 89°12'03.2" W (13.722358; -89.200891)
<b>Descripción de la zona</b>	Se tiene presencia de TBJ. Se considera de fácil acceso y adecuado para la extracción de muestras.
<b>Seguridad y permisos de acceso</b>	Zona muy segura (por encontrarse dentro del Campus Universitario). Se concedió el permiso para extracción de muestras
<b>Altura de Talud</b>	5.00 m
<b>Pendiente del talud</b>	Aproximadamente 70°
<b>No de unidades visibles</b>	1
<b>Posibles unidades presentes</b>	Se considera que este talud puede estar conformado por la Unidad F de las TBJ, donde se identificaron 2 estratos, uno inferior de color beige (espesor de 2.20 m) y otro superior color gris claro (espesor de 1.80 m), ambos presentando una matriz areno-limosa con partículas de pómez con tamaño máximo de 25 mm, ligeramente consolidado, y su corona está cubierta por vegetación y una capa de suelo orgánico contaminado con ripio (ver Figuras No. 4.5 y 4.6)

Fuente: de los Autores



**Figura No 4.5 Representación de los materiales presentes en el talud No2 UES del punto No 2 en la zona de La Bóveda dentro del Campus universitario de la facultad de Ingeniería y Arquitectura**

Fuente: de los Autores, fotografía tomada el 07/09/2018



**Figura No 4.6. Representación del material que conforma al Talud No2 UES del punto No 2 en la zona de La Bóveda dentro del Campus universitario de la facultad de Ingeniería y Arquitectura (regla en centímetros). El material consiste en una matriz areno-limosa con partículas de pómez con tamaño máximo de 25 mm.**

Fuente: de los Autores, fotografía tomada el 07/09/2018

### Ficha No 4.3. Identificación y reconocimiento del punto No 3

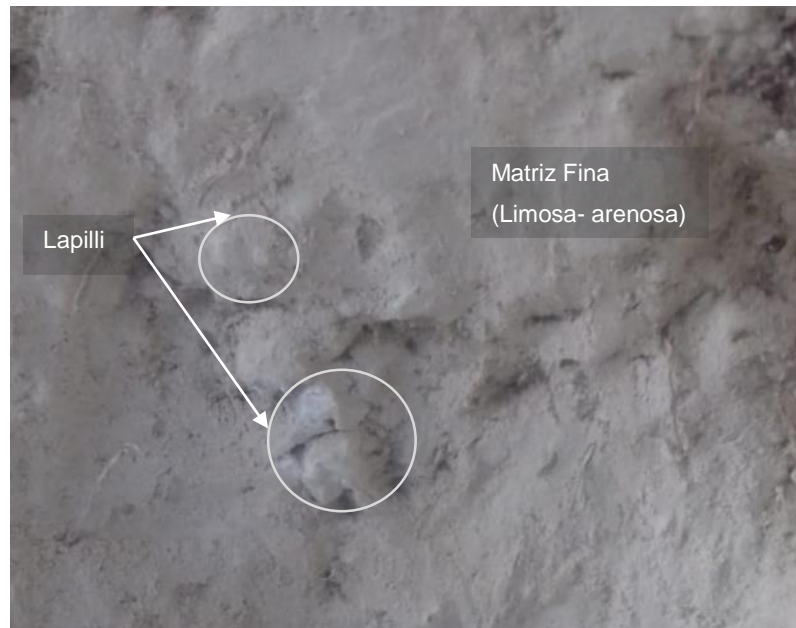
Nombre de talud	Talud No. 3 UES
 <p data-bbox="537 1108 1198 1140"><b>Figura No 4.7. Ubicación de talud No3 UES en la FIA</b></p> <p data-bbox="753 1140 984 1165">Fuente: Google Maps</p>	
<b>Ubicación</b>	Facultad de Ingeniería y Arquitectura limitado por circulación exterior (acera) del edificio de Ingeniería Mecánica, al Norte, y por la Escuela de Ingeniería Civil al Sur, edificio que a la vez es sobrecarga en este talud.
<b>Coordenadas</b>	13°43'15.7"N 89°12'03.6" W (13.721013, -89.200997)
<b>Descripción de la zona</b>	Se tiene presencia de TBJ. Es de fácil acceso y adecuado para extraer muestras.
<b>Seguridad y permisos de acceso</b>	Zona muy segura (por encontrarse dentro del Campus Universitario). Se concedió el permiso para extracción de muestras
<b>Altura de Talud</b>	2.00 m
<b>Pendiente del talud</b>	70° aproximadamente
<b>No de unidades visibles</b>	1
<b>Posibles unidades presentes</b>	Se considera que este talud puede estar conformado por la Unidad G de las TBJ (espesor de 1.70 m), una matriz muy fina de color café claro, poco consolidado a suelto, además de una capa de suelo orgánico (espesor de 0.30 m) contaminado con ripio y cubierta de vegetación en la corona (ver Figura No. 4.8)

Fuente: de los Autores



**Figura No 4.8. Representación de los materiales que conforman el talud No 3 UES en la FIA, y su ubicación entre la escuela de Ingeniería Civil e Ingeniería Mecánica**

Fuente: de los Autores, fotografía tomada el 19/07/2019




**Figura No 4.9. Representación del material que conforma al Talud No3 UES dentro del Campus universitario de la facultad de Ingeniería y Arquitectura (regla en centímetros). El material consiste en una matriz muy fina de color café claro, poco consolidado a suelto.**

Fuente: de los Autores, fotografía tomada el 19/07/2019

- **Fundación Padre Arrúpe, Soyapango**

Recorriendo el lugar se identificaron 3 taludes, pero se denominó como punto No 4 ya que solo se tuvo acceso únicamente al área de Clínica y Laboratorio de Suelos y Materiales. Las características de los taludes se detallan a continuación (ver ficha No 4.4):

<b>Ficha No 4.4. Identificación y reconocimiento del punto No 4</b>	
<b>Nombre de talud</b>	<b>Taludes Padre Arrúpe</b>
	
<p><b>Figura No 4.10. Ubicación de la zona de la Fundación Padre Arrúpe</b> Fuente: Google Maps</p>	
<b>Ubicación</b>	Ubicado en el Municipio de Soyapango, Departamento de San Salvador. Accediendo por la Autopista Este – Oeste (Carretera de Oro).
<b>Coordenadas</b>	13°43'11.97" N; 89°9'29.7" W (13.719991; -89.158249)
<b>Descripción de la zona</b>	Se tiene presencia de TBJ. De acceso relativamente fácil, y pocas posibilidades para extraer muestras.
<b>Seguridad y permisos de acceso</b>	Zona relativamente segura. No se concedió el permiso para extracción de muestras en los taludes inspeccionados.
<b>Alturas de Taludes</b>	Entre los 1.50 m a 2.00m
<b>Pendiente del talud</b>	Entre 45 a 60°
<b>No de unidades visibles</b>	1
<b>Posibles unidades presentes</b>	Se considera la presencia de Unidad G, taludes recubiertos con vegetación ornamental y adicionalmente se advirtió que dos de ellos estaban conformados por material alterado. Se reporta también que no se concedió acceso a explorar estos taludes.


Fuente: de los Autores

- **Zona Franca San Bartolo sobre la Quebrada del Arenal Seco en Ilopango**

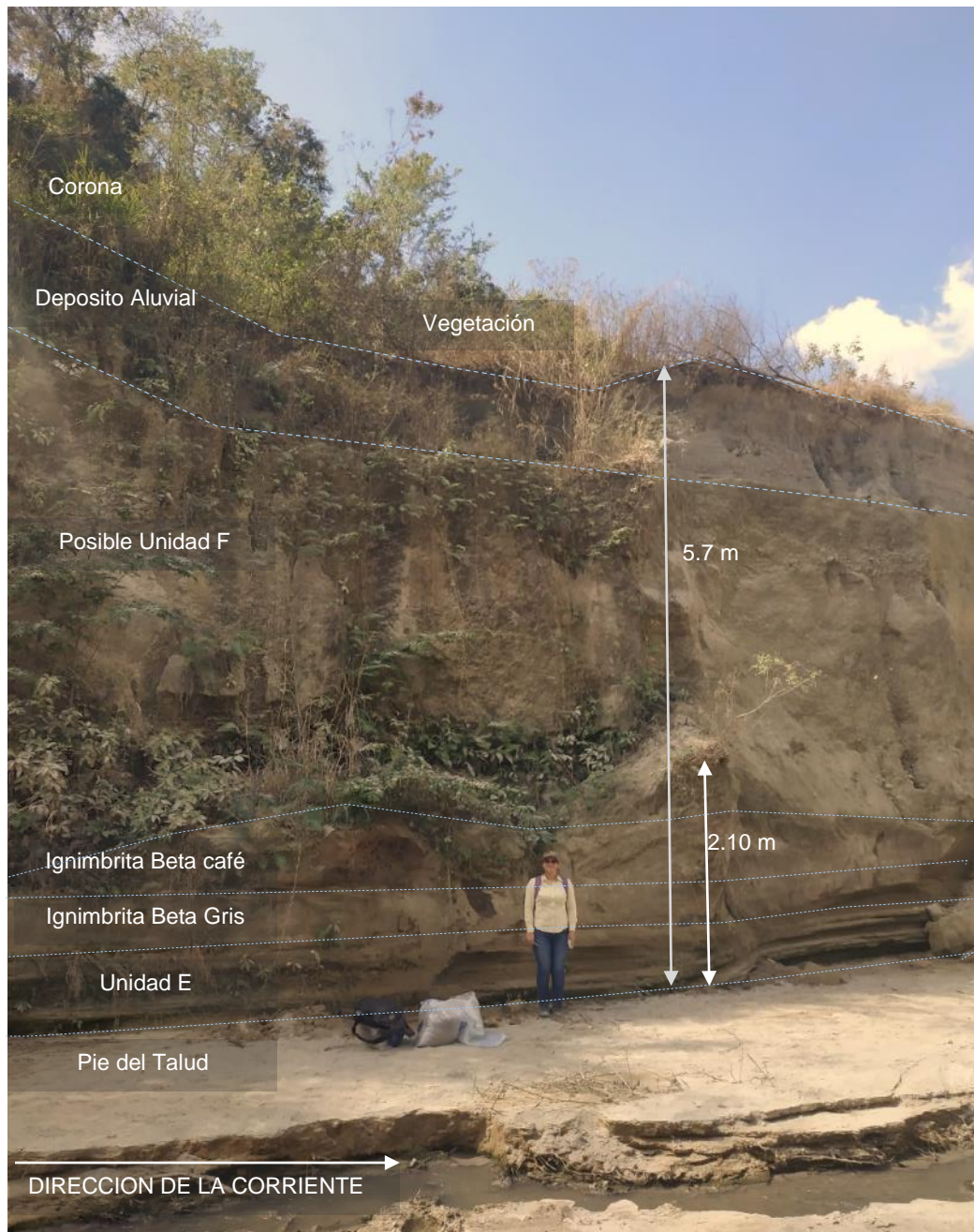
Este sitio se reviste de un interés muy particular ya que los taludes enmarcan el cauce de la quebrada y exhiben la estratigrafía de las unidades de TBJ, donde se identificaron 2 posibles puntos de muestreo, y sus características se presentan a continuación (ver fichas No 4.5 y 4.6):



**Ficha No 4.5. Identificación y reconocimiento del punto No 5**

<b>Nombre de talud</b>	<b>Talud ZF-1 (dividido en dos secciones, izquierdo y derecho)</b>
 <p data-bbox="358 863 1380 955"><b>Figura No 4.11. Ubicación del talud ZF-1 sobre la Quebrada del Arenal Seco, San Bartolo, Ilopingo</b> Fuente: Google Maps</p>	
<b>Ubicación</b>	Dentro de la Zona Franca San Bartolo, delimitado al Sur- Oeste por la pista del Aeropuerto de Ilopingo, al Sur con El Boulevard del Ejercito Nacional, y al costado Este con área industrial de la Zona Franca.
<b>Coordenadas</b>	13°42'5.91" N; 89°4'9.98"W (13.701641; -89.113883)
<b>Descripción de la zona</b>	Se tiene presencia de TBJ. Es de fácil acceso, y factible para extraer muestras.
<b>Seguridad y permisos de acceso</b>	Zona relativamente segura. Es permitido el acceso para extracción de muestras
<b>Altura de Talud</b>	Entre 5 a 6 m
<b>Pendiente del talud</b>	Aproximadamente vertical
<b>No de unidades visibles</b>	4
<b>Posibles unidades presentes</b>	Se considera que está conformado por (desde el pie del talud hasta la corona): Ignimbrita Alfa (con espesor de 3.30 m) con un techo color rosa tenue y el resto del cuerpo del estrato en coloración beige, matriz arenas con limos, presencia de partículas de pómez y líticos, moderadamente consolidada; Unidad E con intercalaciones de material de matriz limo arenoso y areno limoso (espesor de 70 cm) (ver Figura No 4.13); Ignimbrita Beta con un estrato inferior (espesor de 40 cm) color gris y otro superior (espesor de 60 cm) color café ambos de matriz muy fina y consolidada y Unidad F (espesores de 3.15 m aprox.) de color beige a café claro y en su corona un depósito aluvial cubierto con vegetación (ver Figura No 4.11 Y 4.12)

Fuente: de los Autores



**Figura No 4.12. Representación de los materiales que conforman el talud ZF-1 sección izquierda. Ubicado sobre la Quebrada del Arenal seco. Zona Franca San Bartolo Ilopango.**

Fuente: De los Autores, fotografía tomada el 02/02/2019



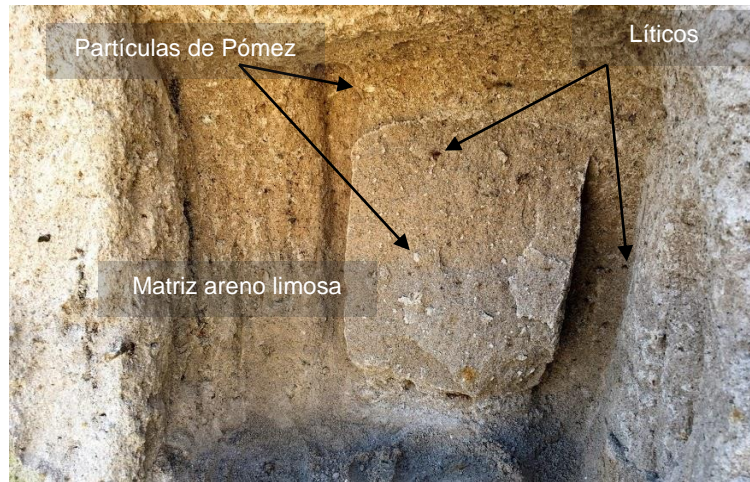
**Figura No 4.13. Representación de los materiales que conforman el talud ZF-1 sección derecha. Ubicado sobre la Quebrada del Arenal seco. Zona Franca San Bartolo Ilopango (escala en metros).**

Fuente: de los Autores, fotografía tomada el 02/02/2019



**Figura No 4.14. Representación de la apariencia de la Unidad E el talud ZF-1 sección derecha. Ubicado sobre la Quebrada del Arenal seco. Zona Franca San Bartolo Ilopango (escala en metros). Intercalación de capas húmedas y secas.**

Fuente: de los Autores, fotografía tomada el 11/01/2019



**Figura No 4.15. Representación de la apariencia de la Ignimbrita Alfa el talud ZF-1 sección derecha. Ubicado sobre la Quebrada del Arenal seco. Zona Franca San Bartolo Ilopango (escala en metros). Matriz Areno-limosa con partículas de pómez y líticos.**


*Fuente: de los Autores, fotografía del 11/01/2019*



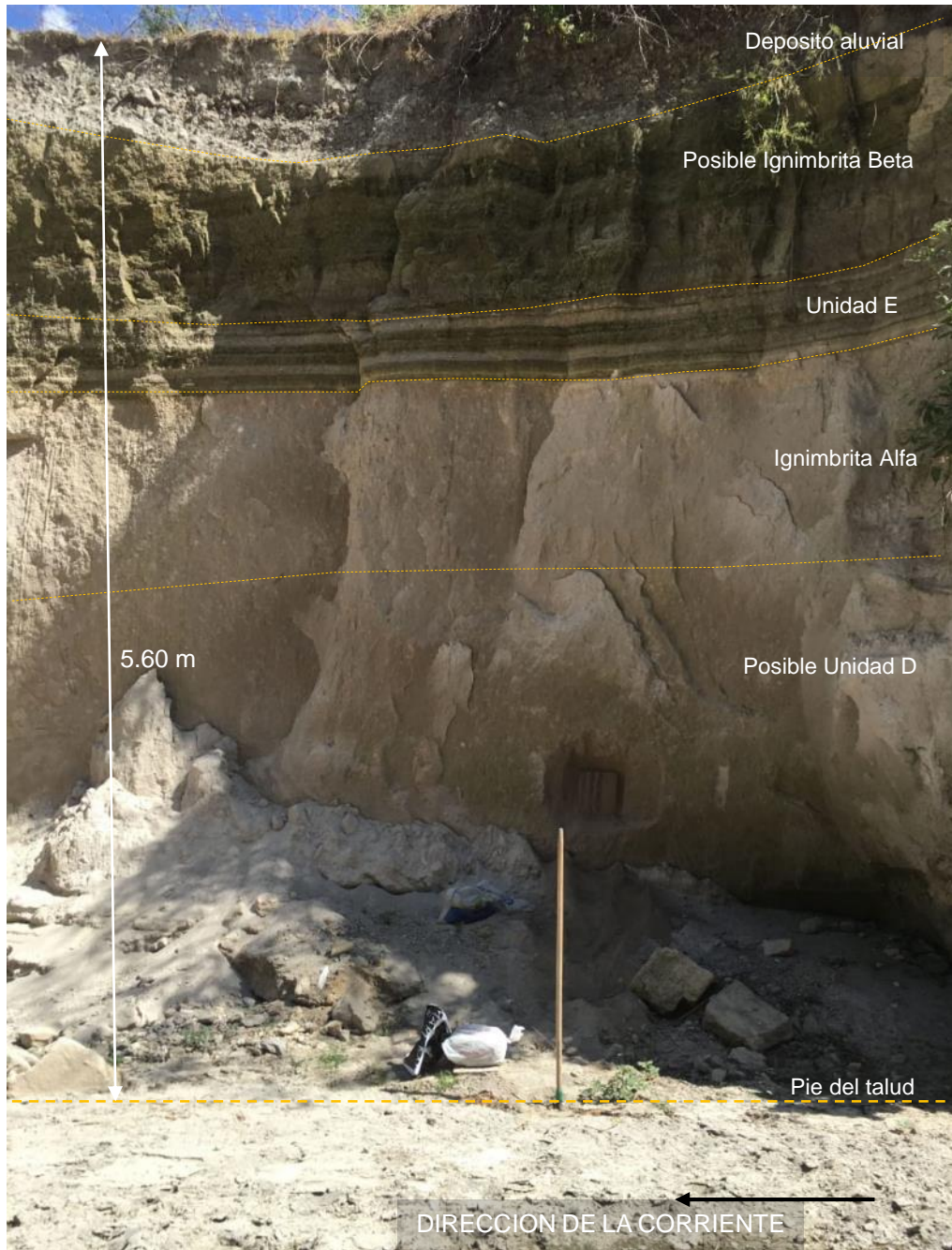
**Figura No 4.16. Representación de la apariencia de la Ignimbrita Beta (en coloración café) el talud ZF-1 sección izquierda. Ubicado sobre la Quebrada del Arenal seco. Zona Franca San Bartolo Ilopango Matriz muy fina (limo), muy consolidada.**

*Fuente: de los Autores, fotografía del 11/01/2019*

**Ficha No 4.6 Identificación y reconocimiento del punto No 6**

Nombre de talud	Talud ZF-2
 <p align="center"><b>Figura No 4.17. Ubicación del talud ZF-2 sobre la Quebrada del Arenal Seco, San Bartolo, Ilopango</b> Fuente: Google Maps</p>	
<b>Ubicación</b>	Dentro de la Zona Franca San Bartolo, delimitado al Sur- Oeste por la pista del Aeropuerto de Ilopango, al Sur con El Boulevard del Ejercito Nacional, y al costado Este con área industrial de la Zona Franca y el punto No 5 nombrado en esta investigación.
<b>Coordenadas</b>	13°42'9.44" N; 89°6'58.31" W (13.702621; -89.116196)
<b>Descripción de la zona</b>	Se tiene presencia de TBJ. Es de fácil, y adecuado para extraer muestra.
<b>Seguridad y permisos de acceso</b>	Zona relativamente segura. Es permitido el acceso para extracción de muestras
<b>Altura de Talud</b>	5.60 m
<b>Pendiente del talud</b>	Aproximadamente vertical
<b>No de unidades visibles</b>	4
<b>Posibles unidades presentes</b>	Se considera que está conformado por (desde el pie del talud hasta la corona) Unidad D de color café claro a beige, consolidado, (espesor de 2.80 m), por Ignimbrita Alfa de color rosa tenue en la corona y café claro el resto, ligeramente consolidado, (espesor de 90 cm), Unidad E (espesor de 40 cm aprox.), Ignimbrita Beta color café, consolidada (espesor de 80 cm aprox.) y depósito de suelo aluvial en la corona cubierta de vegetación.

*Fuente: de los Autores*



**Figura No 4.18. Representación de los materiales que conforman el talud ZF-2. Ubicado sobre la Quebrada del Arenal seco. Zona Franca San Bartolo Ilopingo.**

*Fuente: de los Autores, fotografía tomada el 02/02/2019*

## **Selección de lugares de exploración**

A través de los estudios que se han tomado como referencia y precedente para esta investigación, se buscó definir los lugares del AMSS en que se llevarían a cabo los estudios definitivos para caracterización de las unidades por criterios granulométricos y la determinación de sus parámetros de colapsabilidad.

Para escoger los sitios para la exploración, se atribuyeron ponderaciones a los siguientes criterios, considerados necesarios para tal fin:

- **Acceso a la zona (15%)**

Se consideró en el criterio de accesibilidad a aquellos sitios que fuesen cercanos o adyacentes a vías primarias o secundarias.

- **Seguridad de la zona (15%)**

Esta ponderación consiste en la apreciación del aspecto de seguridad social en los sitios que para la realización de los trabajos de investigación parecían ser seguros.

- **Cantidad de Unidades identificadas (50%)**

Esta ponderación recibe la mayoría del peso en esta escala al ser imprescindible que en el sitio se encuentren disponibles las unidades de TBJ para obtener la mayor cantidad posible.

- **Permisos de acceso y extracción de muestras (20%)**

Esta ponderación consiste en la concesión de permisos para proceder con la exploración en los recintos en que se encuentran los taludes compuestos por la sucesión de unidades de TBJ -del criterio anterior- y extracción de las muestras requeridas. Es importante mencionar que, al recibir una negativa como respuesta, ello significaría el descarte del sitio.

Para seleccionar los puntos definitivos para esta investigación, se siguieron los pasos descritos a continuación:

1. Comparar los criterios y condiciones que cumple cada punto visitado.
2. Analizar los criterios y condiciones que cumple cada punto.
3. Presentación de los puntos definitivos a investigar.

Para la selección de los puntos de muestreo definitivos, se seleccionarán aquellos puntos que cumplan con más del 50% de los criterios establecidos.

**Paso 1: Comparación de los criterios y condiciones que cumple cada punto visitado**

Para poder evaluar los puntos donde se realizarán la recolección de muestras necesarias para esta investigación se presenta una Tabla resumen (ver Tabla No. 4.1) con los puntos visitados de forma preliminar, y las condiciones y criterios que cumplen.

**Tabla No. 4.1. Resumen de los puntos preliminarmente visitados y los criterios a evaluar para su elección definitiva**

Punto	1	2	3	4	5	6
<b>Nombre del talud</b>	Talud No 1 UES	Talud No 2 UES	Talud No 3 UES	Taludes Padre Arrúpe	Talud ZF-1	Talud ZF-2
<b>Acceso a la zona</b>	15%	15%	15%	15%	15%	15%
<b>Seguridad de la zona</b>	15%	15%	15%	10%	10%	10%
<b>Cantidad de unidades identificadas</b>	15%	15%	15%	15%	50%	50%
<b>Permisos de acceso y de extracción de muestras</b>	20%	20%	20%	0%	20%	20%
<b>Total</b>	65%	65%	65%	40%	95%	95%

*Fuente: de los Autores*



## **Paso 2: Análisis de los criterios y condiciones que cumple cada punto.**

En base a los resultados de la Tabla No. 4.1 se puede analizar lo siguiente para cada punto preliminar:

**Punto No 1.** Este punto recibe una calificación del 65% ya que cumple con todos los criterios, sin embargo, solamente se identifica un estrato, de una posible Unidad G.

**Punto No 2.** Este punto recibe una calificación del 65%, ya que cumple con todos los criterios, sin embargo, solamente se identifica un estrato, de una posible Unidad F.

**Punto No 3.** Este punto recibe una calificación del 65% ya que cumple con todos los criterios, sin embargo, solamente se identifica un estrato, de una posible Unidad G.

**Punto No 4.** Este punto recibe una calificación del 40% identificándose un estrato que puede asociarse a la Unidad G por sus características visuales, sin embargo, fueron denegados los permisos para realizar la investigación y extracción de muestras.

**Punto No 5.** Este punto recibe una calificación del 95% ya que cumple con todos los criterios, se identificaron un mayor número de Unidades de TBJ, siendo estas: -posiblemente- Unidad F, Ignimbrita Beta, Unidad E, e Ignimbrita Alfa, de las cuales, las Ignimbritas Beta y Alfa son de fácil extracción.

**Punto No 6.** Al igual que en el punto No 5, Este punto recibe una calificación del 95% ya que cumple con todos los criterios, se identificaron preliminarmente LAS Unidades de TBJ: Ignimbrita Beta, Unidad E, Ignimbrita Alfa y Unidad D, de las cuales la posible Unidad D es de fácil extracción.

Al evaluar los resultados se pudo definir los puntos de muestreos, como aquellos que presentan el mayor puntaje, lo que se refleja en la ponderación obtenida,

siendo los puntos No 5 y 6 los que obtuvieron la mayor ponderación (95%) y los puntos 1, 2 y 3 los que tuvieron valores medios (65%), a partir de esto el único punto a no tomar en cuenta será el No 4 ya que este presentó un 40% de ponderación.

**Paso 3: Presentación de los puntos definitivos a investigar.**

De acuerdo a los criterios mostrados en la Tabla No. 4.1 de este capítulo, y del análisis descrito anteriormente, se seleccionaron cinco de los seis puntos de muestreo, en donde posteriormente se llevará a cabo la extracción de muestras. Los puntos seleccionados se muestran a continuación (ver Tabla No. 4.2):

**Tabla No. 4.2. Puntos de muestreos y taludes seleccionados para este trabajo de investigación**

Punto	Nombre del Talud	Ubicación
1	Talud No 1 UES	La Bóveda, Universidad de El Salvador
2	Talud No 2 UES	La Bóveda, Universidad de El Salvador
3	Talud No 3 UES	Cercanías de la Escuela de Ingeniería Civil, UES
5	Talud ZF-1	Sobre la Quebrada del Arenal Seco, Ilopango
6	Talud ZF-2	Sobre la Quebrada del Arenal Seco, Ilopango

*Fuente: de los Autores*

**4.5 MUESTREO**

Luego de haber determinado los lugares de exploración, se procedió a la evaluación en detalle de los taludes y a la extracción de muestras alteradas e inalteradas siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.7 del Capítulo 3, a fin de realizar los diferentes ensayos que fueron detallados en la Tabla No. 3.2 del apartado 3.8 del Capítulo 3. A continuación se detallan las unidades y tipos de muestras a extraer en los puntos seleccionados en este trabajo de graduación (ver Tablas No 4.3 y 4.4):

**Tabla No. 4.3. Sitios seleccionados para muestreo, posible unidad de TBJ a muestrear por sitio (o talud) y tipo de muestra a extraer por cada una.**

<b>Punto</b>	<b>Nombre del talud</b>		<b>Posible Unidad a Muestrear</b>	<b>Tipo de Muestra</b>
<b>No 1</b>	Talud No 1 UES		Unidad G	Alteradas e inalteradas
<b>No 2</b>	Talud No 2 UES		Unidad F superior	Alteradas e inalteradas
			Unidad F inferior	
<b>No 3</b>	Talud No 3 UES		Unidad G	Alteradas e inalteradas
<b>No 5</b>	Talud ZF-1	Sección izquierda	Ignimbrita Beta superior	Alteradas e inalteradas
			Ignimbrita Beta inferior	
		Sección derecha	Ignimbrita Alfa	
<b>No 6</b>	Talud ZF-2		Unidad D	Alteradas e inalteradas

*Fuente: de los Autores*

**Tabla No. 4.4. Registro de todas las muestras recolectadas de las diferentes exploraciones de campo, detallando la fecha y ubicación de los puntos, altura y tipo de muestra extraída, nombre asignada a cada muestra, identificación de la posible unidad a la cual pertenece.**

Fecha de muestreo	Sitio de exploración	Ubicación de Referencia	Altura de extracción (desde pie de talud) (m)	Tipo de muestra	Correlativo de muestra	Posible Identificación *	Observaciones
Viernes, 11 de enero de 2019	Z.F. Sn Bartolo, Qda Arenal Seco	13°43'11.97"N 89°9'29.7"W	3.00	Alterada	MA-1	Ignimbrita Alfa	Muestra recolectada de margen izquierda de la quebrada "Talud ZF-1". Se reconoce estrato color beige con techo rosa tenue. El material consiste en una matriz de arena con limos moderadamente consolidado, presencia de partículas pomíticas y líticos.
		13°43'11.97"N 89°9'29.7"W	3.00	Inalterada	MI-1	Ignimbrita Alfa	
		13°43'11.97"N 89°9'29.7"W	2.00	Alterada	MA-2	Ignimbrita Beta (Café)	Muestra recolectada de margen izquierda de la quebrada "Talud ZF-1". Se reconoce una matriz fina (limo) café bastante consolidada.
		13°43'11.97"N 89°9'29.7"W	2.00	Inalterada	MI-2	Ignimbrita Beta (Café)	
		13°43'11.97"N 89°9'29.7"W	1.30	Alterada	MA-3	Ignimbrita Beta (Gris)	Muestra recolectada de margen izquierda de la quebrada "Talud ZF-1". Se reconoce una matriz fina (limo) gris bastante consolidada.
		13°43'11.97"N 89°9'29.7"W	1.30	Inalterada	MI-3	Ignimbrita Beta (Gris)	

Fecha de muestreo	Sitio de exploración	Ubicación de Referencia	Altura de extracción (desde pie de talud) (m)	Tipo de muestra	Correlativo de muestra	Posible Identificación *	Observaciones
Sábado, 2 de febrero de 2019	Z.F. Sn Bartolo, Qda Arenal Seco	13°42'5.91"N 89°4'9.98"W	3.00	Alterada	MA-4	Ignimbrita Alfa	Muestra recolectada de margen izquierda de la quebrada "Talud ZF-1". Se reconoce estrato color beige con techo rosa tenue. El material consiste en una matriz de arena con limos moderadamente consolidado, presencia de partículas pomíticas y líticos.
		13°42'5.91"N 89°4'9.98"W	3.00	Inalterada	MI-4	Ignimbrita Alfa	
		13°42'5.91"N 89°4'9.98"W	2.00	Alterada	MA-5	Ignimbrita Beta (Café)	Muestra recolectada de margen izquierda de la quebrada "Talud ZF-1". Se reconoce una matriz fina (limo) café bastante consolidada.
		13°42'5.91"N 89°4'9.98"W	2.00	Inalterada	MI-5	Ignimbrita Beta (Café)	
		13°42'5.91"N 89°4'9.98"W	1.30	Alterada	MA-6	Ignimbrita Beta (Gris)	Muestra recolectada de margen izquierda de la quebrada "Talud ZF-1". Se reconoce una matriz fina (limo) gris bastante consolidada.
		13°42'5.91"N 89°4'9.98"W	1.30	Inalterada	MI-6	Ignimbrita Beta (Gris)	
		13°42'9.44"N 89°6'58.31"W	1.50	Alterada	MA-7	Unidad D	Muestra recolectada de margen derecha de la quebrada "Talud ZF-2". Se reconoce estrato color beige. El material consiste en una matriz de arena con limos moderadamente consolidado, presencia de partículas pomíticas y líticos.
		13°42'9.44"N 89°6'58.31"W	1.50	Inalterada	MI-7	Unidad D	
Lunes, 4 de febrero de 2019	Zona de Bóveda, Campus FIA - UES	13°43'19.6"N 89°12'01.4"W	1.60	Alterada	MA-8	Unidad G	Muestra tomada presenta una matriz limo-arenosa color gris claro con presencia de pómez de tamaño máximo aproximado de 10 a 15 mm, ligeramente consolidado a suelto
		13°43'19.6"N 89°12'01.4"W	1.60	Inalterada	MI-8	Unidad G	

Fecha de muestreo	Sitio de exploración	Ubicación de Referencia	Altura de extracción (desde pie de talud) (m)	Tipo de muestra	Correlativo de muestra	Posible Identificación *	Observaciones
		13°43'20.5"N 89°12'03.2"W	1.50	Alterada	MA-9	Unidad F	Muestra tomada de la sección inferior del talud, presenta una matriz areno-limosa, color beige, con partículas de pómez con tamaño máximo de 25 mm, ligeramente consolidado.
		13°43'20.5"N 89°12'03.2"W	1.50	Inalterada	MI-9	Unidad F	
		13°43'20.5"N 89°12'03.2"W	2.20	Alterada	MA-10	Unidad F	Muestra tomada de la sección superior a la anterior, presenta una matriz areno-limosa, color café claro con partículas de pómez con tamaño máximo de 25 mm, ligeramente consolidado. Se diferencian en que ese estrato es ligeramente más oscura.
		13°43'20.5"N 89°12'03.2"W	2.20	Inalterada	MI-10	Unidad F	
Miércoles, 17 de julio de 2019	Escuela de Ingeniería Civil, FIA UES	13°43'15.7"N 89°12'03.6"W	1.50	Alterada	MA-11	Unidad G	Muestra tomada consiste en una matriz muy fina de color gris claro, poco consolidada a suelta. Moderada presencia de partículas de pómez y líticos.
		13°43'15.7"N 89°12'03.6"W	1.50	Inalterada	MI-11	Unidad G	

Fuente: de los Autores

## **4.6 EJECUCIÓN DE ENSAYOS**

Para determinar tanto las propiedades físicas y parámetros de colapso de las unidades de TBJ, y para la caracterización de las mismas, se realizaron los ensayos que se detallaron en el apartado 3.8 del capítulo 3, y sus resultados se presentan en el apartado 4.7.

## **4.7 RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO**

Como se mencionó en el apartado 3.8, se realizarían pruebas de laboratorio para determinar las propiedades geotécnicas de las muestras de TBJ obtenidas. Estas propiedades geotécnicas, en particular la granulometría, fueron utilizadas para clasificar las muestras obtenidas como determinadas Unidades de TBJ al comparar con los resultados de investigaciones de referencia, a saber: Bautista et al [2016] y Cristian Gómez [2018],

Posterior a la caracterización de las muestras y definir a qué unidad de TBJ corresponden, se determinaron los parámetros de colapsabilidad de cada una.

## **RESULTADOS DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN**

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de Análisis de tamaños de partículas del suelo (ASTM D422), Determinación de contenido de humedad (ASTM D2216), Gravedad Específica (ASTM D 854), y Densidades húmedas y secas<sup>8</sup> de las muestras obtenidas.

Con el propósito de identificar las muestras obtenidas en campo con Unidades de TBJ se realizó una comparación entre curvas granulométricas obtenidas por Bautista et al [2016] y Cristian Gómez [2018] y las presentadas a continuación en Tablas 4.7, 4.9, 4.11, 4.13, 4.14, 4.16 y Gráficos 4.1 4.3, 4.4, 4.6, 4.8, 4.11, 4.13 producto de esta investigación.

---

<sup>8</sup> Las densidades fueron determinadas durante la ejecución del ensayo de Determinación del Potencial de Colapso (ASTM D 5333), ya que el anillo de consolidación utilizado en esta prueba ofrece una geometría definida que permitía la determinación de esta propiedad de una forma más exacta para cada espécimen.

Para la identificación definitiva de las unidades de TBJ estudiadas, se utilizaron los resultados promedios de los ensayos granulométricos de cada muestra.

Las consideraciones que se tomaron para comparar los resultados con las investigaciones anteriormente mencionadas fueron:

- **La misma zona de muestreo,**
- **Extracción de muestras del mismo talud, o al más cercano y,**
- **Las características físicas de los materiales identificadas in situ.**

En la Tabla No. 4.5 se presenta el listado de las muestras obtenidas, sitio de extracción, resultados de granulometría (Tablas y Gráficos) de esta investigación y las unidades de TBJ por autor de referencia:

**Tabla No. 4.5 Listado de muestras, resumen de Tablas de granulometría y curvas granulométricas de referencia para comparación.**

<b>Código</b>	<b>Sitio de extracción</b>	<b>Tamaño de partículas</b>	<b>Gráfico de curva Granulométrica</b>	<b>Unidad y autor de referencia</b>
MA-8	Talud No. 1 UES	Tabla No. 4.6	Gráfico No. 4.1	U. F y U. G Bautista et al 2016
MA-9	Talud No. 2 UES	Tabla No. 4.8	Gráfico No. 4.2	U. F Bautista et al 2016
MA-10	Talud No. 2 UES	Tabla No. 4.9	Gráfico No. 4.3	U. F Bautista et al 2016
MA-11	Talud No. 3 UES	Tabla No. 4.11	Gráfico No. 4.4	U. G Bautista et al 2016
MA-1	Talud ZF-1	Tabla No. 4.13	Gráfico No. 4.5	Ignimbrita Alfa Bautista et al 2016 y Gómez 2018
MA-2	Talud ZF-1	Tabla No. 4.14	Gráfico No. 4.6	Ignimbrita Beta Gómez 2018
MA-3	Talud ZF-1	Tabla No. 4.14	Gráfico No. 4.7	Ignimbrita Beta Gómez 2018
MA-7	Talud ZF-2	Tabla No. 4.16	Gráfico No. 4.8	MA-1, esta investigación.

*Fuente: de los Autores*



- **Talud No 1 UES. Acceso a Bóveda de Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador**

De este talud fueron extraídas las muestras codificadas en la Tabla 4.4 como MA-8 y MI-8, que consisten en muestras alteradas e inalteradas respectivamente.

Se presentan a continuación los resultados de los parámetros físicos (Ver Tablas No 4.6 y 4.7), y curvas granulométricas (Ver Gráfico No. 4.1) determinados a este material.

En el Gráfico No 4.2 se presenta la comparación de las curvas granulométricas de la muestra MA-8 promedio, con las Unidad F y G de Bautista et al (2016), como se indicó en Tabla No. 4.5.

**Tabla No. 4.6. Resultados de la humedad natural, gravedad específica, límites de consistencia y densidad húmeda y seca de la muestra MA-8**

<b>Humedad Natural</b>			
$\omega\%_1$		$\omega\%_2$	$\omega\%_{prom}$
4.2%		4.4%	4.3%
<b>Gravedad Específica</b>			
$G_{s1}$		$G_{s2}$	$G_{s_{prom}}$
2.33		2.37	2.35
<b>Límites de Consistencia</b>			
LL		LP	IP
N/A		N/A	N/A
<b>Densidades Húmedas<sup>9</sup> (kg/m<sup>3</sup>)</b>			
$Y_{w1}$	$Y_{w2}$	$Y_{w3}$	$Y_w$ promedio
1154	1192	1184	<b>1177</b>
<b>Densidades Secas (kg/m<sup>3</sup>)</b>			
$Y_{d1}$	$Y_{d2}$	$Y_{d3}$	$Y_d$ promedio
1106	1147	1159	<b>1137</b>

*Fuente: de los Autores*

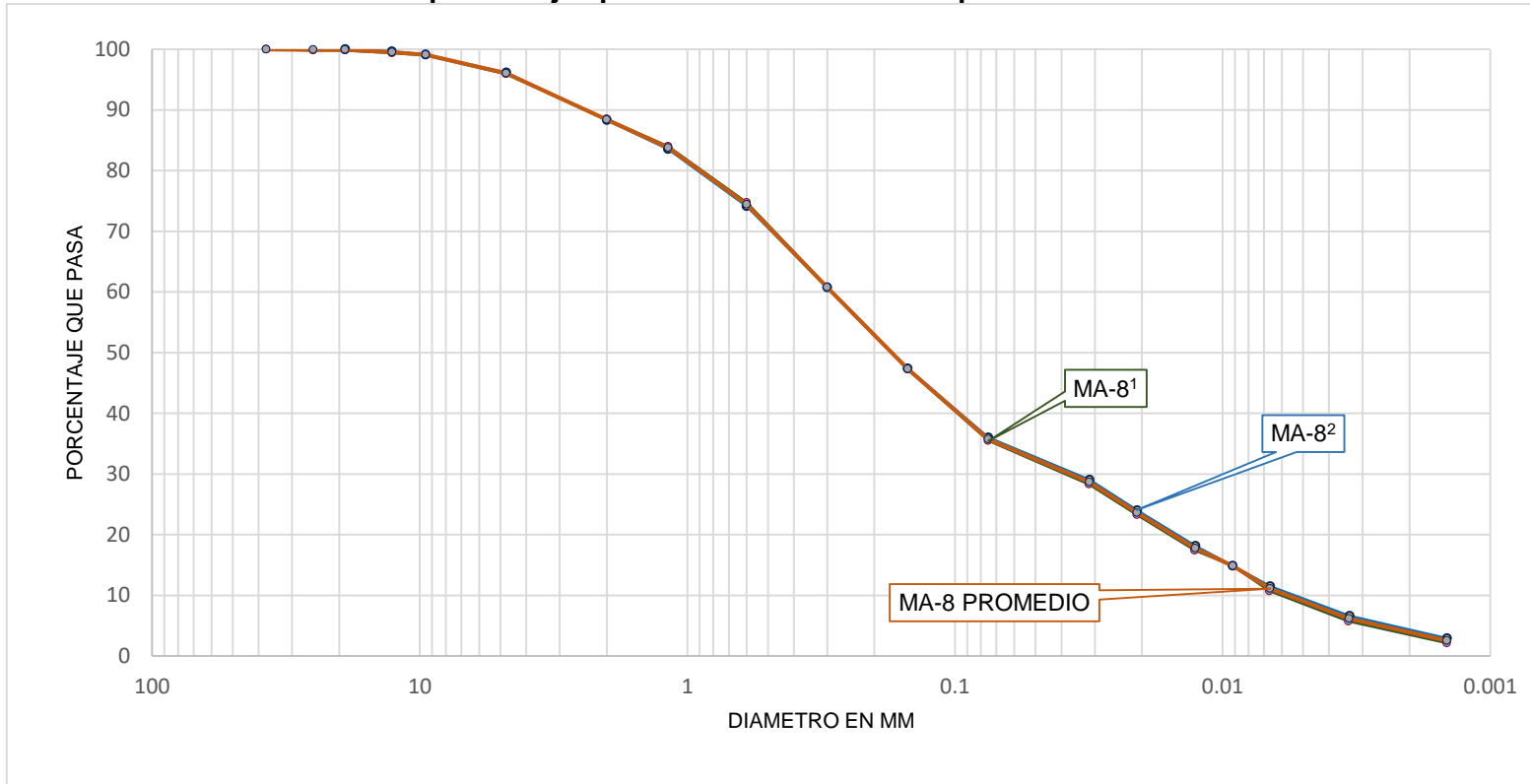
<sup>9</sup> Las densidades húmedas y secas fueron determinadas durante la ejecución del ensayo de Determinación de Potencial de Colapso, para el cual fueron utilizadas las muestras inalteradas.

**Tabla No. 4.7. Resultados granulométricos de las muestras MA-8 y el porcentaje promedio que pasa en cada malla, y comparación de resultados de la Investigación de Bautista et al (2016) para Unidades F y G**

RESULTADOS DE LA DETERMINACION DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63, REAPROBADO EN 1998)							BAUTISTA et al (2016)			
No de muestra	MA-8 <sup>1</sup>		MA-8 <sup>2</sup>		MA-8 (promedio)		Unidad G		Unidad F	
No de Malla	Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa
1 1/2"	37.5	100	37.5	-	37.5	100	37.5	-	-	-
1"	25	99.82	25	-	25	99.91	25	-	-	-
3/4"	19	99.82	19	100	19	99.91	19	-	-	-
1/2"	12.7	99.38	12.7	99.66	12.7	99.52	12.7	100	12.7	100
3/8"	9.5	99.01	9.5	99.15	9.5	99.08	9.53	99.95	9.53	98.99
No 4	4.75	95.92	4.75	96.19	4.75	96.05	4.75	99.25	4.75	97.54
No. 8	--	--	--	--	--	--	2.36	97.36	2.36	95.13
No 10	2	88.48	2	88.32	2	88.4	2	96.75	2	94.36
No 16	1.18	84	1.18	83.56	1.18	83.78	1.18	95.25	1.18	92.34
No 30	0.6	74.74	0.6	74.14	0.6	74.44	0.6	92.52	0.6	87.14
No 50	0.3	60.84	0.3	60.71	0.3	60.77	0.3	84.5	0.3	77.61
No 100	0.15	47.25	0.15	47.4	0.15	47.32	0.15	75.39	0.15	66.54
No 200	0.075	35.48	0.075	36	0.075	35.74	0.075	64.11	0.075	56.95
HIDROMETRÍA	0.0315	28.29	0.03138	29.05	0.03144	28.67	0.02994	34.35	0.03281	24.91
	0.02087	23.278	0.02083	24.01	0.02085	23.64	0.02002	29.05	0.02175	19.66
	0.01269	17.39	0.01261	18.16	0.01265	17.78	0.01221	22.94	0.01296	14.85
	0.00917	14.85	0.00916	14.85	0.00916	14.85	0.00896	18.45	0.00932	11.94
	0.00667	10.7	0.00663	11.48	0.00665	11.09	0.00651	15.2	0.00671	9.32
	0.00338	5.71	0.00335	6.59	0.00337	6.15	0.00331	9.91	0.00337	4.66
	0.00145	2.13	0.00145	2.93	0.00145	2.53	0.00142	6.76	0.00142	3.19
% de grava	4.08		3.81		3.95					
% de arena	60.44		60.18		60.31					
% de limo	29.77		29.41		29.59					
% de arcilla	3.58		3.66		3.62					
% de coloides	2.13		2.93		2.53					
% Total	100		100		100					
Clasificación	Arena con limo (SM), color gris claro, con presencia de partículas pomíticas de tamaño máximo de 1 ½" con finos No Plásticos.									

Fuente: de los Autores

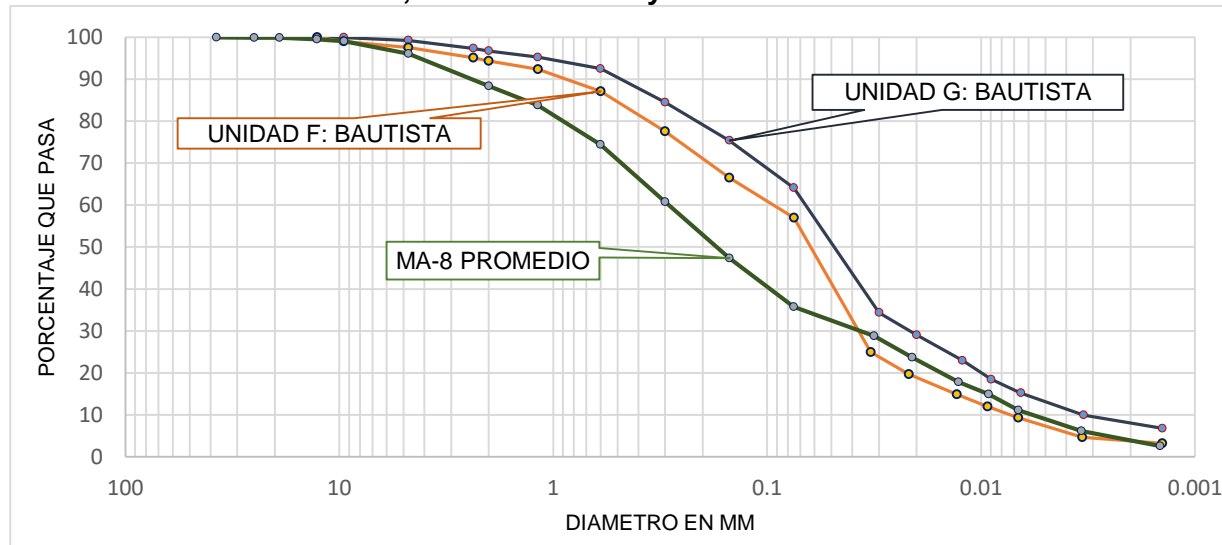
**Gráfico No 4.1. Curvas granulométricas de las muestras correspondientes a MA-8, curva promedio, y porcentajes promedios de materiales que contiene.**



<b>Gruesos</b>	<b>% de grava:</b>	3.95	<b>Finos</b>	<b>% de limo:</b>	29.59	<b>Color:</b>	Gris claro
	<b>% de arena:</b>	60.31		<b>% de arcilla:</b>	3.62	<b>Clasificación según SUCS:</b>	SM
			<b>% de coloides:</b>	2.53	<b>TM</b>	1 ½"	

Fuente: de los Autores

**Gráfico No 4.2. Comparación de curvas granulométricas promedios de la muestra MA-8 extraída del talud No 1 UES, con la unidad G y F de Bautista et al.**



Fuente: de los Autores

La muestra MA-8 es clasificada como arena con limo (SM), color gris claro con presencia de partículas pomíticas de tamaño máximo de 1 ½” con finos no plásticos. Este material es semejante a las características generales de la unidad F: que contiene una matriz de cenizas gruesas no soldadas, con abundantes fragmentos de pómez y líticos. Al comparar de la gráfica 4.2 la curva granulométrica de la MA-8 con los resultados de Bautista et al (2016) para la Unidad F, se observan diferencias marcadas en la parte gruesa de la muestra, coincidiendo en la parte final, (sin embargo sus tamaños son más cercanos a la unidad F que a la G, que contiene una granulometría más fina) por lo que se considera que la muestra MA-8 corresponde a la Unidad F, con la observación que ésta es de granulometría más gruesa que la de referencia.

- **Talud No 2 UES. Sobre la Bóveda de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador**

De este talud fueron extraídas las muestras codificadas en la Tabla No 4.4 como MA-9 y MA-10; MI-9 y MI-10, que consisten en muestras alteradas e inalteradas respectivamente.

Se presentan los resultados de los parámetros físicos y (Ver Tablas No 4.8 y 4.9), y curvas granulométricas (Ver Gráficos No 4.3 y 4.4) determinados a este material.

En el Gráfico No 4.5 se comparan las curvas granulométricas: MA-9 y MA-10 promedios, Unidad F y G de Bautista et al (2016), como se indicó en Tabla No. 4.5.

**Tabla No. 4.8. Resultados de la humedad natural, gravedad específica, límites de consistencia y densidad húmeda y seca de las muestras MA-9 y MA-10**

Humedad Natural					
Muestra	$\omega\%_1$	$\omega\%_2$	$\omega\%_{prom}$		
MA-9	6.4%	6.0%	6.2%		
MA-10	7.2%	6.5%	6.9%		
Gravedad Específica					
Muestra	$Gs_1$	$Gs_2$	$Gs_{prom}$		
MA-9	2.34	2.34	2.34		
MA-10	2.26	2.25	2.26		
Límites de Consistencia					
Muestra	LL	LP	IP		
MA-9	N/A	N/A	N/A		
MA-10	N/A	N/A	N/A		
Densidades Húmedas ( $kg/m^3$ )					
Muestra	$Y_{w1}$	$Y_{w2}$	$Y_{w3}$	$Y_{w4}$	$Y_w$ promedio
MI-9 <sup>10</sup>	1249	1211	1213	1323	1249
MI-10	1232	1212	-	-	<b>1222</b>
Densidades Seca ( $kg/m^3$ )					
Muestra	$Y_{d1}$	$Y_{d2}$	$Y_{d3}$	$Y_{d4}$	$Y_d$ promedio
MI-9	1169	1133	1136	1246	<b>1171</b>
MI-10	1187	1171	-	-	<b>1179</b>

Fuente: de los Autores

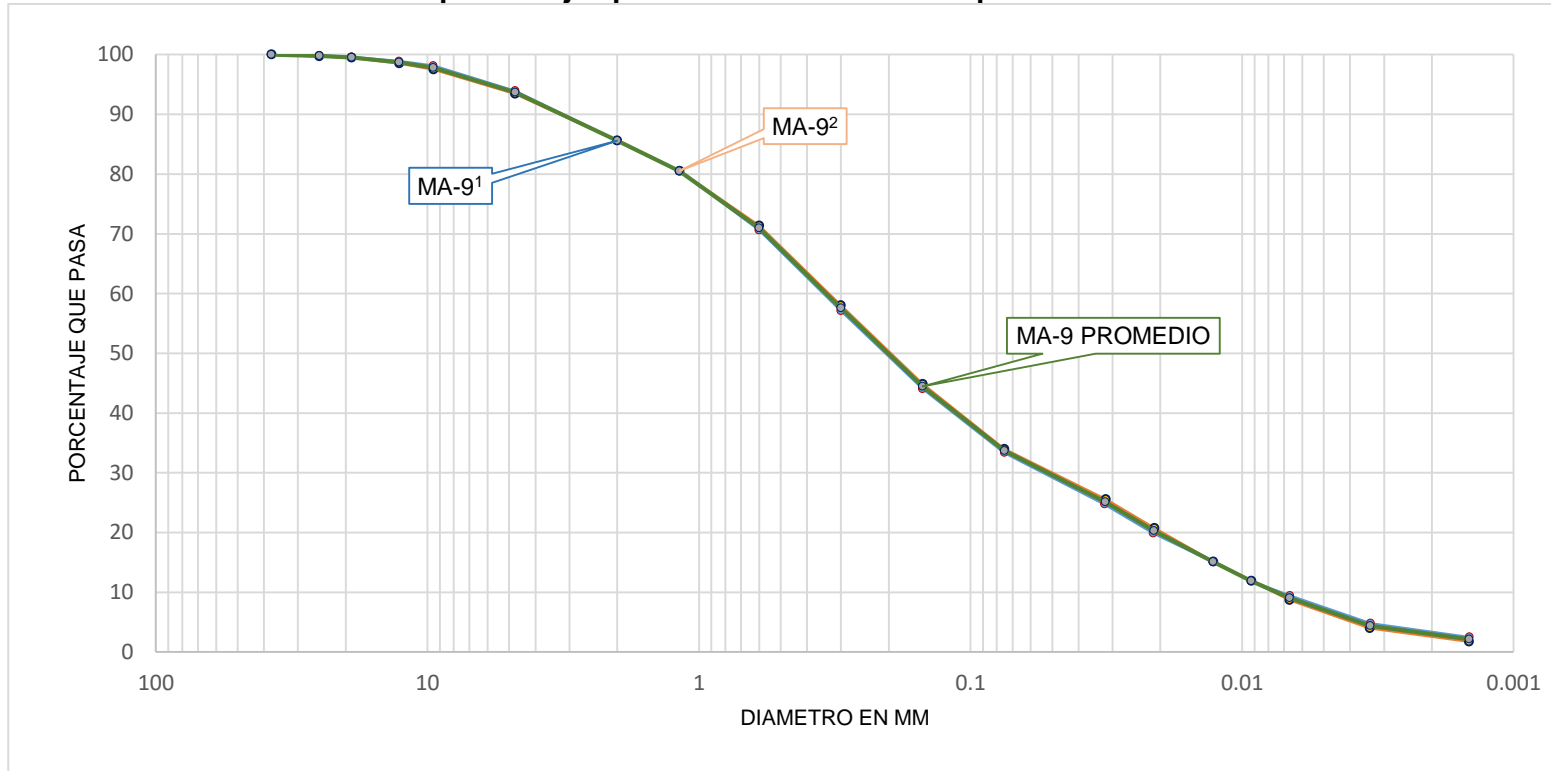
<sup>10</sup> Las densidades húmedas y secas fueron determinadas durante la ejecución del ensayo de Determinación de Potencial de Colapso, para el cual fueron utilizadas las muestras inalteradas.

**Tabla No. 4.9. Resultados granulométricos de las muestras MA-9 y MA-10 y el porcentaje promedio que pasa en cada malla, y comparación de resultados de la Investigación de Bautista et al (2016).**

RESULTADOS DE LA DETERMINACION DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63, REAPROBADO EN 1998)								BAUTISTA et al (2016)	
No de muestra		MA-9 <sup>1</sup>	MA-9 <sup>2</sup>	MA-9 (promedio)	MA-10 <sup>1</sup>	MA10 <sup>2</sup>	MA-10 (promedio)	UNIDAD F	
No de Malla	Diámetro (mm)	% que pasa	% que pasa	% que pasa	% que pasa	% que pasa	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa
1 1/2"	37.5	100	100	100	100	100	100	37.5	-
1"	25	99.83	99.7	99.77	99.43	99.49	99.46	25	-
3/4"	19	99.59	99.49	99.54	98.75	98.68	98.71	19	-
1/2"	12.7	98.89	98.52	98.71	97.4	97.47	97.43	12.7	100
3/8"	9.5	98.13	97.51	97.82	95.7	96.48	96.09	9.53	98.99
No 4	4.75	93.93	93.46	93.69	90.54	92.52	91.53	4.75	97.54
No. 8	--	--	--	--	--	--	--	2.36	95.13
No 10	2	85.54	85.62	85.58	81.95	86.12	84.04	2	94.36
No 16	1.18	80.52	80.51	80.52	76.86	80.8	78.83	1.18	92.34
No 30	0.6	70.59	71.37	70.98	66.91	69.63	68.27	0.6	87.14
No 50	0.3	57.11	58.02	57.56	52.87	54.53	53.7	0.3	77.61
No 100	0.15	44.03	44.87	44.45	40.45	41.37	40.91	0.15	66.54
No 200	0.075	33.35	33.98	33.67	30.52	31.21	30.86	0.075	56.95
HIDROMETRÍA	0.03206	24.72	25.56	25.14	23.04	23.33	23.18	0.0328	24.91
	0.02123	19.89	20.73	20.31	19.01	19.98	19.49	0.02174	19.66
	0.01278	15.06	15.13	15.09	13.41	14.92	14.16	0.01295	14.85
	0.00925	11.84	11.91	11.88	10.21	11.56	10.88	0.00931	11.94
	0.00667	9.43	8.71	9.07	7.75	9.08	8.41	0.0067	9.32
	0.00336	4.8	4	4.4	3.94	4.13	4.04	0.00336	4.66
	0.00145	2.51	1.75	2.13	1.18	1.3	1.24	0.00142	3.19
% de grava		6.07	6.54	<b>6.31</b>	9.46	7.48	<b>8.47</b>		
% de arena		60.58	59.48	<b>60.03</b>	60.03	61.3	<b>60.67</b>		
% de limo		28.55	29.99	<b>29.27</b>	26.57	27.08	<b>26.82</b>		
% de arcilla		2.29	2.24	<b>2.27</b>	2.76	2.84	<b>2.8</b>		
% de coloides		2.51	1.75	<b>2.13</b>	1.18	1.3	<b>1.24</b>		
% Total		100	100	<b>100</b>	100	100	<b>100</b>		
Clasificación		Arena con limo (SM), color beige con partículas pomíticas de tamaño máximo de 1½" con finos no plásticos.			Arena con limo (SM), color café claro con partículas pomíticas de tamaño máximo de 1½", con finos no plásticos.				

Fuente: de los Autores

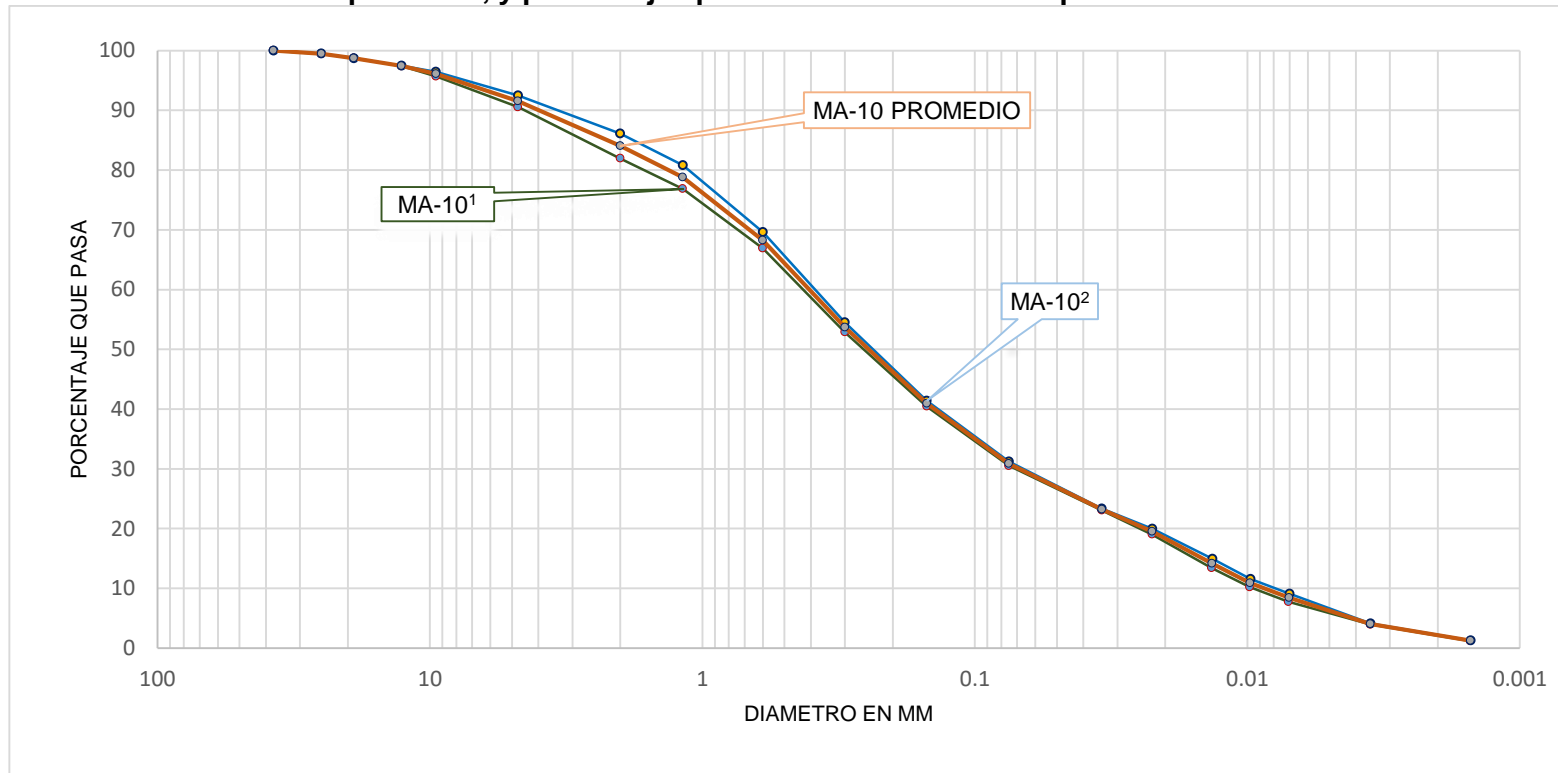
**Gráfico No 4.3. Curvas granulométricas de las muestras correspondientes a MA-9, curva promedio, y porcentajes promedios de materiales que contiene.**



<b>Gruesos</b>	<b>% de grava:</b>	6.31	<b>Finos</b>	<b>% de limo:</b>	29.27	<b>Color:</b>	Beige
	<b>% de arena:</b>	60.03		<b>% de arcilla:</b>	2.27	<b>Clasificación según SUCS:</b>	SM
			<b>% de coloides:</b>	2.13	<b>TM</b>	1 ½"	

Fuente: de los Autores

**Gráfico No 4.4. Curvas granulométricas de las muestras correspondientes a MA-10 del talud No 2 UES, su curva promedio, y porcentajes promedios de materiales que contiene.**

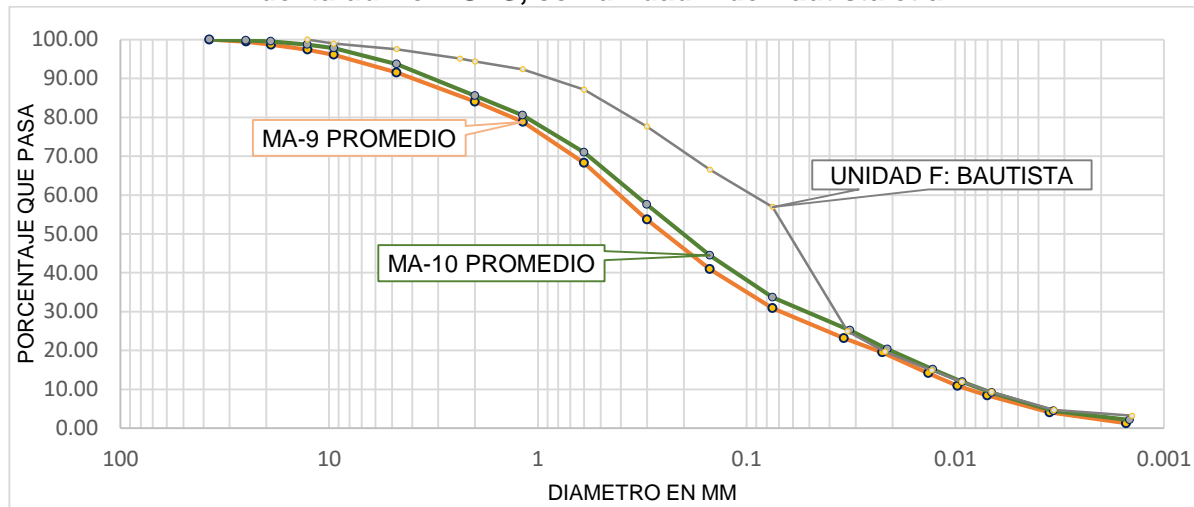


<b>Gruesos</b>	% de grava:	8.47	<b>Finos</b>	% de limo:	26.82	<b>Color:</b>	Café claro
	% de arena:	60.67		% de arcilla:	2.80		<b>Clasificación según SUCS:</b>
			% de coloides:	1.24	<b>TM</b>		1 ½"

Fuente: de los Autores



**Gráfico No 4.5. Comparación de curvas granulométricas promedios de las muestras MA-9 y MA-10 extraídas del talud No 2 UES, con unidad F de Bautista et al.**



*Fuente: de los Autores*

Se observa la notoria similitud entre las curvas de las muestras MA-9 y MA-10, por lo que se considera que se trata de la misma unidad. Ambas muestras se clasifican como Arena con limo (SM), con partículas pomíticas de tamaño máximo de 1½” y finos no plásticos, distinguiéndose únicamente por el color. De igual forma, estas propiedades se asemejan con las características de la unidad F, mencionadas anteriormente. Al comparar en el Gráfico No 4.5 las curvas granulométricas de las muestras MA-9 y MA-10 con la unidad F de Bautista et al (2016) se observan diferencias marcadas en la parte gruesa de la muestra, coincidiendo en la fracción fina, por lo que se considera que las muestras MA-9 y MA-10 corresponden a la Unidad F, con la observación que ésta es de granulometría más gruesa que la de referencia.

- **Talud No 3 UES. En las cercanías de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador.**

De este talud fueron extraídas las muestras codificadas en la Tabla No. 4.4 como MA-11 y MI-11, que consisten en muestras alteradas e inalteradas respectivamente.

Se presentan los resultados de los parámetros físicos (Ver Tablas No 4.10 y 4.11), y las curvas granulométricas (Ver Gráfico No 4.4) determinados para este material.

En el Gráfico No 4.7 se comparan las curvas granulométricas: MA-11 promedio, Unidad G de Bautista et al (2016), como se indicó en la Tabla No. 4.5.

**Tabla No. 4.10. Resultados de la humedad natural, gravedad específica, límites de consistencia y densidad húmeda y seca de la muestra MA-11**

Humedad Natural							
$\omega\%_1$		$\omega\%_2$			$\omega\%_{prom}$		
12.7%		12.9%			12.8%		
Gravedad Específica							
$G_{S1}$		$G_{S2}$			$G_{S_{prom}}$		
2.41		2.42			2.42		
Límites de Consistencia							
LL		LP			IP		
N/A		N/A			N/A		
Densidades Húmedas ( $kg/m^3$ )							
$Y_{w1}$	$Y_{w2}$	$Y_{w3}$	$Y_{w4}$	$Y_{w5}$	$Y_{w6}$	$Y_{w7}$	$Y_w$ promedio
1269	1227	1328	1274	1204	1382	1223	<b>1273</b>
Densidades Secas ( $kg/m^3$ )							
$Y_{d1}$	$Y_{d2}$	$Y_{d3}$	$Y_{d4}$	$Y_{d5}$	$Y_{d6}$	$Y_{d7}$	$Y_d$ promedio
1128	1096	1099	1049	1077	1195	1090	<b>1105</b>

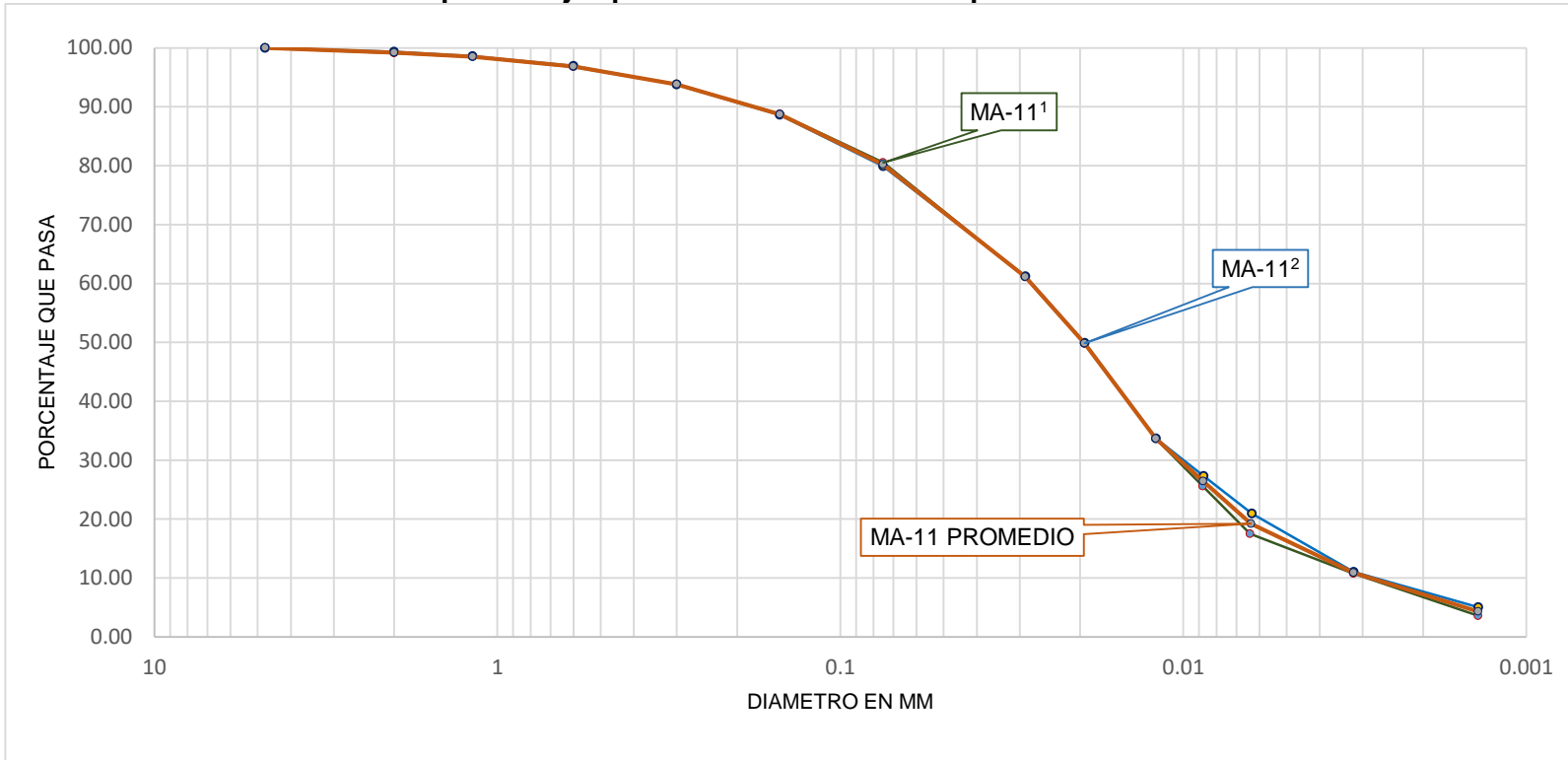
Fuente: de los Autores

Tabla No. 4.11. Resultados granulométricos de las muestras MA-11 y el porcentaje promedio que pasa en cada malla, y comparación de resultados de la Investigación de Bautista et al (2016) para Unidad G.

RESULTADOS DE LA DETERMINACION DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63, REAPROBADO EN 1998)							BAUTISTA		
No de muestra	MA-11 <sup>1</sup>		MA-11 <sup>2</sup>		MA-11 (promedio)		UNIDAD G		
No de Malla	Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa	
3/4"	19	--	--	--	--	--	19	-	
1/2"	12.7	--	--	--	--	--	12.7	100	
3/8"	9.53	--	--	--	--	--	9.53	99.95	
No 4	4.75	100	4.75	100	4.75	100	4.75	99.25	
No. 8	2.36	--	--	--	--	--	2.36	97.36	
No 10	2	99.11	2	99.34	2	99.22	2	96.75	
No 16	1.18	98.5	1.18	98.57	1.18	98.54	1.18	95.25	
No 30	0.6	96.8	0.6	96.94	0.6	96.87	0.6	92.52	
No 50	0.3	93.85	0.3	93.76	0.3	93.81	0.3	84.5	
No 100	0.15	88.79	0.15	88.64	0.15	88.71	0.15	75.39	
No 200	0.075	80.52	0.075	79.89	0.075	80.21	0.075	64.11	
HIDROMETRÍA	0.02887	61.07	0.02887	61.21	0.02887	61.14	0.02994	34.35	
	0.01939	49.77	0.01939	49.89	0.01939	49.83	0.02002	29.05	
	0.01201	33.63	0.01201	33.71	0.01201	33.67	0.01221	22.94	
	0.00877	25.56	0.00872	27.32	0.00874	26.44	0.00896	18.45	
	0.00639	17.48	0.0063	20.94	0.00634	19.21	0.00651	15.2	
	0.00319	10.74	0.00318	11	0.00318	10.87	0.00331	9.91	
	0.00138	3.55	0.00138	5.02	0.00138	4.28	0.00142	6.76	
% de grava	0		0		0				
% de arena	19.48		20.11		19.79				
% de limo	69.79		68.89		69.24				
% de arcilla	7.18		5.99		6.59				
% de coloides	3.55		5.02		4.28				
% Total	100		100		100				
Clasificación	Limo con arena (ML) color café claro, con partículas pomíticas de tamaño máximo de 4.75 mm, con finos no plásticos.								

Fuente: de los Autores

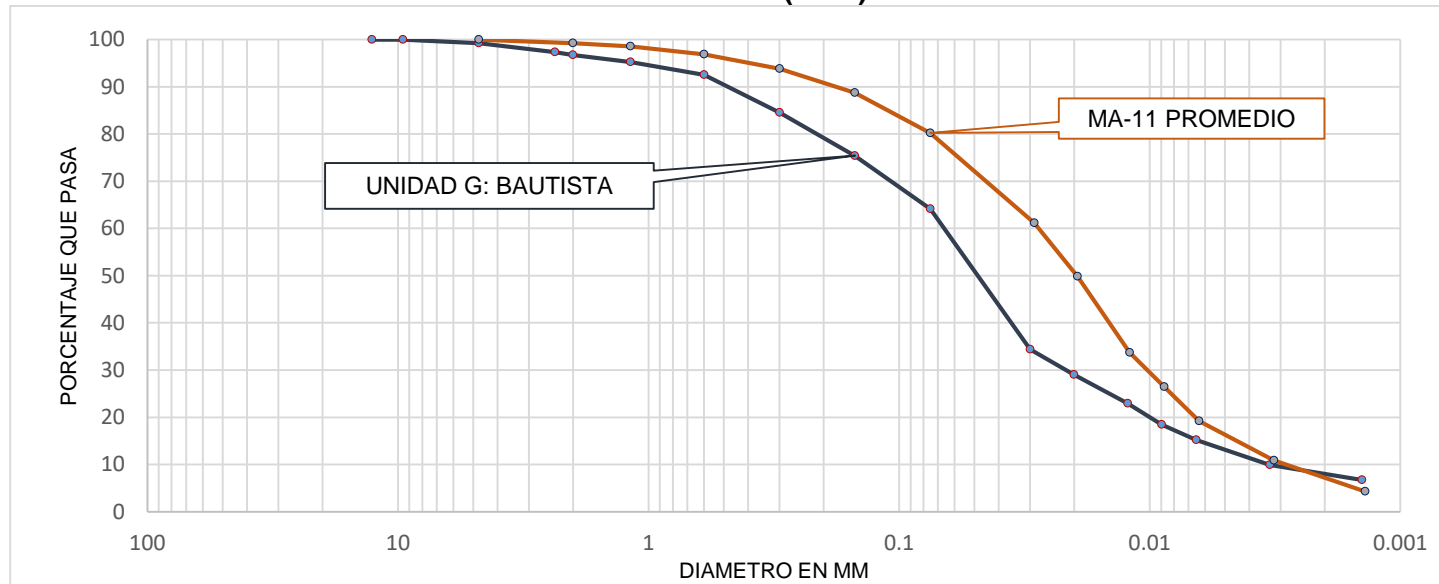
**Gráfico No 4.6. Curvas granulométricas de las muestras correspondientes a MA-11, curva promedio, y porcentajes promedios de materiales que contiene.**



<b>Gruesos</b>	<b>% de grava:</b>	0.00	<b>Finos</b>	<b>% de limo:</b>	69.24	<b>Color:</b>	Café claro
	<b>% de arena:</b>	19.79		<b>% de arcilla:</b>	6.59	<b>Clasificación según SUCS:</b>	ML
			<b>% de coloides:</b>	4.28	<b>TM</b>	4.75 mm (No 4)	

Fuente: de los Autores

**Gráfico No 4.7. Comparación de la curva granulométrica promedio de la muestra MA-11, con la unidad G de Bautista et al (2016).**



*Fuente: de los Autores*

La muestra MA-11 es clasificada como Limo con arena (ML) color café claro, con partículas pomíticas de tamaño máximo de 4.75 mm, con finos no plásticos, estas propiedades se asemejan con las características de la unidad G: Matriz de cenizas fina, no cementada y baja consolidación. Se compara en la gráfica No 4.7 la curva granulométrica de la MA-11 con los resultados de Bautista et al (2016) para la Unidad G y se observan diferencias en la fracción gruesa de la muestra, aproximándose en la fracción fina, por lo que se considera que la MA-8 como unidad G, con la observación que esta es más fina que la de referencia.

- **Talud ZF-1. Sobre la Quebrada del Arenal Seco, Zona Franca San Bartolo, Ilopango**

De este talud fueron extraídas las muestras codificadas en la Tabla No. 4.4 como MA-1, MA-2, MA-3 y MI-1, MI-2, MI-3 que consisten en muestras alteradas e inalteradas respectivamente.

Se presentan los resultados de los parámetros físicos (Ver Tablas No 4.12, 4.13 y 4.14), y las curvas granulométricas (Ver Gráfico No 4.8, 4.10 y 4.11) determinados para estos materiales.

En el Gráfico No 4.9 se comparan las curvas granulométricas: MA-1 promedio, con la Ignimbrita Alfa de Bautista et al (2016) y de Gómez (2018), como se indicó en Tabla No. 4.5.

En el Gráfico No 4.12 se comparan las curvas granulométricas: MA-2 y MA-3 promedio, con la Ignimbrita Beta 1 y 2 de Gómez (2018), como se indicó en Tabla No. 4.5.

**Tabla No. 4.12. Resultados de la humedad natural, gravedad específica, límites de consistencia y densidad húmeda y seca de las muestras MA-1, MA-2 y MA-3.**

<b>Humedad Natural</b>							
<b>Muestra</b>	$\omega\%_1$		$\omega\%_2$		$\omega\%_{prom}$		
<b>MA-1</b>	7.8%		7.5%		7.6%		
<b>MA-2</b>	19.1%		19.8%		19.4%		
<b>MA-3</b>	12.5%		12.2%		12.3%		
<b>Gravedad Específica</b>							
<b>Muestra</b>	$G_{s1}$		$G_{s2}$		$G_{s_{prom}}$		
<b>MA-1</b>	2.47		2.47		2.47		
<b>MA-2</b>	2.50		2.49		2.50		
<b>MA-3</b>	2.51		2.51		2.51		
<b>Límites de Consistencia</b>							
<b>Muestra</b>	LL		LP		IP		
<b>MA-1</b>	N/A		N/A		N/A		
<b>MA-2</b>	N/A		N/A		N/A		
<b>MA-3</b>	N/A		N/A		N/A		
<b>Densidad Húmeda (kg/m<sup>3</sup>)</b>							
<b>Muestra</b>	$Y_{w1}$	$Y_{w2}$	$Y_{w3}$	$Y_{w4}$	$Y_{w5}$	$Y_{w6}$	$Y_w$ prom
<b>MI-1</b>	1487	1494	1424	1516	1362	-	<b>1447</b>
<b>MI-2<sup>11</sup></b>	1823	1827	1528	1487	1842	1730	<b>1706</b>
<b>MI-3</b>	1787	1872	1845	1828	-	-	<b>1833</b>
<b>Densidad Seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>							
<b>Muestra</b>	$Y_{d1}$	$Y_{d2}$	$Y_{d3}$	$Y_{d4}$	$Y_{d5}$	$Y_{d6}$	$Y_d$ prom
<b>MI-1</b>	1389	1389	1325	1404	1235	-	<b>1348</b>
<b>MI-2</b>	1557	1478	1381	1337	1479	1424	<b>1443</b>
<b>MI-3</b>	1584	1670	1674	1664	-	-	<b>1648</b>

Fuente: De los Autores

<sup>11</sup> Las densidades húmedas y secas fueron determinadas durante la ejecución del ensayo de Determinación de Potencial de Colapso, para el cual fueron utilizadas las muestras inalteradas.

**Tabla No. 4.13 Resultados granulométricos de las muestras MA-1 y el porcentaje promedio que pasa en cada malla, y comparación de resultados de la Investigación de Bautista et al (2016) y Gómez (2018) para la Ignimbrita Alfa.**

RESULTADOS DE LA DETERMINACION DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63, REAPROBADO EN 1998)					GOMEZ (TALUD ZF III)		BAUTISTA (TALUD CIPRECES I)	
Numero de Muestra		MA-1 <sup>1</sup>	MA-1 <sup>2</sup>	MA-1 (promedio)	IGNIMBRITA ALFA		IGNIMBRITA ALFA	
No de Malla	Diámetro (mm)	% que pasa	% que pasa	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa
1"	25	-	100	100	25	100	25	-
3/4"	19	100	99.52	99.76	19	99.2	19	-
1/2"	12.7	99.2	98.76	98.98	12.7	-	12.7	100
3/8"	9.5	96.02	97.68	96.85	9.5	97.5	9.53	97.59
No 4	4.75	92.03	93.65	92.84	4.75	93	4.75	93.71
No 8	2.36	--	--	--	2.36	87.5	2.36	86.99
No 10	2	84.99	84.81	84.9	2	85.6	2	85.32
No 16	1.18	78.85	76.88	77.87	1.18	81	1.18	78.08
No 30	0.6	64.61	61.47	63.04	0.6	68.4	0.6	63.94
No 50	0.3	47.04	44.52	45.78	0.3	51.3	0.3	46.68
No 100	0.15	32.35	30.59	31.47	0.15	36.3	0.15	33.23
No 200	0.075	21.2	20.21	20.7	0.075	29.5	0.075	22.93
HIDROMETRÍA	0.03578	14.31	13.53	13.92	0.03578	4.2	0.03716	3.84
	0.02288	10.5	10.45	10.47	0.02288	3.6	0.02402	2.78
	0.01337	7.32	7.28	7.3	0.01337	2.9	0.01397	2.32
	0.00959	5.71	5.74	5.73	0.00959	2.3	0.00998	1.87
	0.00681	4.08	4.08	4.08	0.00681	2	0.0071	1.41
	0.00334	1.79	1.89	1.84	0.00334	1.5	0.00349	0.91
	0.00142	1.15	0.47	0.81	0.00142	1.3	0.00151	0.3
% de grava		7.97	6.35	7.16				
% de arena		70.83	73.43	72.13				
% de limo		19.41	18.32	18.87				
% de arcilla		0.64	1.41	1.03				
% de coloides		1.15	0.47	0.81				
% Total		100	100	100				
Clasificación	Arena con limo (SM) y trazas de pómez, color beige, TM 1", con finos no plásticos.							

Fuente: de los Autores

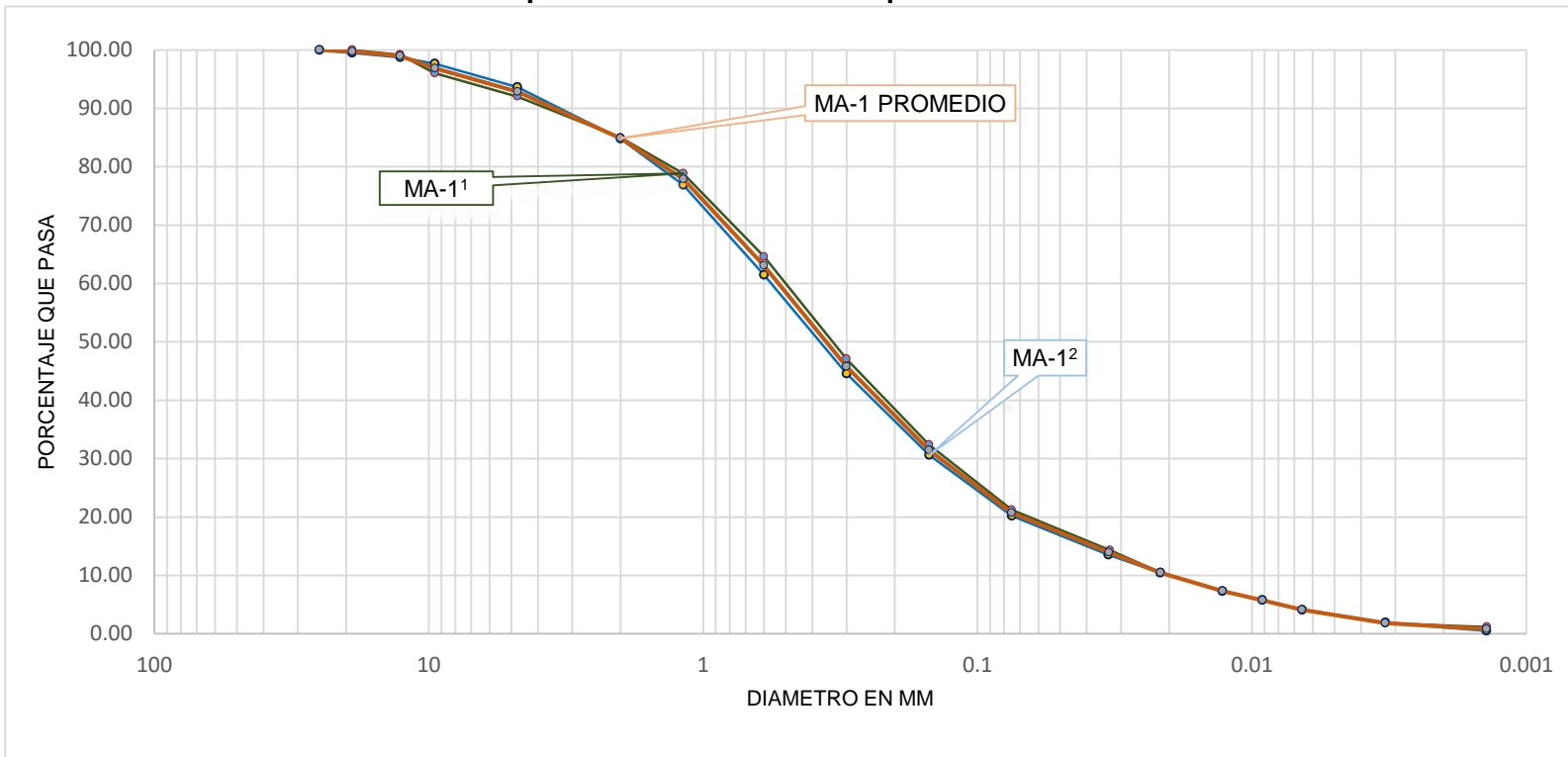


**Tabla No. 4.14 Resultados granulométricos de las muestras MA-2 y MA-3 y el porcentaje promedio que pasa en cada malla, y comparación de resultados de la Investigación de Gómez (2018) para la Ignimbrita Beta.**

RESULTADOS DE LA DETERMINACION DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63, REAPROBADO EN 1998)								GOMEZ (TALUD ZF III)			
No de muestra		MA-2 <sup>1</sup>	MA-2 <sup>2</sup>	MA-2 (promedio)	MA-3 <sup>1</sup>	MA-3 <sup>2</sup>	MA-3 (promedio)	BETA 1		BETA 2	
No de Malla	Diámetro (mm)	% que pasa	% que pasa	% que pasa	% que pasa	% que pasa	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa
No 4	4.75	--	--	--	--	--	--	4.75	100	4.75	-
No 8	2.36	--	--	--	--	--	--	2.36	99.8	2.36	-
No 10	2	100	100	100	100	100	100	2	99.6	2	100
No 16	1.18	99.58	99.77	99.68	98.08	98.92	98.5	1.18	98.9	1.18	99.9
No 30	0.6	98.59	98.8	98.7	95.76	96.69	96.23	0.6	96.6	0.6	99.6
No 50	0.3	95.2	95.26	95.23	91.86	92.82	92.34	0.3	90.9	0.3	98
No 100	0.15	87	86.45	86.72	84.19	85.07	84.63	0.15	81.8	0.15	90.6
No 200	0.075	69.49	68.6	69.04	68.53	68.13	68.33	0.075	65.9	0.075	74.4
HIDROMETRIA	0.03142	41.19	40.66	40.93	41.1	44.25	42.67	0.03539	15	0.03442	26.3
	0.02091	30.01	29.66	29.83	33.15	33.5	33.33	0.02272	12.2	0.02214	23.1
	0.01261	18.77	17.08	17.93	22.03	24.24	23.13	0.01316	10.8	0.01308	16.8
	0.00914	12.44	13.93	13.19	15.78	19.58	17.68	0.00938	9.4	0.0093	15.2
	0.00652	9.3	7.59	8.45	12.55	14.97	13.76	0.00668	6.8	0.00658	13.8
	0.00325	3.27	3.22	3.25	6.44	7.75	7.09	0.00326	5	0.00321	10.4
	0.00139	0.38	0.53	0.46	0.53	3.85	2.19	0.00139	3.9	0.00138	7.3
% de grava		0	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>				
% de arena		30.51	31.4	<b>30.96</b>	31.47	31.87	<b>31.67</b>				
% de limo		66.21	65.37	<b>65.79</b>	62.09	60.38	<b>61.24</b>				
% de arcilla		2.89	2.7	<b>2.79</b>	5.9	3.9	<b>4.9</b>				
% de coloides		0.38	0.53	<b>0.46</b>	0.53	3.85	<b>2.19</b>				
% Total		100	100	<b>100</b>	100	100	<b>100</b>				
Clasificación		Limo arenoso (ML) color café, TM 2mm, con finos no plásticos			Limo arenoso (ML) color gris, TM 2mm, con finos no plásticos						

Fuente: de los Autores

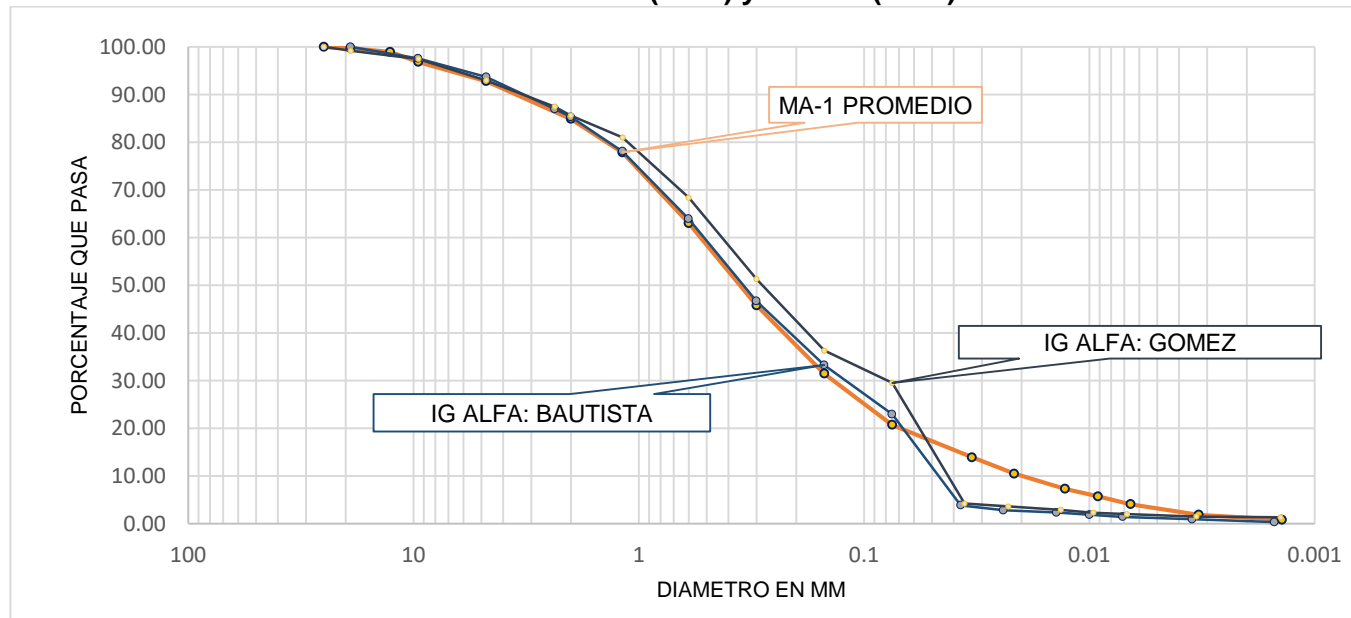
**Gráfico No 4.8. Curvas granulométricas de las muestras correspondientes a MA-1, curva promedio, y porcentajes promedios de materiales que contiene.**



<b>Gruesos</b>	<b>% de grava:</b>	7.16	<b>Finos</b>	<b>% de limo:</b>	18.87	<b>Color:</b>	Color beige
	<b>% de arena:</b>	72.13		<b>% de arcilla:</b>	1.03		<b>Clasificación según SUCS:</b>
			<b>% de coloides:</b>	0.81	<b>TM</b>		1"

Fuente: de los Autores

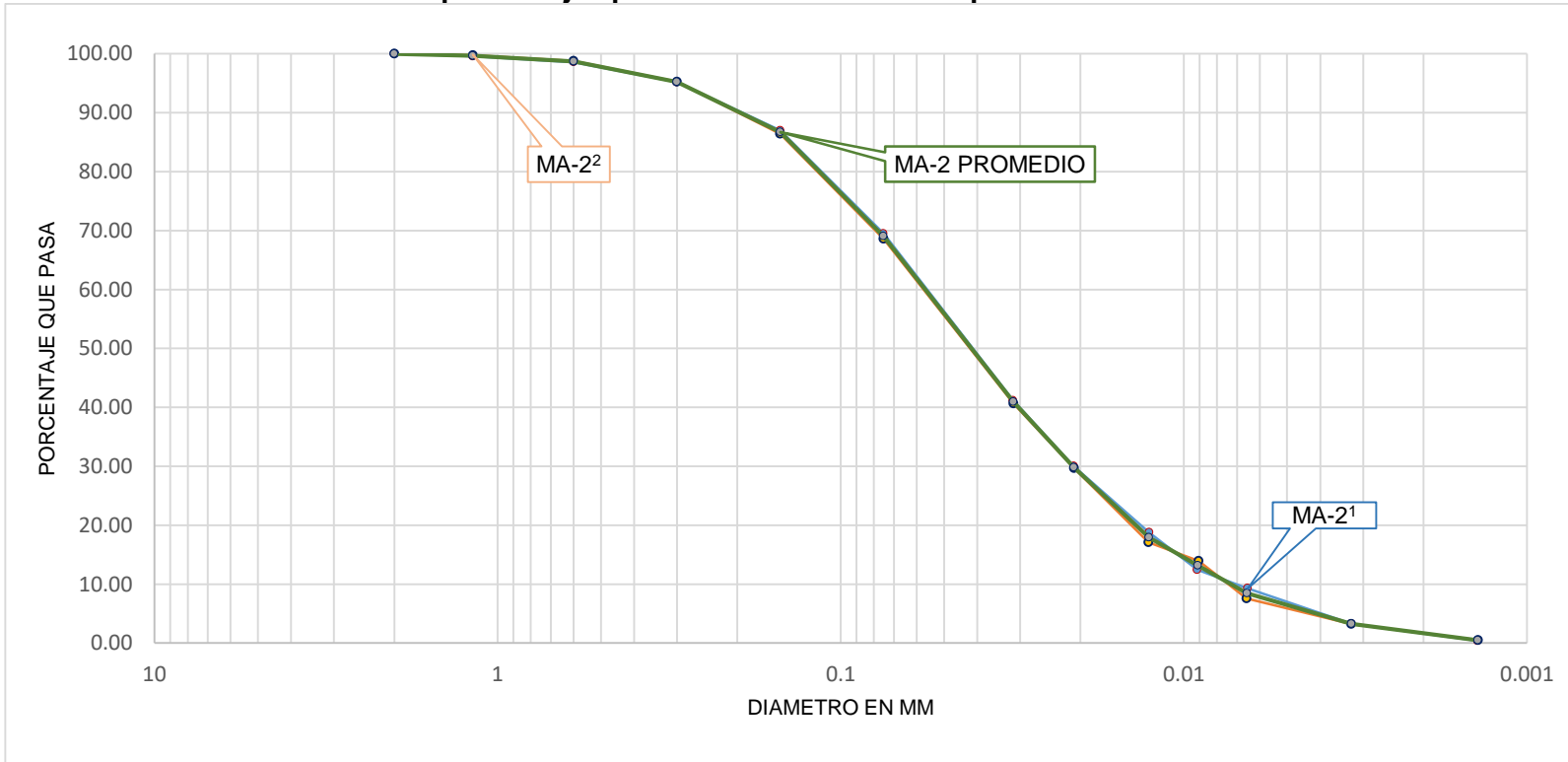
**Gráfico No 4.9. Comparación de curvas granulométricas promedio de la muestra MA-1, con Ignimbrita Alfa de Bautista et al (2016) y Gómez (2018).**



*Fuente: de los Autores*

La muestra MA-1 es clasificada como arena con limo y trazas de pómez, color beige, TM 1", con finos no plásticos, estas propiedades se asemejan con las características generales de la Ignimbrita Alfa: Matriz rica en cenizas finas, presencia de pómez y líticos, con cierto grado de cementación, Al comparar en la gráfica No 4.9 las curvas granulométricas de la MA-1 con los resultados de Bautista et al (2016) y Gómez (2018) para la Ignimbrita Alfa y se observa la aproximación entre estas, por lo que se considera la muestra MA-1 como Ignimbrita Alfa.

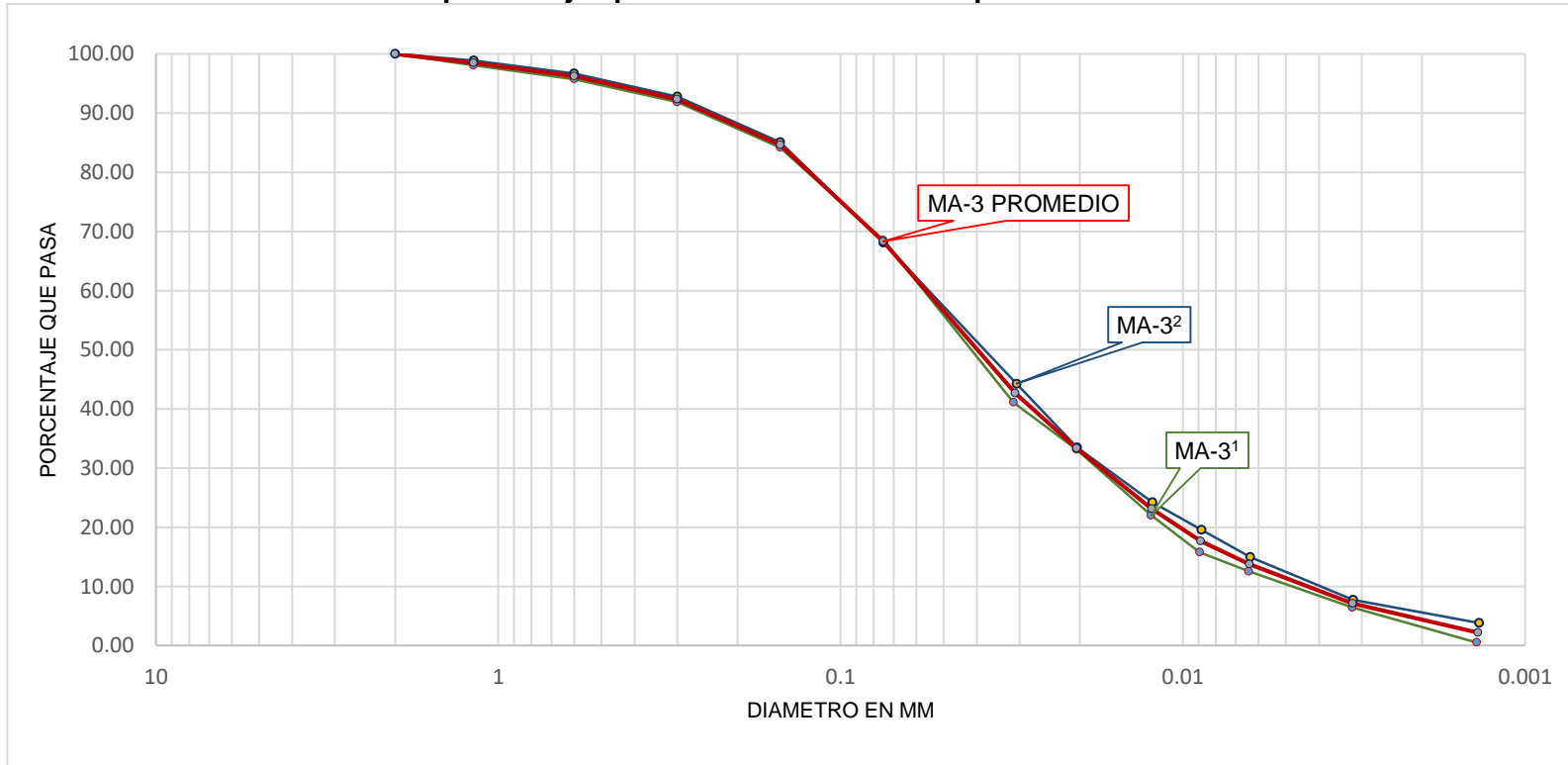
**Gráfico No 4.10. Curvas granulométricas de las muestras correspondientes a MA-2, curva promedio, y porcentajes promedios de materiales que contiene.**



<b>Gruesos</b>	<b>% de grava:</b>	0.00	<b>Finos</b>	<b>% de limo:</b>	65.79	<b>Color:</b>	café
	<b>% de arena:</b>	30.96		<b>% de arcilla:</b>	2.79		<b>Clasificación según SUCS:</b>
			<b>% de coloides:</b>	0.46	<b>TM</b>	2 mm (No 10)	

Fuente: de los Autores

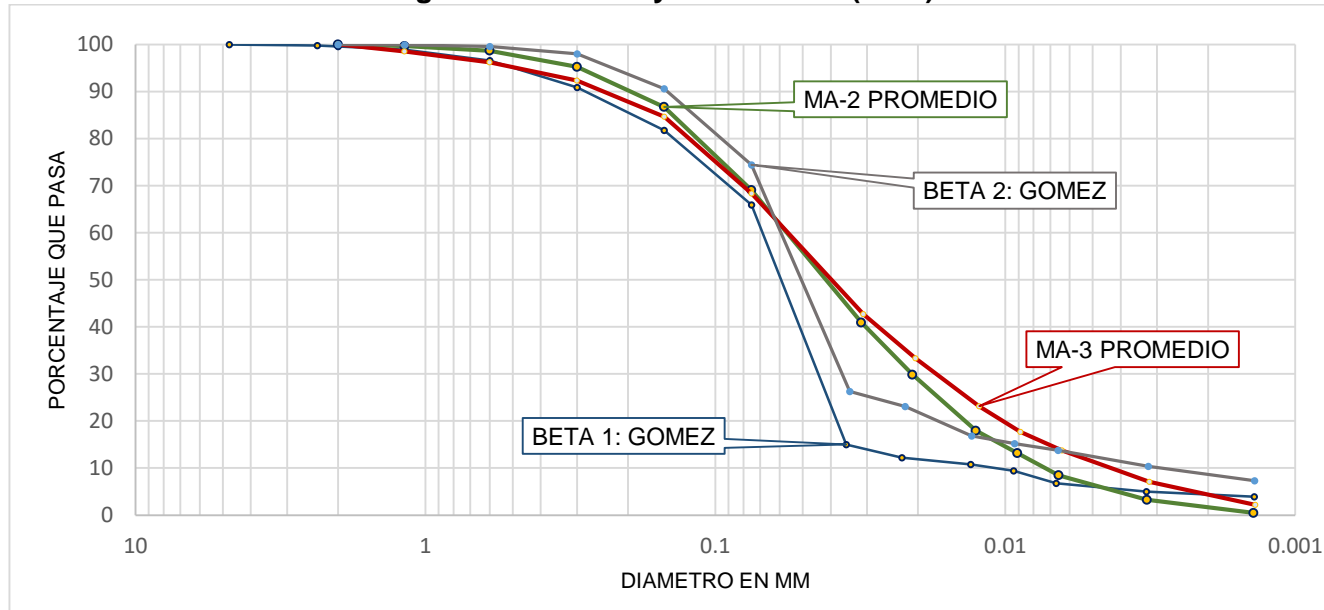
**Gráfico No 4.11. Curvas granulométricas de las muestras correspondientes a MA-3, curva promedio, y porcentajes promedios de materiales que contiene.**



<b>Gruesos</b>	<b>% de grava:</b>	0.00	<b>Finos</b>	<b>% de limo:</b>	61.24	<b>Color:</b>	Color gris
	<b>% de arena:</b>	31.67		<b>% de arcilla:</b>	4.90		<b>Clasificación según SUCS:</b>
			<b>% de coloides:</b>	2.19	<b>TM</b>		2 mm (No 10)

Fuente: de los Autores

**Gráfico No 4.12. Comparación de curvas granulométricas promedio de la muestra MA-2 y MA-3, con Ignimbrita Beta 1 y 2 de Gómez (2018).**



*Fuente: de los Autores*

Las muestras MA-2 y MA-3 son clasificadas como limo arenoso, TM 2mm, con finos no plásticos, siendo la diferencia entra ambas su color, estas se asemejan a las propiedades de la Ignimbrita Beta: Ignimbrita muy compacta con abundante matriz fina y presencia moderada de pómez y líticos. En el Gráfico No 4.12 se comparan las curvas granulométricas de las muestras MA-2 y MA-3 con las curvas de Ignimbrita Beta 1 y 2 de Gómez (2018) y se observa la aproximación entre las curvas, por lo que se considera que estas muestras corresponden a la Ignimbrita Beta.

- **Talud ZF-2 Sobre la Quebrada del Arenal Seco, Zona Franca San Bartolo, Ilopango**

De este talud fueron extraídas las muestras codificadas en la Tabla No. 4.4 como MA-7 y MI-7, que consisten en muestras alteradas e inalteradas respectivamente.

Se presentan los resultados de los parámetros físicos (Ver Tablas No 4.15 y 4.16), y las curvas granulométricas (Ver Gráfico No 4.4) determinados para este material.

En el Gráfico No 4.14 se comparan las curvas granulométricas: MA-7 MA-1 (Ignimbrita Alfa), como se indicó en Tabla No. 4.5.

**Tabla No. 4.15. Resultados de la humedad natural, gravedad específica, límites de consistencia y densidad húmeda y seca de la muestra MA-7**

<b>Humedad Natural</b>		
<b><math>\omega\%_{01}</math></b>	<b><math>\omega\%_{02}</math></b>	<b><math>\omega\%_{prom}</math></b>
6.0	6.2	6.1
<b>Gravedad Específica</b>		
<b><math>Gs_1</math></b>	<b><math>Gs_2</math></b>	<b><math>Gs_{prom}</math></b>
2.46	2.44	2.45
<b>Límites de Consistencia</b>		
<b>LL</b>	<b>LP</b>	<b>IP</b>
N/A	N/A	N/A
<b>Densidad húmeda (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
<b><math>Y_{w1}</math></b>	<b><math>Y_{w2}</math></b>	<b><math>Y_{w prom}</math></b>
1431	1494	<b>1463</b>
<b>Densidad seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
<b><math>Y_{d1}</math></b>	<b><math>Y_{d2}</math></b>	<b><math>Y_{d prom}</math></b>
1332	1389	<b>1360</b>

*Fuente: de los Autores*

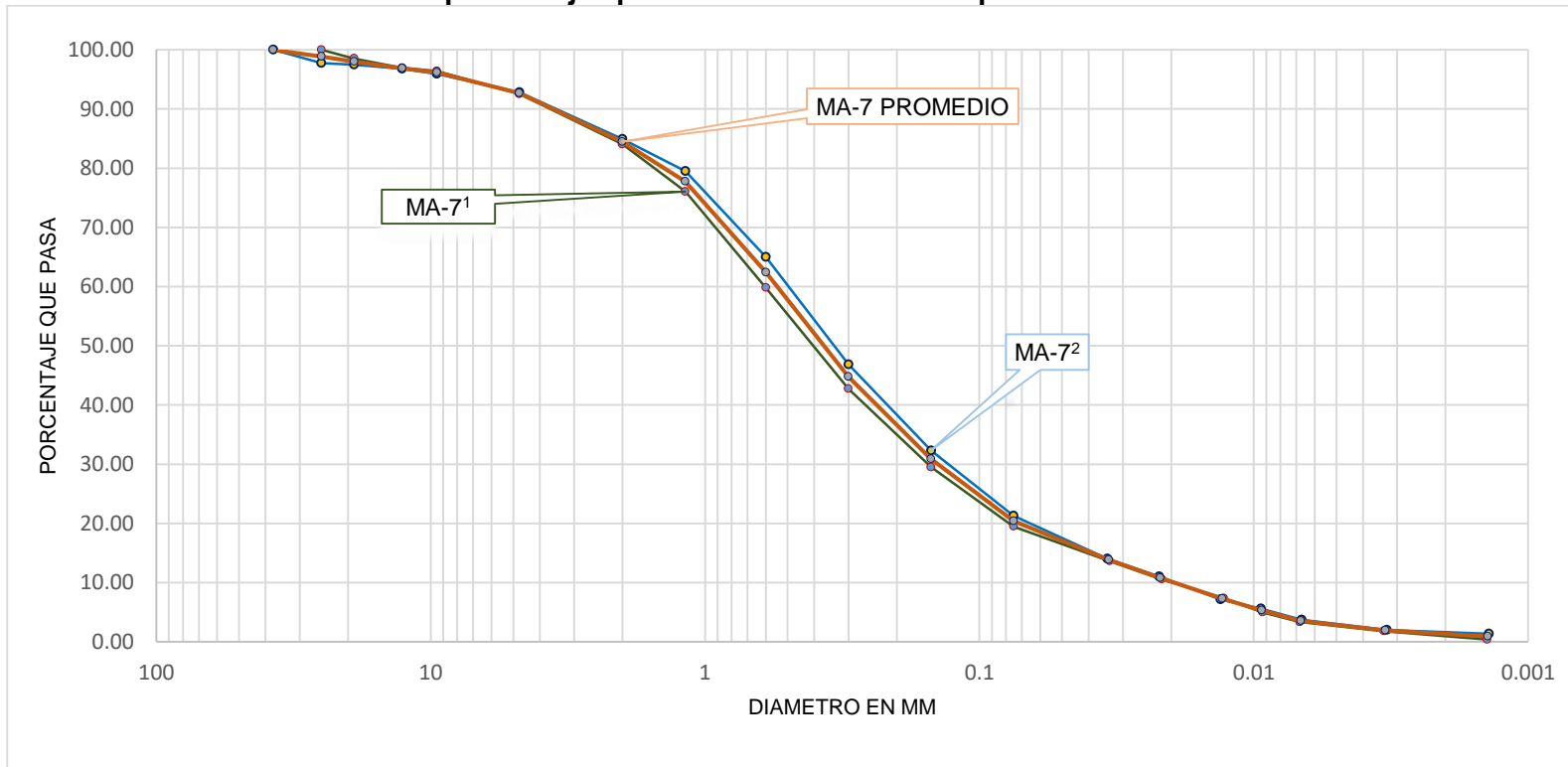
**Tabla No 4.16. Resultados granulométricos de la muestra MA-7 y el porcentaje promedio que pasa en cada malla.**

<b>RESULTADOS DE LA DETERMINACION DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63, REAPROBADO EN 1998)</b>					
<b>No de muestra</b>		<b>MA-71</b>	<b>MA-72</b>	<b>MA-7 (promedio)</b>	<b>MA-1 (promedio)</b>
<b>No de Malla</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>% que pasa</b>	<b>% que pasa</b>	<b>% que pasa</b>	<b>% que pasa</b>
<b>1 1/2"</b>	37.5	-	100	100	-
<b>1"</b>	25	100	97.74	98.87	100
<b>3/4"</b>	19	98.52	97.46	97.99	99.76
<b>1/2"</b>	12.7	96.93	96.76	96.84	98.98
<b>3/8"</b>	9.5	96.4	95.94	96.17	96.85
<b>No 4</b>	4.75	92.53	92.82	92.67	92.84
<b>No 10</b>	2	84.05	84.9	84.47	84.9
<b>No 16</b>	1.18	76.04	79.49	77.77	77.87
<b>No 30</b>	0.6	59.81	65.01	62.41	63.04
<b>No 50</b>	0.3	42.72	46.87	44.79	45.78
<b>No 100</b>	0.15	29.49	32.29	30.89	31.47
<b>No 200</b>	0.075	19.48	21.3	20.39	20.7
<b>HIDROMETRÍA</b>	0.03344	13.63	14.03	13.83	13.92
	0.02164	10.56	11	10.78	10.47
	0.01285	7.37	7.17	7.27	7.3
	0.00927	4.98	5.6	5.29	5.73
	0.00678	3.34	3.73	3.53	4.08
	0.00336	1.8	2	1.9	1.84
	0.00141	0.39	1.37	0.88	0.81
<b>% de grava</b>		7.47	<b>7.18</b>	7.33	7.16
<b>% de arena</b>		73.05	<b>71.52</b>	72.29	72.13
<b>% de limo</b>		17.67	<b>19.3</b>	18.49	18.87
<b>% de arcilla</b>		1.41	<b>0.63</b>	1.02	1.03
<b>% de coloides</b>		0.39	<b>1.37</b>	0.88	0.81
<b>% Total</b>		100	<b>100</b>	100	100
Clasificación	SM. Arena con limo y trazas de pómez, color café claro a beige, TM 1 1/2", con finos no plásticos				

*Fuente: de los Autores*



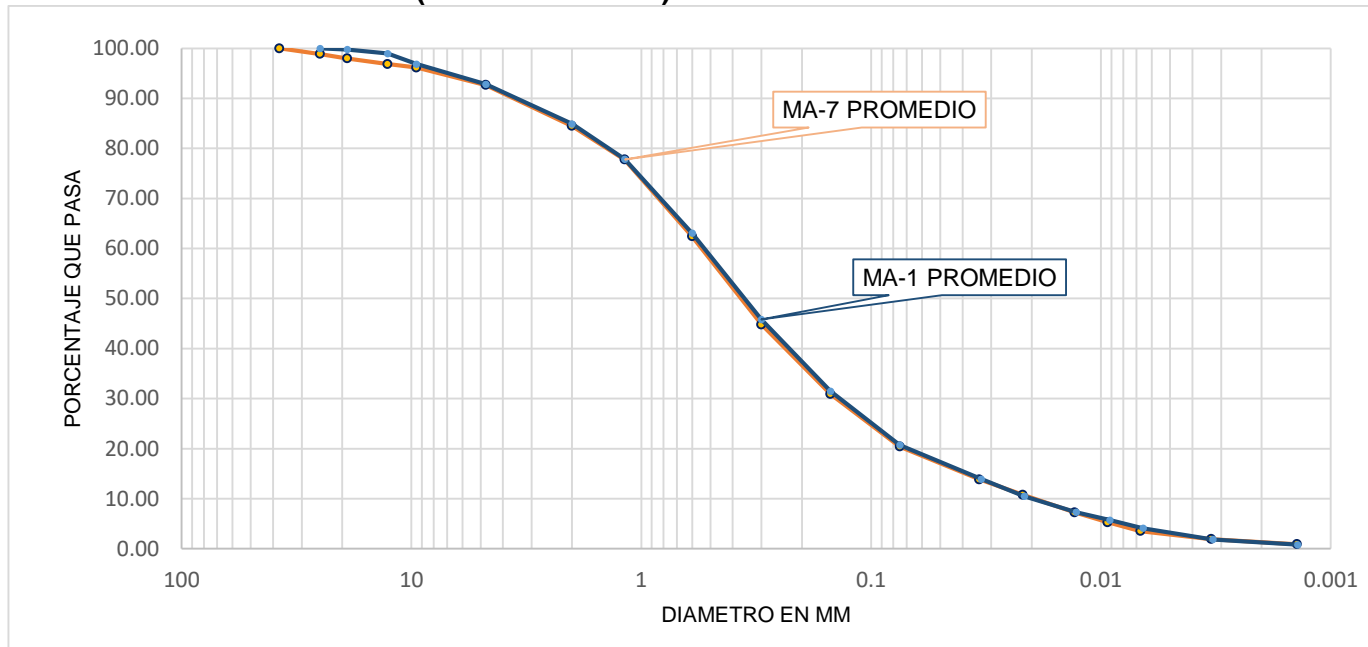
**Gráfico No 4.13. Curvas granulométricas de las muestras correspondientes a MA-7, curva promedio, y porcentajes promedios de materiales que contiene.**



<b>Gruesos</b>	% de grava:	7.33	<b>Finos</b>	% de limo:	18.49	<b>Color:</b>	café claro a beige
	% de arena:	72.29		% de arcilla:	1.02	<b>Clasificación según SUCS:</b>	SM
			% de coloides:	0.88	<b>TM</b>	1 ½"	

Fuente: de los Autores

**Gráfico No 4.14. Comparación de curvas granulométricas promedio de las muestras MA-1 extraída del talud ZF-1(extremo derecho) con MA-7 extraída el talud ZF-2.**



*Fuente: de los Autores*

La muestra MA-1 es clasificada como arena con limo y trazas de pómez, color café claro a beige, TM 1", con finos no plásticos, estas propiedades se asemejan con las características generales de la Ignimbrita Alfa: Matriz rica en cenizas finas, presencia de pómez y líticos, con cierto grado de cementación en la base, Al comparar en la gráfica No 4.14 las curvas granulométricas de la MA-1 MA-7, se observa similitud entre ambas curvas, por lo que se considera que la muestra MA-7 corresponde a la Ignimbrita Alfa.

## 4.8 RESUMEN DE LAS UNIDADES OBTENIDAS

Bajo las comparaciones realizadas anteriormente se clasificó por criterios de granulometría a las muestras obtenidas con determinadas Unidades de TBJ, como se presenta en la Tabla No. 4.17 en resumen la identificación de estas:

**Tabla No. 4.17. Resumen de muestras ensayadas e identificación de las unidades a las que pertenecen**

Punto	Nombre de talud	Muestra	Unidad identificada
No 5	Talud ZF-1	MA-1	Ignimbrita Alfa
		MA-2	Ignimbrita Beta Café
		MA-3	Ignimbrita Beta Gris
No 6	Talud ZF-2	MA-7	Ignimbrita Alfa
No 1	Talud No 1 UES	MA-8	Unidad F
No 2	Talud No 2 UES	MA-9	Unidad F
		MA-10	Unidad F
No 3	Talud No 3 UES	MA-11	Unidad G

*Fuente: de los Autores*

Para la caracterización de los parámetros de colapsabilidad, dado que se encontraron varias unidades F y Alfa, se tomó la decisión de seleccionar una sola unidad para este fin, tomando en cuenta la facilidad de extracción de las muestras, según se muestra en la Tabla No. 4.18:

**Tabla No. 4.18. Unidades a las que se les practicaran la prueba colapso para este trabajo.**

Punto	Nombre de talud	Muestra	Unidad identificada
No 5	Talud ZF-1	MA-1	Ignimbrita Alfa
		MA-2	Ignimbrita Beta Café
		MA-3	Ignimbrita Beta Gris
No 2	Talud No 2 UES	MA-9	Unidad F
No 3	Talud No 3 UES	MA-11	Unidad G

*Fuente: de los Autores*

## **4.9 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE COLAPSO**

Para la determinación de los parámetros de Índice, Potencial y Grado se tomó de referencia la norma de ensayo ASTM D 5333, y se redactó un manual para la ejecución del ensayo, basado en la designación antes mencionada (ver ANEXO A).

El índice de Colapso, fue determinado a un esfuerzo axial de 200 kPa, el Potencial a un esfuerzo de 950 kPa. Para las muestras en condición natural, se les determinó ambos parámetros, en cuanto a las muestras compactadas, únicamente se les determino el potencial.

## **4.10 RESULTADOS DE ENSAYOS DE COLAPSABILIDAD**

En los siguientes sub-apartados se presentan los resultados de los ensayos de colapsabilidad en estado natural ejecutados a las distintas unidades de TBJ que fueron seleccionadas anteriormente en este apartado (ver Tabla No. 4.18) para este trabajo de investigación.

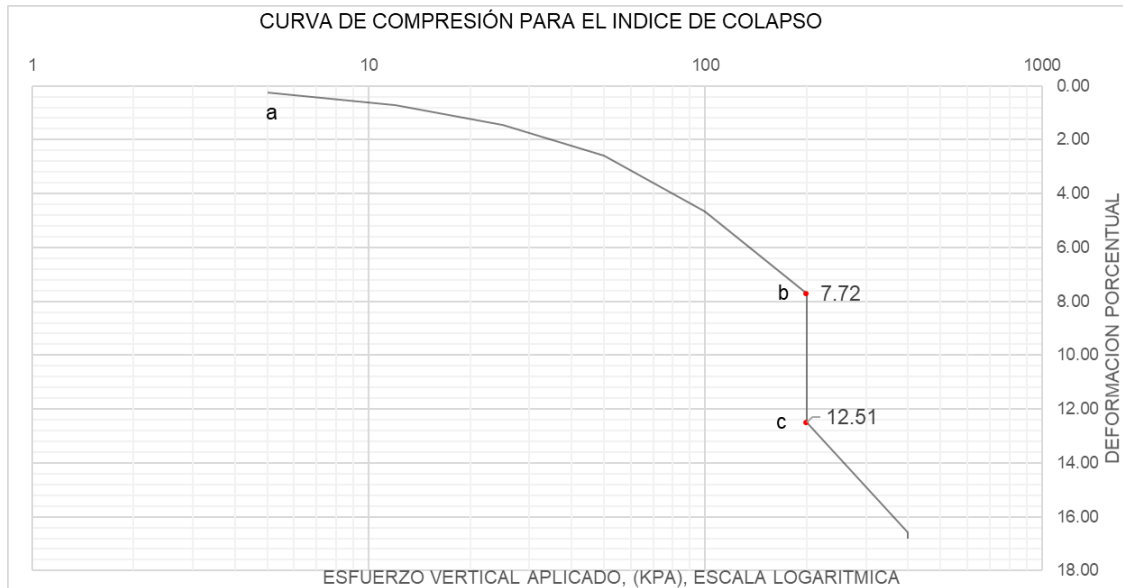
En las Tablas No 4.19 a la 4.23 se tabularon los resultados de los ensayos para determinar el Índice o el Potencial de Colapso de las unidades de TBJ. Además, se muestran parámetros de humedad, densidad y relación de vacíos antes y después del ensayo.

Luego se reportan los resultados de la determinación de la Relación Densidad-Humedad a las unidades F y G (ver Tablas No 4.24 y 4.25), unidades a las que se les realizó también el ensayo de determinación de Potencial de colapso, a muestras compactadas con variación de humedad en  $\pm 2\%$  de la humedad optima (ver Tablas No 4.26 y 4.27).

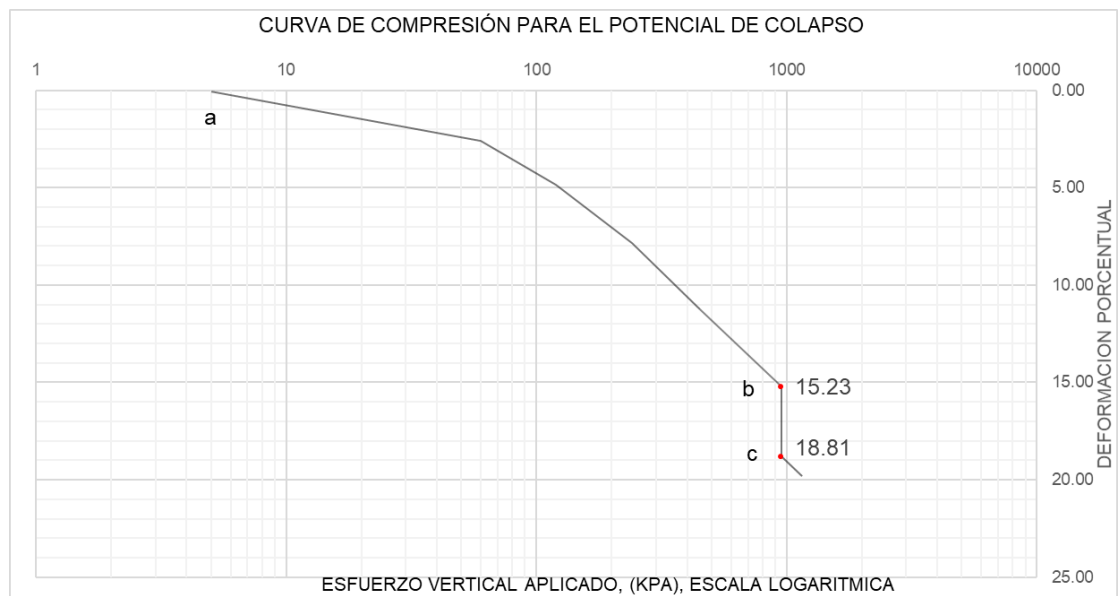
**Tabla No. 4.19. Resultados de ensayos de Colapsabilidad de la muestra MI-11 correspondiente a la Unidad G, según norma ASTM D5333.**

UNIDAD / PRUEBA/ Ensayo No.		Condiciones iniciales					Condiciones finales			Parámetros de colapso		
		$\omega$ (%)	Sat (%)	$\gamma_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_i$	$\omega_{sat}$ (%)	$\gamma_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_f$	$I_e / I_c$ (%)	Grado de colapso	
<b>G (MI-11)</b>	INDICE	40	12.5%	26.4%	1269	1128	1.15	34.5%	1825	0.78	4.80%	Moderado
		58	12.0%	24.0%	1227	1096	1.21	37.6%	1712	0.94	4.20%	Moderado
		44	20.9%	42.0%	1329	1099	1.20	38.4%	1617	1.07	1.00%	Ligero
		45	21.5%	39.7%	1274	1049	1.31	43.1%	1931	1.12	1.60%	Ligero
	POTENCIAL	38	11.8%	23.0%	1204	1077	1.25	35.1%	1814	0.80	3.60%	Moderado
		39	15.7%	37.0%	1382	1195	1.03	33.0%	1968	0.64	3.90%	Moderado
		59	12.3%	24.3%	1223	1090	1.22	36.7%	1765	0.87	3.30%	Moderado

Fuente: De los Autores



a) Curva del ensayo de determinación de índice de colapso No. 40.



b) Curva del ensayo de determinación de potencial de colapso No. 38

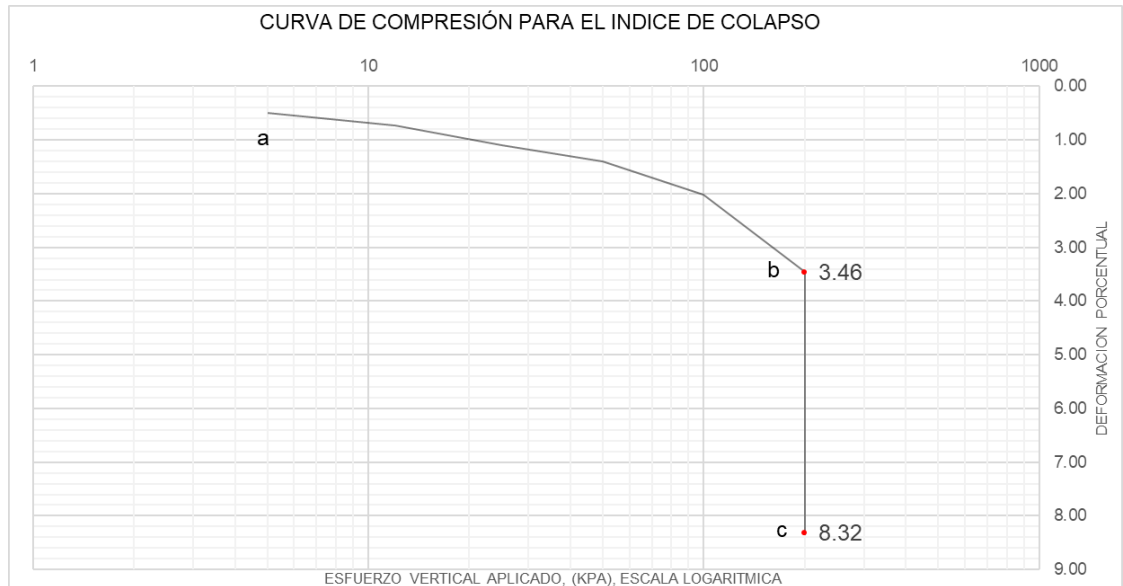
**Figura No 4.16 Resultados de curvas de pruebas de colapso aplicado en muestras en estado natural de la unidad G del talud No 3 UES. a) Curva para índice de colapso (200 kPa). b). Curva para potencial de colapso (950 kPa).**

Fuente: de los Autores

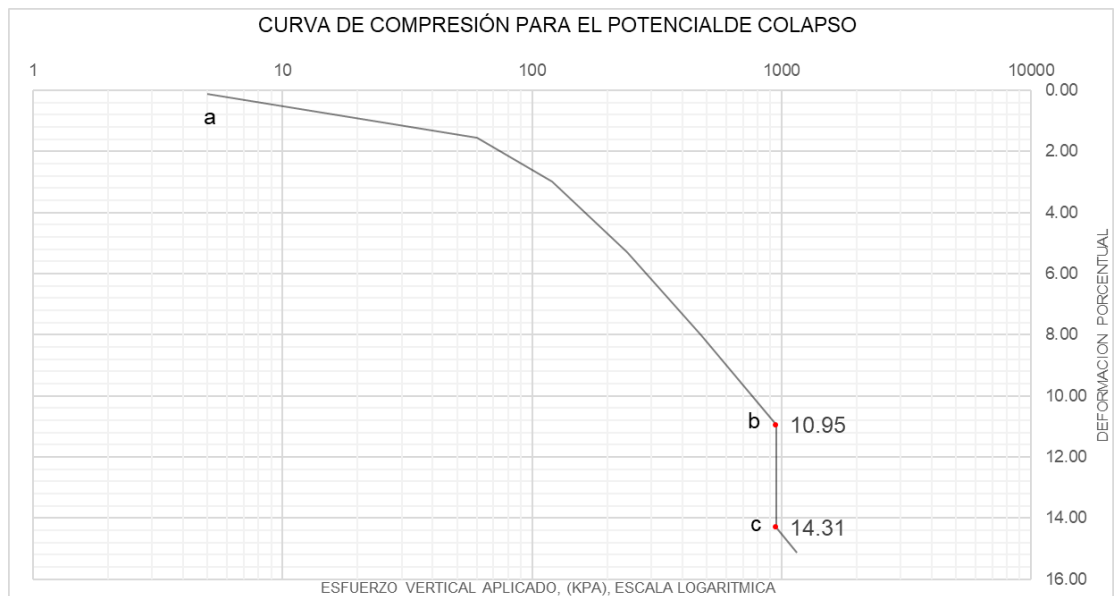
**Tabla No. 4.20. Resultados de ensayos de Colapsabilidad de la muestra MI-9 correspondiente a la Unidad F del, según norma ASTM D5333**

UNIDAD / PRUEBA/ ENSAYO No.		Condiciones iniciales					Condiciones finales			Parámetros de colapso		
		$\omega$ (%)	Sat (%)	$\gamma_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_i$	$\omega_{sat}$ (%)	$\gamma_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_f$	$I_e / I_c$ (%)	Grado de colapso	
F MI-9	INDICE	6	6.8%	16.5%	1249	1169	0.93	33.4%	1705	0.77	4.90%	Moderado
		7	6.8%	15.6%	1211	1133	0.99	33.3%	1690	0.78	5.10%	Moderado
	POTENCIAL	18	6.7%	14.9%	1213	1136	1.06	30.2%	1737	0.75	3.40%	Moderado
		19	6.2%	16.5%	1323	1246	0.88	29.0%	1818	0.65	2.80%	Moderado

Fuente: De los Autores



a) Curva del ensayo de determinación de índice de colapso No. 6



b) Curva del ensayo de determinación de potencial de colapso No. 18

**Figura No 4.17 Resultados de curvas de pruebas de colapso aplicado en muestras en estado natural de la unidad F del talud No 2 UES. a) Curva para índice de colapso (200 kPa). b) Curva para potencial de colapso (950 kPa).**

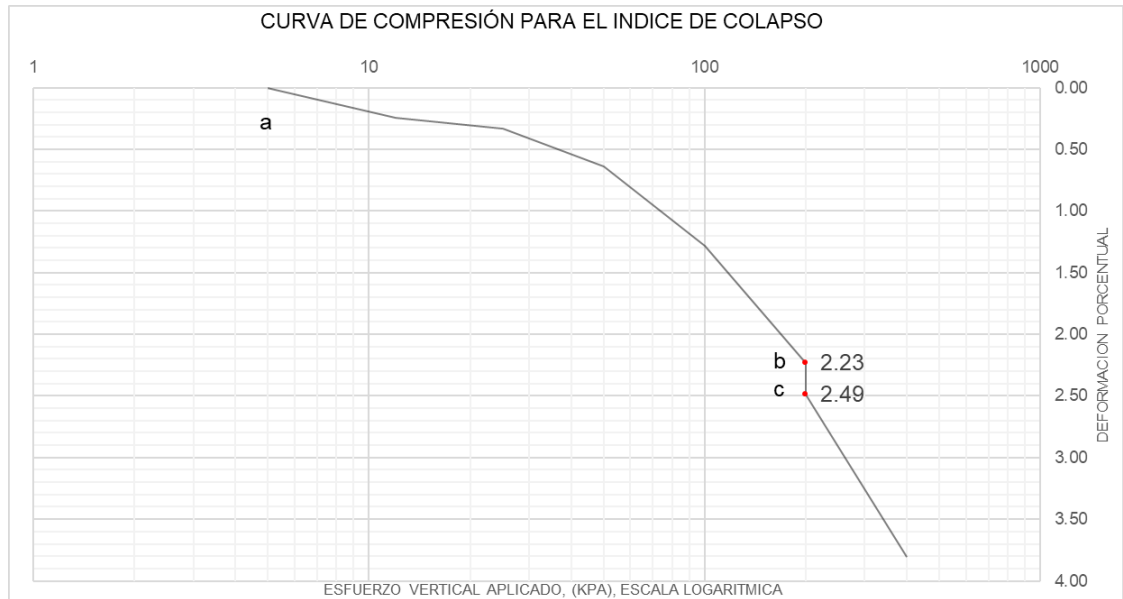
Fuente: de los Autores



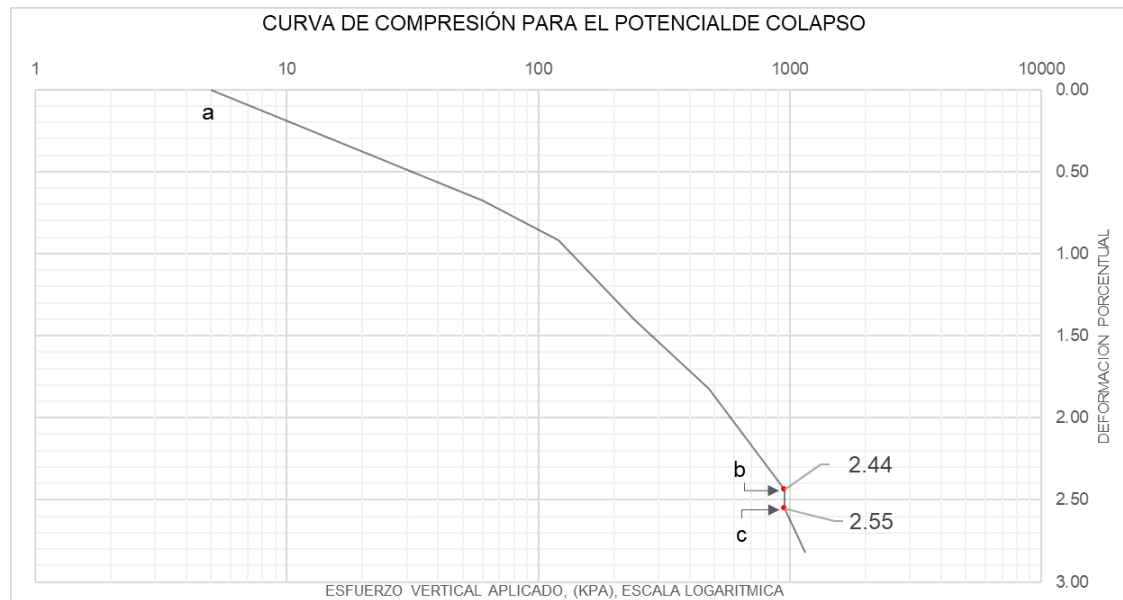
**Tabla No. 4.21. Resultados de ensayos de Colapsabilidad de la muestra MI-2 correspondiente a la Ignimbrita  $\beta$  superior, según norma ASTM D5333**

UNIDAD / PRUEBA/ ENSAYO No.		Condiciones iniciales					Condiciones finales			Parámetros de colapso		
		$\omega$ (%)	Sat (%)	$\gamma_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_i$	$\omega_{sat}$ (%)	$\gamma_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_f$	$I_e / I_c$ (%)	Grado de colapso	
IGNIMBRITA $\beta$ SUPERIOR. MI-2	INDICE	12	17.0%	70.3%	1823	1557	0.61	26.9%	2055	0.54	0.30%	Ligero
		13	23.6%	85.2%	1827	1478	0.69	29.2%	1970	0.65	0.20%	Ligero
		42	10.6%	32.8%	1528	1381	0.81	26.2%	1802	0.75	0.20%	Ligero
		43	11.2%	32.1%	1487	1337	0.87	29.6%	1793	0.81	0.10%	Ligero
	POTENCIAL	14	24.5%	88.8%	1842	1479	0.69	28.6%	1974	0.63	0.10%	Ligero
		15	21.5%	71.1%	1730	1424	0.76	28.2%	1879	0.71	0.10%	Ligero

Fuente: De los Autores



a) Curva del ensayo de determinación de índice de colapso No. 12



b) Curva del ensayo de determinación de potencial de colapso No. 15

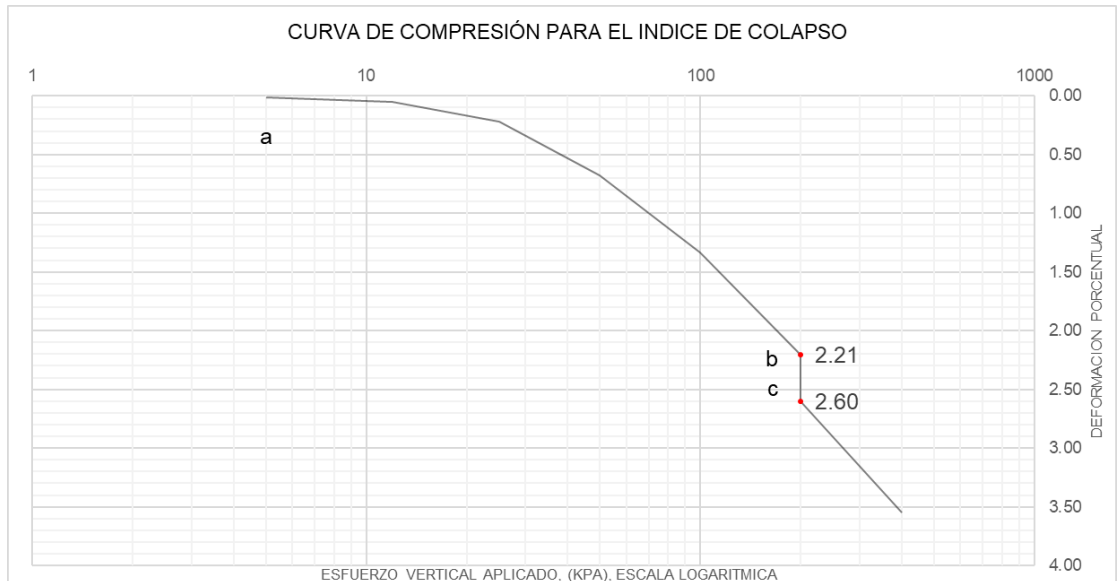
**Figura No 4.18 Resultados de curvas de pruebas de colapso aplicado en muestras en estado natural de la Ignimbrita Beta superior del talud ZF-1 (extremo izquierdo). a) Curva para índice de colapso (200 kPa). b) Curva para potencial de colapso (950 kPa).**

Fuente: de los Autores

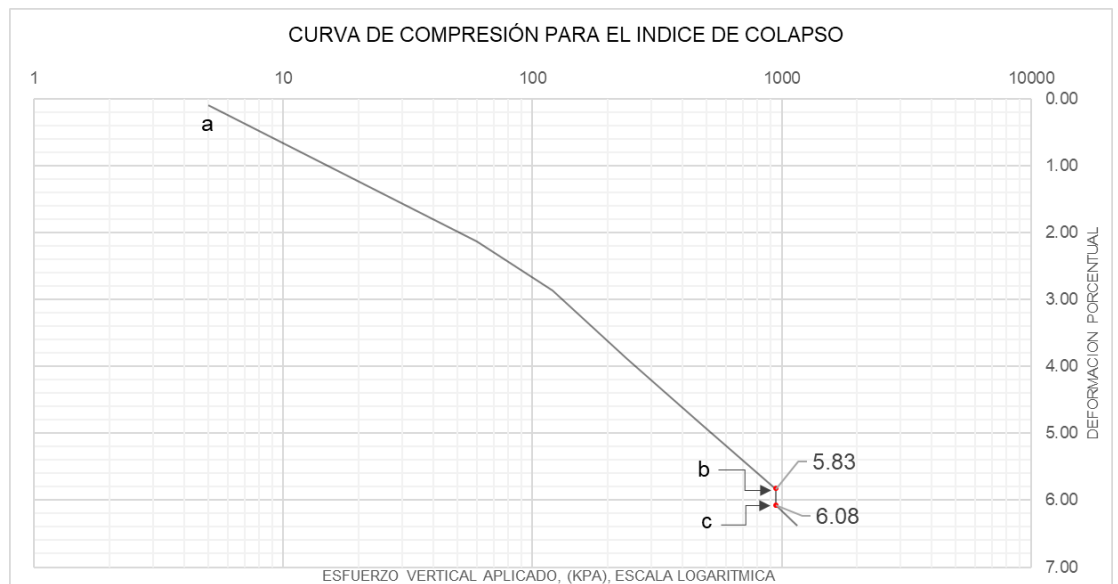
**Tabla No. 4.22. Resultados de ensayos de Colapsabilidad de la muestra MI-3 correspondiente a la Ignimbrita  $\beta$  inferior, según norma ASTM D5333**

UNIDAD / PRUEBA			Condiciones iniciales					Condiciones finales			Parámetros de colapso	
			$\omega$ (%)	Sat (%)	$\gamma_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_i$	$\omega_{sat}$ (%)	$\gamma_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_f$	$I_e / I_c$ (%)	Grado de colapso
IGNIMBRITA $\beta$ INFERIOR. MI-3	INDICE	30	12.9%	55.2%	1787	1584	0.58	21.9%	2000	0.53	0.40%	Ligero
		31	12.1%	60.6%	1872	1670	0.50	21.7%	2109	0.45	0.36%	Ligero
	POTENCIAL	32	10.2%	51.1%	1845	1674	0.50	19.8%	2142	0.40	0.24%	Ligero
		33	9.9%	48.7%	1828	1664	0.51	19.1%	2123	0.41	0.18%	Ligero

*Fuente: De los Autores*



a) Curva del ensayo de determinación de índice de colapso No. 30



b) Curva del ensayo de determinación de potencial de colapso No. 32

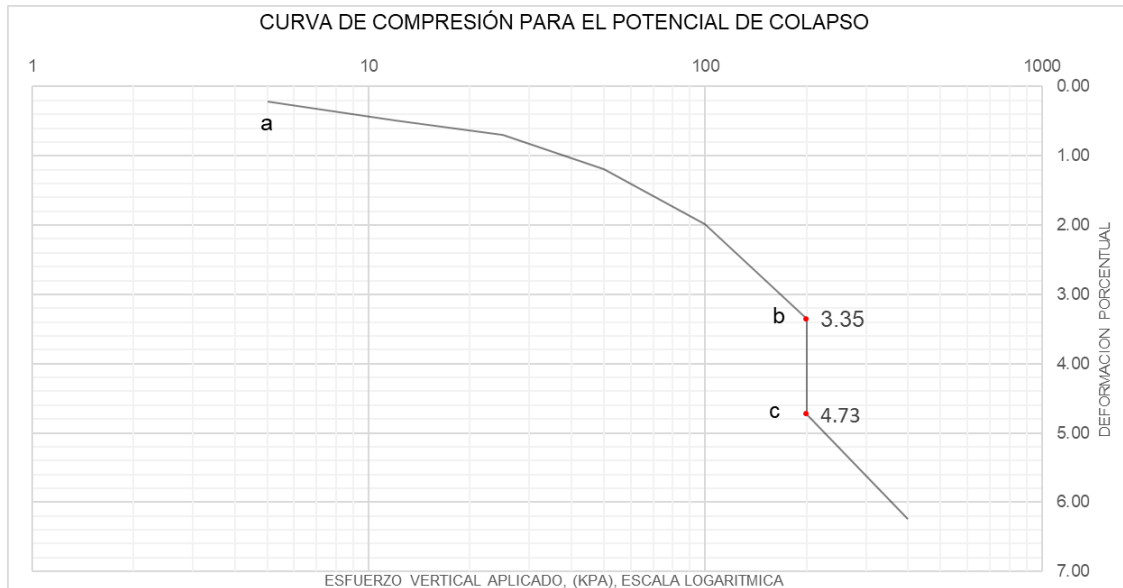
**Figura No 4.19 Resultados de curvas de pruebas de colapso aplicado en muestras en estado natural de la Ignimbrita Beta inferior del talud ZF-1 (extremo izquierdo). a) Curva para índice de colapso (200 kPa). b) Curva para potencial de colapso (950 kPa).**

Fuente: de los Autores

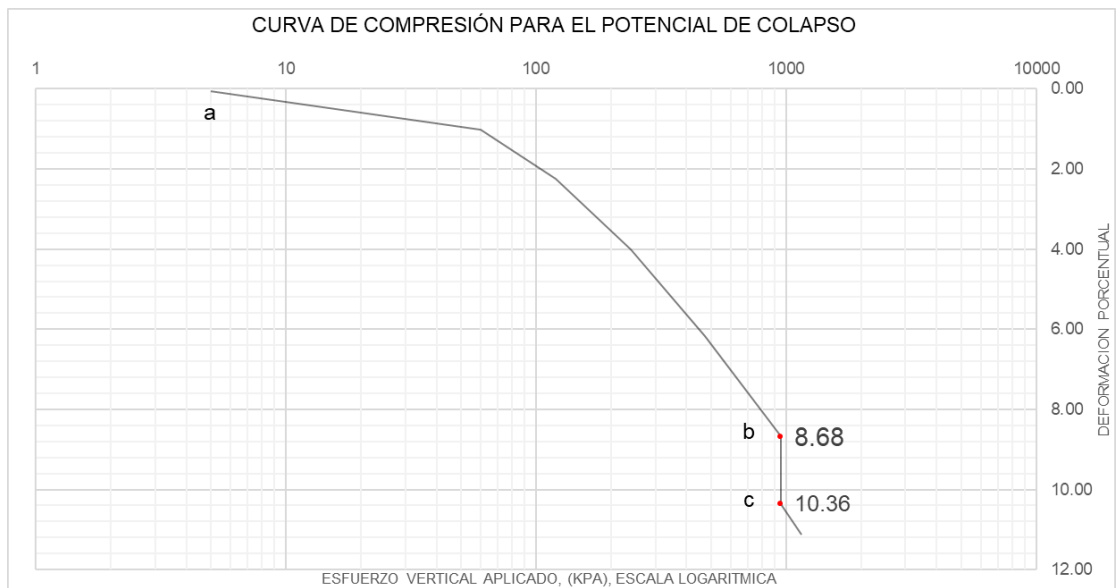
**Tabla No. 4.23. Resultados de ensayos de Colapsabilidad de la muestra MI-1 correspondiente a la Ignimbrita  $\alpha$ , según norma ASTM D5333**

UNIDAD/ PRUEBA/ ENSAYO No.			Condiciones iniciales					Condiciones finales			Parámetros de colapso	
			$\omega$ (%)	Sat (%)	$Y_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Y_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_i$	$\omega_{sat}$ (%)	$Y_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_f$	$I_e / I_c$ (%)	Grado de colapso
IGNIMBRITA $\alpha$ , MI-1	INDICE	9	7.1%	22.7%	1487	1389	0.76	26.1%	1869	0.65	1.40%	Ligero
		11	7.6%	24.4%	1494	1389	0.76	25.9%	1840	0.68	1.30%	Ligero
	POTENCIAL	16	7.5%	21.3%	1424	1325	0.86	26.5%	1882	0.66	1.70%	Ligero
		17	7.9%	25.8%	1516	1404	0.76	25.8%	1994	0.55	1.80%	Ligero
		61	10.3%	25.6%	1362	1235	1.00	26.3%	1757	0.78	1.00%	Ligero

*Fuente: De los Autores*



a) Curva del ensayo de determinación de índice de colapso No. 9

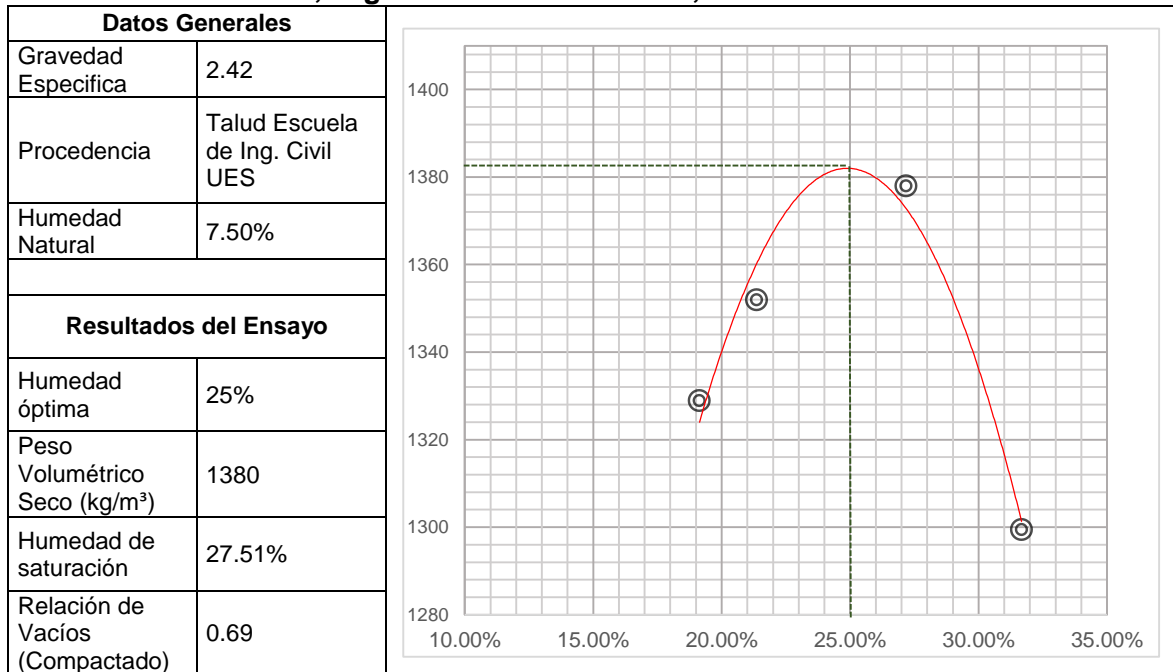


b) Curva del ensayo de determinación de potencial de colapso No. 16

**Figura No 4.20 Resultados de curvas de pruebas de colapso aplicado en muestras en estado natural de la Ignimbrita Alfa del talud ZF-1 (extremo derecho). a) Curva para índice de colapso (200 kPa). b) Curva para potencial de colapso (950 kPa).**

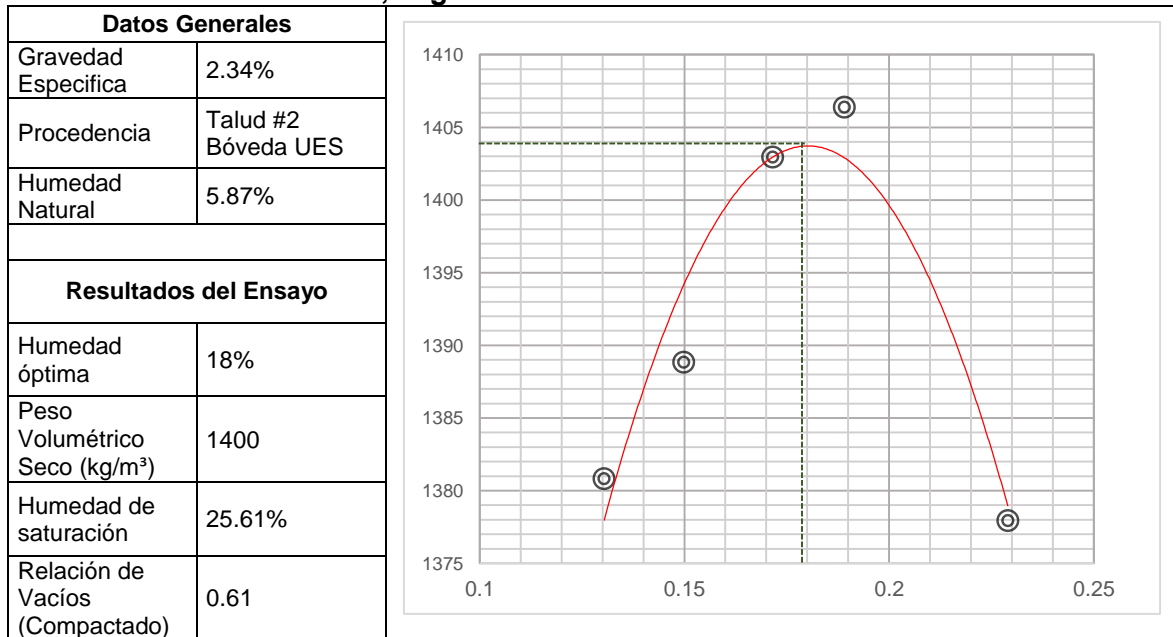
Fuente: de los Autores

**Tabla No. 4.24. Resultados de ensayo de Determinación de Relación Densidad – Humedad, según norma ASTM D 698, Método A. UNIDAD G**



Fuente: De los Autores

**Tabla No. 4.25. Resultados de ensayo de Determinación de Relación Densidad – Humedad, según norma AASHTO T 99. UNIDAD F**



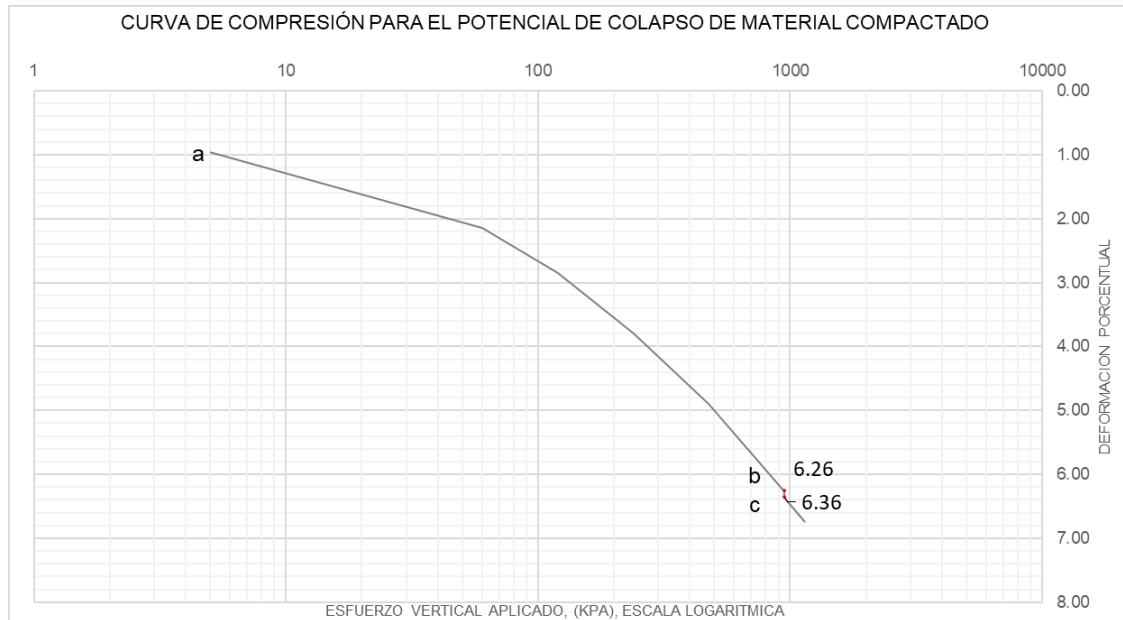
Fuente: De los Autores

**Tabla No. 4.26. Resultados de ensayos de Colapsabilidad para la Unidad G del talud No 3 UES, en muestras compactadas, según norma ASTM D 698 (equivalencia T99)**

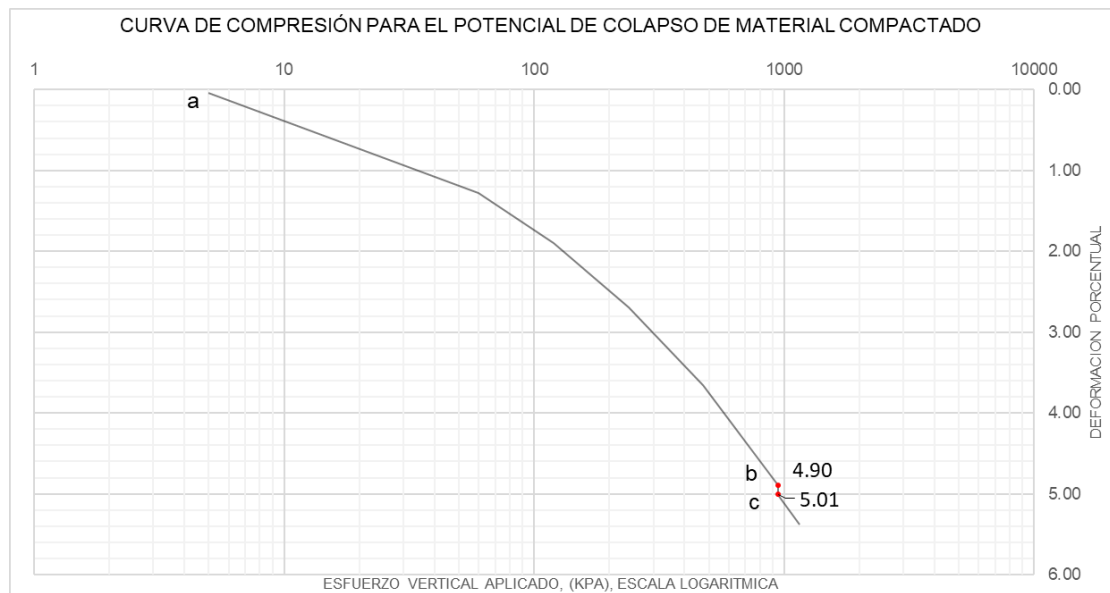
UNIDAD / PRUEBA/ ENSAYO No.			HUMEDAD OPTIMA	Condiciones iniciales					Condiciones finales			Parámetros de colapso	
				$\omega$ Ensayo (%)	Sat <sub>i</sub> (%)	$\gamma_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_i$	$\omega_f$ (%)	$\gamma_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_f$	$I_c$ (%)	Grado de colapso
UNIDAD G. MA-11	POTENCIAL	52	25%	26.4%	81.0%	1710	1353	0.79	28.3	1824	0.70	0.04%	Nula
		53		25.8%	79.8%	1707	1357	0.78	27.5	1854	0.66	0.10%	Ligero
		54		24.1%	77.0%	1708	1376	0.76	28.3	1874	0.67	0.10%	Ligero
		55		23.9%	74.5%	1688	1363	0.78	30.8	1859	0.70	0.10%	Ligero
		56		21.0%	60.5%	1590	1314	0.84	30.1	1804	0.74	0.10%	Ligero
		57		21.2%	62.4%	1610	1328	0.82	29.8	1800	0.74	0.10%	Ligero

Fuente: De los Autores





a) Curva del ensayo de determinación de potencial de colapso No. 53



b) Curva del ensayo de determinación de potencial de colapso No. 56

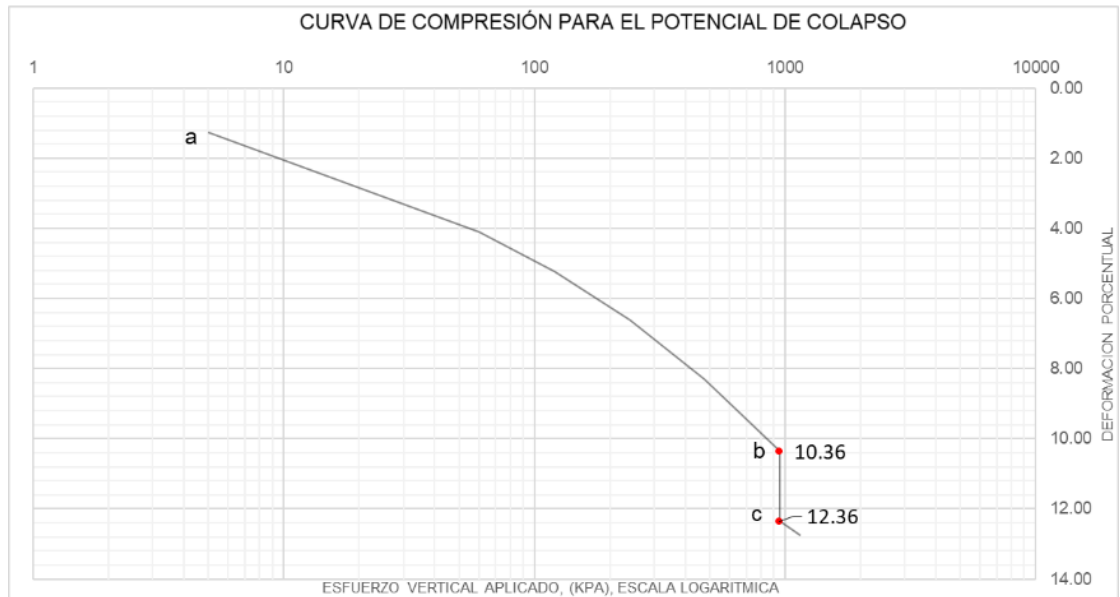
**Figura No 4.21 Resultados de curvas de pruebas de potencial de colapso (950 kPa), aplicado en muestras en estado compactado de la unidad G del talud No 3 UES. a) Compactado con 26 % de humedad. b) Compactado con 21 % de humedad**

Fuente: de los Autores

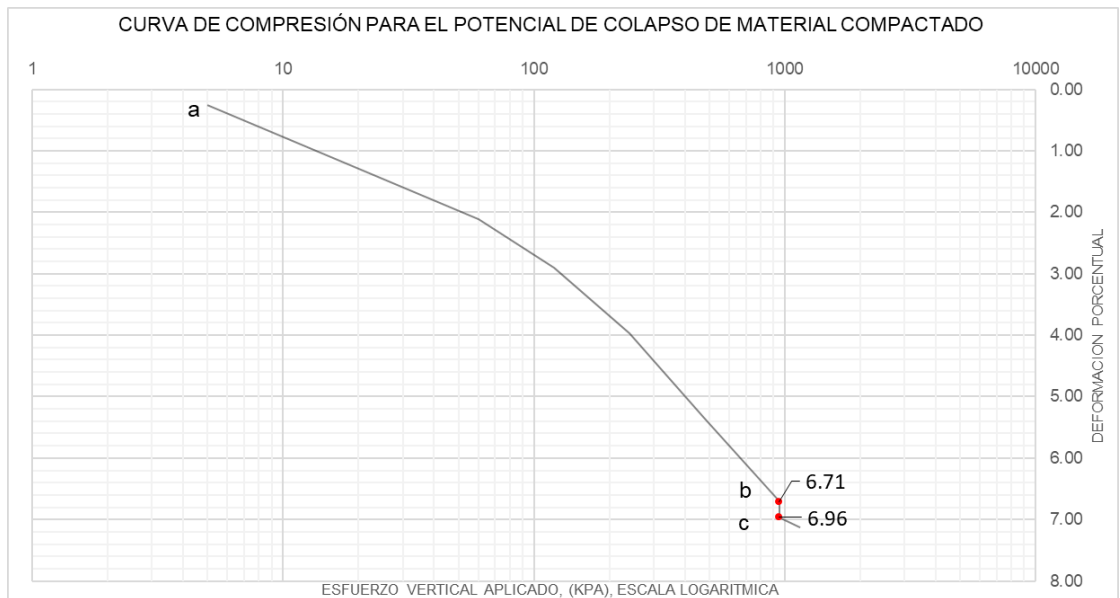
**Tabla No. 4.27. Resultados de ensayos de Colapsabilidad para la Unidad F del talud No 2 UES, en muestras compactadas, según norma ASTM D 698 (equivalencia T99).**

UNIDAD / PRUEBA/ ENSAYO No.	HUMEDAD OPTIMA	Condiciones iniciales					Condiciones finales			Parámetros de colapso		
		$\omega$ Ensayo (%)	Sat <sub>i</sub> (%)	$\gamma_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_i$	$\omega_f$ (%)	$\gamma_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_f$	$I_c$ (%)	Grado de colapso	
UNIDAD F MA - 9	POTENCIAL	63	15.2%	39.6%	1393	1208	0.87	29.3%	1792	0.63	2.00%	Ligero
		28	16.7%	48.3%	1479	1267	0.78	25.9%	1723	0.65	1.05%	Ligero
		27	16.3%	46.2%	1490	1280	0.83	25.0%	1721	0.69	1.05%	Ligero
		47	18.7%	58.0%	1584	1334	0.75	25.8%	1817	0.62	0.41%	Ligero
		64	18.1%	55.5%	1536	1300	0.74	25.8%	1776	0.60	0.19%	Ligero
		65	18.5%	61.8%	1597	1348	0.68	27.7%	1854	0.56	0.26%	Ligero
		48	20.5%	67.5%	1648	1367	0.71	24.8%	1817	0.60	0.35%	Ligero
		49	20.3%	62.1%	1596	1327	0.76	25.2%	1790	0.63	0.34%	Ligero
		66	20.7%	63.4%	1571	1302	0.74	24.8%	1796	0.57	0.45%	Ligero
		67	20.7%	62.9%	1563	1295	0.75	24.4%	1731	0.62	0.34%	Ligero
		50	22.3%	72.7%	1666	1362	0.72	25.3%	1818	0.61	0.14%	Ligero
		51	21.40%	71.80%	1673	1378	0.70	23.80%	1798	0.61	0.14%	Ligero
		68	23.3%	69.9%	1589	1288	0.75	26.5%	1774	0.61	0.17%	Ligero
		69	23.6%	75.2%	1634	1322	0.71	25.7%	1764	0.61	0.10%	Ligero

Fuente: De los Autores



a) Curva del ensayo de determinación de potencial de colapso No. 63



b) Curva del ensayo de determinación de potencial de colapso No. 65

**Figura No 4.22 Resultados de curvas de pruebas de potencial de colapso a 950 kPa, aplicado en muestras en estado compactado de la unidad F del talud No 2 UES. a) Compactado con 15 % de humedad. b) Compactado con 18 % de humedad**

Fuente: de los Autores

# **CAPÍTULO No. 5**

## **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

## 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras de las diferentes unidades de TBJ obtenidas en el Capítulo 4.

Se inicia por presentar un resumen de las unidades estudiadas y su sitio de procedencia, a continuación, se realiza un análisis de las características físicas de cada Unidad de TBJ en estudio, dichas características serán usadas para evaluar de forma indirecta los parámetros de colapso, haciendo uso de correlaciones que asocian el peso volumétrico seco y porcentaje de material más fino que la malla No. 200 (0.075 mm).

Seguidamente, se realiza el análisis de los resultados de las pruebas para determinación del Índice y Potencial de Colapso basado en la norma de ensayo ASTM D 5333, con la aplicación gradual y máxima de presiones según lo especifica la norma antes citada hasta los valores de 200 kPa y 950 kPa respectivamente, además se comparan los resultados de laboratorio con las estimaciones indirectas para estos parámetros dadas por las correlaciones a través de sus características físicas. También se determinaron los asentamientos que se producirían en un estrato de suelo usando el valor del potencial de colapso.

De igual forma, se presenta el análisis de los resultados de colapso de muestras compactadas según la metodología A de ASTM D698 de las Unidades F y G, ensayadas únicamente para determinar el Potencial de colapso (esfuerzo aplicado de 950 kPa); Se realizó una comparación entre las propiedades geotécnicas de los especímenes inalterados y compactados a distintos contenidos de humedad y se observan las relaciones existentes entre éstas propiedades y el potencial de colapso, así también el efecto de la compactación mecánica en los suelos colapsables.

## 5.2 RESUMEN DE LAS UNIDADES ESTUDIADAS

Tratando de cumplir con los objetivos planteados, se seleccionaron taludes en los que estuviesen presentes las unidades de TBJ a las que se les realizaron diferentes ensayos con el fin de caracterizar y evaluar parámetros de colapsabilidad según lo que se detalló en el capítulo No IV de este trabajo.

De los taludes estudiados, fueron seleccionadas las siguientes:

- Unidad G extraída del talud nombrado **Talud No 3 UES** ubicado en las cercanías de la escuela de Ingeniería Civil;
- Unidad F, extraída del talud nombrado **Talud No 2 UES** ubicado en la zona de la Bóveda;
- Ignimbrita Beta Inferior y Superior e Ignimbrita Alfa, extraídas del **Talud ZF-1**, ubicado en el Arenal Seco de la Zona Franca San Bartolo Ilopango, en el mismo lugar se identificó la unidad E que fue tomada como referencia para la identificación de las otras unidades.

## 5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

De los resultados de caracterización, se presenta un resumen de las propiedades físicas, de cada unidad para su correspondiente análisis (ver Tabla No. 5.2)

Cabe destacar que los valores promedios presentados en este capítulo; no representan la media aritmética, sino que se presentan como rangos: valores mínimos y máximos obtenidos de los ensayos para determinación de propiedades físicas.

Nota: Refiérase al capítulo 4, apartado 4.7 *EJECUCIÓN DE ENSAYOS (ESTUDIOS PREVIOS)*, para observar los resultados de la aplicación de los procedimientos en la determinación de la gravedad específica, humedad y

*determinación de tamaño de partículas en las muestras de TBJ de los taludes estudiados, para cada unidad, de manera específica.*

Para un análisis previo, se evaluará de forma indirecta el potencial de colapso, utilizando la información de correlaciones obtenidas en la investigación bibliográfica, (tomando como parámetros de comparación las características granulométricas y densidad seca) y comparándolas con los resultados de los ensayos de laboratorio.

Se clasificarán las relaciones de vacíos según el criterio de Benett y Hulbert como se muestra en la Tabla No. 5.1:

**Tabla No. 5.1 Relación de vacíos en función de la presión de pre-consolidación (Benett y Hulbert 1986).**

<b>Rango de relación de vacíos</b>	<b>Clasificación</b>
> 3.0	Relación de vacíos muy alto
> 2.5	Relación de vacíos alto
1.5 - 2.5	Relación de vacíos de medio a alto
< 1.5	Relación de vacíos bajo
< 1.2	Relación de vacíos muy bajo

*Fuente: González de Vallejo Luis I. (2002). Ingeniería Geológica. (pág. 98). Madrid: Pearson Prentice Hall.*

Se relaciona la densidad seca del suelo para obtener el grado de colapso usando los criterios mostrados en Tabla No. 2.6.

**Tabla No. 2.6 Criterios de colapsabilidad a partir de la densidad seca del suelo**

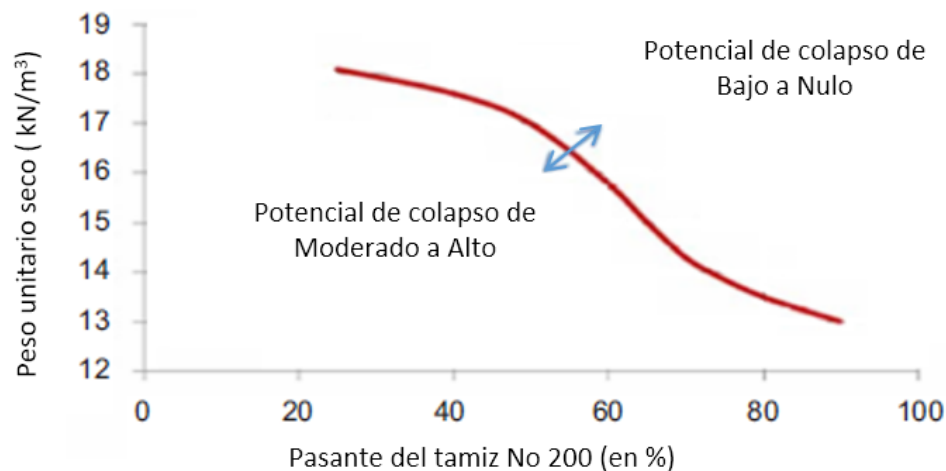
Grado de Colapso	Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	Potencial de Colapso* (%)
Bajo	>14.0	<0.25
Bajo a medio	12.0-14.0	0.25-1.0
Medio a alto	10.0-12.0	1.0-5.0
Alto a muy alto	<10.0	>5.0

\*Asiento inducido por colapso bajo inundación referido a la altura inicial de la muestra"

Fuente: González de Vallejo Luis I. (2002). *Ingeniería Geológica*. (pág. 112). Madrid: Pearson Prentice Hall.

Además, se usará el Gráfico de Moghadam et al (2006), donde se presenta la relación entre el peso volumétrico seco y el porcentaje más fino que el tamaño 0.075 mm (malla No 200) para evaluar el potencial de colapso de varios tipos de suelos (ver Gráfico No 2.1).

**Gráfico No 2.1 Relación entre el peso unitario seco y el porcentaje que pasa el tamiz No 200, para caracterizar el potencial de colapso de los suelos (Moghadam et al, 2006)**



Fuente: Behzad Kalantari. (2013). *Foundations on collapsible soils: a review*. *Forensic Engineering*, 166, 57 - 63. 04/07/2012, De ICE Publishing Base de datos.



**Tabla No. 5.2 Resumen de Propiedades físicas de las unidades estudiadas**

Procedencia (No de Talud)		No 3 UES	No 2 UES	ZF-1 Zona Franca, San Bartolo, Ilopango		
Muestra No		MA-11	MA-9	MA-2	MA-3	MA-1
Unidad		G	F	Ig. $\beta$ Superior	Ig. $\beta$ Inferior	Ignimbrita $\alpha$
Espesor de la Unidad	(m)	1.70	2.20	0.60	0.40	3.30
<b>Tamaños de partículas constituyentes</b>						
Gravas	(%)	0.00	8.47	0.00	0.00	7.16
Arenas	(%)	19.79	60.67	30.96	31.67	72.13
Limos	(%)	69.24	28.82	65.79	61.24	18.87
Arcillas	(%)	6.58	2.80	2.79	4.90	1.03
Coloides	(%)	4.28	1.24	0.46	2.19	0.81
Clasificación Geotécnica		Limo con arena color café claro con partículas pomíticas, TM 4.75 mm con finos NP.	Arena con limo color beige con partículas pomíticas TM 1½ con finos NP.	Limo arenoso color café, TM 2 mm (No 10), con finos NP.	Limo arenoso color gris, TM 2 mm (No 10), con finos NP.	Arena con limo y trazas de pómez, color beige, TM 1", con finos NP.
Simbología (SUCS)		ML	SM	ML	ML	SM
<b>Propiedades físicas</b>						
Gravedad Específica promedio	$G_s$	2.42	2.26	2.50	2.51	2.47
Peso Volumétrico Húmedo <sup>12</sup>	$P_{prom}(kg/m^3)$	1273	1249	1706	1833	1447
	Rango	1204 – 1382	1211 – 1323	1487 - 1842	1787 – 1872	1362 – 1516
Peso Volumétrico Seco	$P_{prom}(kg/m^3)$	1105	1171	1443	1648	1348
	Rango	1049 – 1195	1133 – 1246	1337 – 1557	1584– 1674	1235 – 1404
Grado de Saturación inicial	$P_{prom}(\%)$	30.9	15.9	63.4	53.9	24.0
	Rango	23.0 – 42.0	14.9 - 16.5	32.1 – 88.2	48.7 – 60.6	21.3 – 25.8
Relación de Vacíos inicial	$e_{prom}(\%)$	1.20	0.97	0.74	0.52	0.83
	Rango (%)	1.03 – 1.31	0.88 – 1.06	0.61 – 0.87	0.50 – 0.58	0.76 – 1.00

Fuente: De los Autores

<sup>12</sup> Los valores de Pesos Volumétricos Húmedos y Secos, grados de saturación inicial, y relación de vacíos iniciales reportados, fueron obtenidos durante la ejecución del ensayo de colapso. (Ver Tabla No. 4.19 para Unidad G; Tabla No. 4.20 para Unidad F; Tabla No. 4.21 para Ignimbrita Alfa; Tabla No. 4.22 para Ignimbrita Beta Superior; Tabla No. 4.23 para Ignimbrita Beta Inferior)

### **Análisis de las propiedades físicas**

Comparando las diferentes unidades se observa lo siguiente en relación a la **Gravedad Especifica:**

- Los valores más altos obtenidos corresponden a las Ignimbrita Beta superior e inferior: **2.50 y 2.51** respectivamente.
- Los valores intermedios corresponden a la Ignimbrita Alfa de **2.47** y a la Unidad G de **2.42**.
- La Unidad F presento el valor más bajo de **2.26**.

Las variaciones de las gravedades específicas obtenidas se les atribuyen a los diferentes minerales que las constituyen.

Comparando los pesos volumétricos secos (PVS) de los suelos que constituyen las diferentes unidades, se observa:

- El peso volumétrico seco más alto corresponde a la Ignimbrita Beta Inferior con un valor promedio de **1648kg/m<sup>3</sup>**.
- Los valores intermedios corresponden a la Ignimbrita Beta Superior un valor promedio de **1443 kg/m<sup>3</sup>**; Ignimbrita Alfa con un valor promedio de **1348 kg/m<sup>3</sup>**;
- Los valores más bajos corresponden a la Unidad F con un valor promedio de **1171 kg/m<sup>3</sup>**; y la Unidad G con un valor promedio de **1105 kg/m<sup>3</sup>**.

Se atribuye que la variación de los pesos volumétricos entre unidades se relaciona directamente con la composición mineralógica, el tamaño y distribución de las partículas, y la forma en que fueron depositados los materiales.

Al respecto de su forma de depósito se puede decir:

- Las **Ignimbrita Beta y Alfa** son las que presentaron mayor PVS, estas provienen de depósitos de flujos piroclásticos, y, la diferencia en los pesos volumétricos secos entre ambas radica en que las primeras poseen una

matriz limo arenosa muy fina bastante consolidada, en cambio en la segunda predomina una matriz de arena con limo con trazas de pómez y líticos, poco consolidada.

- Para el caso de la **Unidad F**, que consiste en una matriz abundante de cenizas gruesas y gran cantidad de partículas de pómez, ésta proviene de coladas de flujos piroclásticos y presenta una densidad baja en comparación a las ignimbritas.
- La **Unidad G**, cuyo depósito es de caída, consiste en una matriz de cenizas muy fina y muy poca presencia de pómez y lapilli acrecional pobremente cementados, presentó el menor valor de peso volumétrico seco. Al igual que la Unidad F poseen mayor valor de relaciones de vacío, que las Ignimbritas Alfa y Beta.

Con respecto a las relaciones de vacíos iniciales se puede decir lo siguiente:

- Para la unidad **G (1.20)** se puede clasificar como **baja**
- Para la unidad **F (0.97)** se puede clasificar como **muy baja**
- Para la Ignimbrita Beta superior **(0.74)** se puede clasificar como **muy baja**
- Para la Ignimbrita Beta inferior **(0.52)** se puede clasificar como **muy baja**
- Para la Ignimbrita Alfa **(0.83)** se puede clasificar como **muy baja**

Las estimaciones de colapsabilidad con base a las características físicas como el PVS y el porcentaje más fino que el tamaño 0.075 mm basados en el Gráfico No 2.1 y la Tabla No. 2.6, de las unidades son las siguientes:

- Para la unidad **G** se puede esperar un **grado de colapso de medio a alto** y un **potencial de colapso de 1 a 5%**
- Para la unidad **F** se puede esperar un **grado de colapso de medio a alto** y un **potencial de colapso de 1 a 5%**
- Para la **Ignimbrita Beta superior** se puede esperar un **grado de colapso bajo** y un **potencial de colapso menor a 0.25%**

- Para la **Ignimbrita Beta inferior** se puede esperar un **grado de colapso bajo** y un **potencial de colapso menor a 0.25%**
- Para la **Ignimbrita Alfa** se puede esperar un **grado de colapso medio** y un **potencial de colapso** en el rango de **0.25-1.0%**

#### **5.4 RESULTADOS DE COLAPSABILIDAD EN CONDICIÓN NATURAL**

Para evaluar la colapsabilidad, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio donde se ensayaron de 2 a 3 especímenes de cada unidad estudiada, para la determinación del índice, potencial y grado de colapso bajo la norma de ensayo ASTM D 5333. Los resultados obtenidos se presentan a continuación. (Ver Tabla No. 5.3)

Adicional al cálculo de las propiedades físicas relacionadas al fenómeno y los valores de índice o potencial, se determinó para el análisis el valor de deformación o asentamiento (según ASTM D5333) que corresponde al espesor identificado en campo de cada unidad usando el valor del potencial de colapso. El valor del asentamiento se determinará asumiendo que la carga mecánica es impuesta a todo el espesor de la unidad y éste sufre el efecto de la saturación, el resultado se expresará en centímetros.

**Tabla No. 5.3 Resumen de las propiedades de colapsabilidad en estado natural de las condiciones iniciales y finales para Índice y Potencial de Colapso de las Unidades de TBJ estudiadas**

Procedencia (No de Talud)		No. 3 UES		No. 2 UES		ZF-1 Zona Franca, San Bartolo, Ilopango	
Muestra No		MI-11		MI-9		MI-2	
Unidad		G		F		Ignimbrita $\beta$ Superior	
Espesor de la Unidad (m)		1.70		2.20		0.60	
<b>Condiciones iniciales de ensayo para índice de Colapso</b>							
Relación de Vacíos inicial	$e_{prom}$	1.26	1.18	0.96	0.75	0.54	0.76
	Rango	1.20- 1.31	1.15- 1.21	0.93 - 0.99	0.61 - 0.87	0.50 - 0.58	0.76
Peso Volumétrico Seco inicial	$P_{prom}(kg/m^3)$	1074	1112	1151	1438	1627	1389
	Rango	1049 - 1099	1096 - 1128	1133 - 1169	1337 - 1557	1584 - 1670	1389
Peso Volumétrico Húmedo inicial	$P_{prom}(kg/m^3)$	1301	1278	1230	1666	1830	1491
	Rango	1274- 1328	1227 - 1328	1211 - 1249	1487 - 1827	1787 - 1873	1487 - 1495
Contenido de Humedad inicial	$P_{prom}(\%)$	21.2	12.3	6.9	15.6	12.5	7.4
	Rango	20.9 - 21.5	12.0 - 12.5	6.8 - 6.9	10.6 - 23.5	12.1 - 12.9	7.1 - 7.6
Grado de Saturación inicial	$P_{prom}(\%)$	40.9	25.2	16.1	55.1	57.9	23.6
	Rango	39.7 - 42.1	24.0 - 26.4	15.6 - 16.5	32.1 - 85.2	55.2 - 60.5	22.7 - 24.4
<b>Resultados después de determinado el Índice de Colapso (a 200 kPa)</b>							
Índice de Colapso	Rango (%)	1.0- 1.6	4.2- 4.8	4.9 - 5.1	0.1 - 0.3	0.4	1.4
	Promedio	1.3	4.5	5.0	0.2	0.4	1.4
Grado de Colapso	--	Ligero [0.1 - 2.0]	Moderado [2.1 - 6.0]	Moderado [2.1-6.0]	Ligero [0.1 - 2.0]	Ligero [0.1 - 2.0]	Ligero [0.1 - 2.0]
Relación de Vacíos previa a la saturación <sup>13</sup>	$e_{prom}$	1.19	1.05	0.88	0.71	0.51	0.70
	Rango	1.14-1.24	0.98- 1.12	0.87-0.89	0.57 - 0.82	0.47 - 0.55	0.70
Relación de Vacíos después de colapso <sup>14</sup>	$e_{prom}$	1.17	0.96	0.78	0.71	0.50	0.68
	Rango	1.12- 1.21	0.88- 1.03	0.77-0.78	0.57 - 0.82	0.46 - 0.54	0.68
Relación de Vacíos final	$e_{prom}$	1.10	0.86	0.78	0.69	0.49	0.67
	Rango	1.07- 1.12	0.78- 0.94	0.77 - 0.78	0.54 - 0.81	0.45 - 0.53	0.65 - 0.68
Disminución de relación de Vacíos por colapso <sup>15</sup>	$\Delta e_{prom}$	0.02	0.09	0.10	0.00	0.01	0.02
Peso Volumétrico Seco final	$P_{prom}(kg/m^3)$	1154	1300	1273	1489	1688	1472
	Rango	1140- 1169	1244- 1356	1268 - 1278	1384 - 1619	1641 - 1734	1462 - 1481
Peso Volumétrico Saturado	$P_{prom}(kg/m^3)$	1624	1768	1697	1905	2055	1855
	Rango	1617- 1631	1712- 1825	1690 - 1705	1793 - 2055	2000 - 2109	1840 - 1869
Humedad de saturación final	$\omega_{Prom}$	40.7	36.1	33.4	28.0	21.8	26.0
	Rango	38.4 - 43.1	34.5 - 37.6	33.3- 33.4	26.2 - 29.6	21.7 - 21.9	25.9- 26.1
<b>Condiciones iniciales de ensayo para Potencial de Colapso</b>							
Relación de Vacíos inicial	$e_{prom}$	1.17		0.97	0.73	0.51	0.87
	Rango	1.03-1.25		0.88 - 1.06	0.69 - 0.76	0.50 - 0.51	0.76 - 1.00
Peso Volumétrico Seco inicial	$P_{prom}(kg/m^3)$	1121		1191	1452	1670	1321
	Rango	1077 - 1195		1136 - 1246	1424 - 1479	1664 - 1675	1235- 1404
Peso Volumétrico Húmedo inicial	$P_{prom}(kg/m^3)$	1270		1268	1786	1837	1434
	Rango	1204 - 1382		1213- 1323	1730 - 1842	1828 - 1845	1362 - 1516
Contenido de Humedad inicial	$P_{prom}(\%)$	13.3		6.7	23.0	10.1	8.6
	Rango	11.8 - 15.7		6.2 - 6.9	21.5 - 24.5	9.9 - 10.2	7.5 - 10.3
Grado de Saturación inicial	$P_{prom}(\%)$	28.1		15.7	80.0	49.9	24.2
	Rango	23.0 - 37.0		14.9 - 16.5	71.1 - 88.8	48.7 - 51.1	21.3- 25.8
<b>Resultados después de determinado el Potencial de Colapso (a 950 kPa)</b>							
Potencial de Colapso	Rango (%)	3.3 - 3.9		2.8 - 3.4	0.1	0.2	1.0 - 1.8
	Promedio	3.6		3.1	0.1	0.2	1.5
Grado de Colapso	--	Moderado [2.1 - 6.0]		Moderado [2.1 - 6.0]	Ligero [0.1 - 2.0]	Ligero [0.1 - 2.0]	Ligero [0.1 - 2.0]
Asentamiento por colapso referido al espesor de la unidad en talud de origen. <sup>16</sup>	(cm)	6.12		6.82	0.06	0.08	4.95
Relación de Vacíos previa a la saturación	$e_{prom}$	0.88		0.78	0.68	0.41	0.70
	Rango	0.74 - 0.98		0.72 - 0.83	0.64 - 0.71	0.41	0.60 - 0.81
Relación de Vacíos después de colapso	$e_{prom}$	0.80		0.72	0.67	0.41	0.68
	Rango	0.66 - 0.91		0.67 - 0.76	0.63 - 0.71	0.41	0.57 - 0.79
Relación de Vacíos final	$e_{prom}(\%)$	0.77		0.70	0.67	0.41	0.66
	Rango (%)	0.64 - 0.87		0.65 - 0.75	0.63 - 0.71	0.40 - 0.41	0.55 - 0.78
Disminución de Relación de Vacíos por colapso	$\Delta e_{prom}(\%)$	0.08		0.06	0.01	0.0	0.02
Peso Volumétrico Seco final	$P_{prom}(kg/m^3)$	1371		1372	1500	1786	1488
	Rango	1291-1480		1335 - 1410	1465 - 1535	1783 - 1788	1390 - 1585
Peso Volumétrico Saturado	$P_{prom}(kg/m^3)$	1849		1778	1926	2133	1878
	Rango	1765 - 1968		1737 - 1818	1879 - 1974	2123 - 2142	1757 - 1994
Humedad de Saturación final	$P_{prom}(\%)$	34.9		29.6	28.4	19.5	26.2
	Rango	33.0 - 36.7		29.0 - 30.2	28.2 - 28.6	19.1 - 19.8	25.8 - 26.5

Fuente: De los Autores

<sup>13</sup> Relación de Vacíos previo a la saturación: Corresponde al valor de la relación de vacíos al momento de la saturación del espécimen, punto -b- de la curva de Compresión Unidireccional.

<sup>14</sup> Relación de Vacíos después del colapso: corresponde al valor de la relación de vacíos al momento de la saturación del espécimen, punto -c- de la curva de Compresión Unidireccional.

<sup>15</sup> Disminución de relación de vacíos por colapso: Corresponde a la diferencia entre la relación de vacíos previo a la saturación y después del colapso.

<sup>16</sup> El cálculo del asentamiento está realizado considerando el espesor de la unidad en su talud de origen y el valor de potencial de colapso promedio de cada unidad.

Con respecto a las propiedades de colapso obtenidas en estado natural y otros parámetros relacionados se observa lo siguiente:

**UNIDAD G:** Para esta unidad se obtuvieron **índices de colapso ligero y moderado**, y **potencial de colapso moderado**, y se describen los resultados de cada uno a continuación:

### **Análisis de resultados del Índice de Colapso**

Al evaluar los resultados de índice de colapso obtenidos para la unidad G, se observa lo siguiente:

- Existen condiciones iniciales de humedad y grados de saturación diferentes, aunque fueron extraídas de puntos de muestreos cercanos, (10 m de distancia entre ellas aproximadamente), y de profundidades diferentes.
- Otro factor que influyó es que las muestras de mayor contenido de humedad inicial fueron tomadas durante la época lluviosa, lo que se ve reflejado en el índice de colapso: **condición ligera** con un valor promedio de **1.3%**.
- Para la **condición moderada** ésta se obtuvo en un talud protegido de la lluvia directa, por lo que las condiciones de humedad inicial fueron menores, obteniéndose un índice de colapso promedio de **4.5** que es mayor que la obtenida en la **condición ligera**.
- Para esta unidad (**G**) se estimaba de correlaciones (ver Tabla No. 2.6 y Gráfico No 2.1) un **grado de colapso de moderado a alto**, obteniéndose los resultados **ligero y moderado**, por lo que se puede decir que la correlación tiene una buena coincidencia en la categoría de moderado
- Se pudo determinar que, para esta unidad, si esta presenta una humedad intermedia (21.2%) que corresponde a un grado de saturación de **40.9%** y

luego es afectada por cambios de humedad hasta alcanzar un valor de **40.7%** aproximadamente, puede sufrir un grado de colapso **ligero** (1.3).

- Se pudo determinar que, si esta misma unidad (G) presenta una humedad baja (menos de 12.3%) que corresponde a un grado de saturación de **25.2%** y luego es afectada por cambios de humedad hasta alcanzar un valor de **36.1%** aproximadamente, este puede sufrir un grado de colapso **moderado** (4.5).
- Los cambios de humedad (aumento) que experimentó esta unidad desde la condición inicial a la saturación fueron:
  - Condición ligera: **19.5%**
  - Condición moderada: **23.8%**
- Esta unidad presentó pesos volumétricos secos iniciales bajos en el orden de **1074 kg/m<sup>3</sup>** para la condición ligera y **1112 kg/m<sup>3</sup>** para la condición moderada.
- Para la **condición ligera** el grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **39.70%** a **42.1%**, con un valor promedio de **40.9%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **59%**.
- Para la **condición moderada** el grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **24.0%** a **26.4%**, con un valor promedio de **25.2%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **75%**.
- Respecto a la relación de vacíos, se observa el siguiente comportamiento:
  - Condición de **colapso ligero**: la relación de vacíos inicial fue de **1.26** (promedio), previo a la saturación era de **1.19** (promedio), luego de la saturación fue de **1.17** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.02**.
  - Condición de **colapso moderado**: la relación de vacíos inicial fue de **1.18** (promedio), previo a la saturación era de **1.05** (promedio), luego de

la saturación fue de **0.96** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.09**.

- Debido a lo anterior se determina que, en la misma unidad, se pueden obtener índices de colapso mayores a medida el suelo se encuentre en una condición de baja humedad y bajo grado de saturación.

### **Análisis de resultados del Potencial de Colapso**

Para el potencial de colapso de puede decir:

- Para ésta unidad se estimaba de correlaciones un potencial de colapso de entre **1.0 a 5.0 %** (ver Tabla No. 2.6), resultando un valor de **3.6 %**, por lo que los resultados se encuentran dentro del rango proporcionado por la correlación.
- El resultado presentó un valor medio de potencial de colapso (**3.6**), que corresponde a un grado **moderado**.
- Esta unidad presento PVS iniciales bajo, en el orden de **1121 kg/m<sup>3</sup>** (valor promedio).
- El comportamiento de esta unidad fue similar al del índice de **colapso moderado**, es decir presento una humedad inicial baja promedio de **13.3%**, que correspondía a un grado de saturación de **28.1%**, que luego llegó a la saturación con una humedad de **34.9%**, con la que alcanzó el colapso, para un esfuerzo de **950 kPa**.
- El cambio de humedad (aumento) que experimentó esta unidad desde la condición inicial a la saturación fue de **21.6%**.
- El asentamiento por colapso que presentaría la Unidad G, tomando el espesor del estrato de 1.70 m resultaría un valor de:

De la ecuación 2.3 del capítulo 2

$$\delta h = 3.6 * \frac{1.70}{100} = 0.0612 \text{ m} \cong \mathbf{6.12 \text{ cm}}$$



Por lo que, si sobre éste tipo de suelo con un espesor de 1.70 m, que posee una humedad baja, y sobre este se tiene una estructura que transmite un esfuerzo de 950 kPa, y luego experimenta un cambio de humedad hasta alcanzar la saturación, éste colapsaría, presentando asentamientos cercanos a los 6.12 cm, que serían superiores a los asentamientos máximas permisibles<sup>17</sup> de 2.5 cm, por lo que la estructura sufriría fisuramientos producto de las deformaciones.

- Además, la condición de grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **23.0%** a **37.0%**, con un valor promedio de **28.1%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **72%**.
- Respecto a la relación de vacíos, se observa el siguiente comportamiento: la relación de vacíos inicial fue de **1.17** (promedio), previo a la saturación era de **0.88** (promedio), luego de la saturación fue de **0.80** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.08**.
- En esta unidad se tuvieron relaciones de vacíos bajas, PVS bajos, los cambios de humedad para llegar a la saturación fueron altos, estas condiciones propiciaron que esta unidad sea de **colapsabilidad moderada**.

#### **De forma general para la unidad G en la condición inalterada:**

Al comparar y evaluar los resultados para la condición moderada tanto para el índice como el potencial de colapso obtenidos para la unidad G cuyas condiciones iniciales son similares, se observa lo siguiente:

- La disminución de la relación de vacíos en la etapa de colapso, el valor promedio para el índice fue de **0.09**, que es mayor al del potencial con un valor promedio de **0.08**.

---

<sup>17</sup> Terzaghi y Peck, (2da ed.). "Mecánica de suelos de la Ingeniería práctica", Versión Española.

- Para la condición de potencial de colapso, y siempre y cuando el suelo presente una condición de humedad inicial baja (13.3%), y se vea afectado por cambios en la humedad hasta alcanzar un valor cercano a 34.9%, este puede sufrir un **colapso moderado**.
- El índice de colapso se encuentra cercano al valor superior del rango moderado, mientras el potencial se encuentra sobre el valor promedio del rango establecido por la normativa de referencia [2.1 a 6.0].

**UNIDAD F:** Para esta unidad se obtuvo un índice y potencial de colapso moderado en ambos casos, y se describen los resultados de cada uno a continuación:

#### **Análisis de resultados del Índice de Colapso**

- Para esta unidad (**F**) se estimaba de correlaciones (ver Tabla No. 2.6 y Gráfico No 5.1) un **grado de colapso de moderado a alto**, obteniéndose el resultado de **moderado**, por lo que se puede decir que la correlación tiene una buena aproximación.
- Se pudo determinar que, para esta unidad, si ésta presenta una humedad baja (menos de 6.9%) que corresponde a un grado de saturación del **16.1%** y luego es afectada por cambios de humedad hasta alcanzar un valor de **33.4%** aproximadamente, puede sufrir un grado de colapso **moderado**.
- El cambio de humedad (aumento) que experimentó ésta unidad desde la condición inicial a la saturación fue de **26.5%**.
- Ésta unidad presentó PVS iniciales bajos en el orden de **1151 kg/m<sup>3</sup>** como valor promedio.
- El grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **15.6%** a **16.5%**, con un valor promedio de **16.1%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **84%**.

- Respecto a la relación de vacíos, se observa el siguiente comportamiento: la relación de vacíos inicial fue de **0.96** (promedio), previo a la saturación era de **0.88** (promedio), luego de la saturación fue de **0.78** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.10**.

### Análisis de resultados del Potencial de Colapso

- Para ésta unidad se estimaba de correlaciones un potencial de colapso entre **1.0 a 5.0%** (ver Tabla No. 2.6), resultando un valor de **3.1 %**, por lo que los resultados se encuentran dentro del rango proporcionado por la correlación.
- El resultado presentó un valor medio de potencial de colapso (3.1), que corresponde a un grado **moderado**.
- Esta unidad presentó PVS iniciales bajos en el orden de **1191 kg/m<sup>3</sup>** como valor promedio.
- El comportamiento de ésta unidad fue similar al índice de **colapso moderado**, es decir presentó una humedad inicial baja (promedio) de **6.7%**, que correspondía a un grado de saturación de **15.7%**, que luego llegó a la saturación con una humedad de **29.6%**, con la que alcanzó el colapso, para un esfuerzo de **950 kPa**
- El cambio de humedad que experimentó ésta unidad desde la condición inicial a la saturación fue de **22.9%**.
- Si se evalúa el asentamiento por colapso que presentaría la unidad tomando el espesor del estrato de 2.20 m resultaría un valor de:

De la ecuación 2.3 del capítulo 2

$$\delta h = 3.1 * \frac{2.20}{100} = 0.0682 \text{ m} \cong \mathbf{6.82 \text{ cm}}$$

Por lo que si sobre éste tipo de suelo con un espesor de 2.20 m, que posee una humedad baja, y sobre este se tiene una estructura que transmite un esfuerzo de 950 kPa, y luego experimenta un cambio de

humedad hasta alcanzar la saturación, éste colapsaría, presentando asentamientos cercanos a los 6.82 cm, que serían superiores a los asentamientos máximos permisibles de 2.5 cm, por lo que la estructura sufriría fisuramientos producto de las deformaciones.

- Además, la condición de grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **14.9%** a **16.5%**, con un valor promedio de **15.7%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **84%**.
- Respecto a la relación de vacíos, se observa el siguiente comportamiento: la relación de vacíos inicial fue de **0.97** (promedio), previo a la saturación era de **0.78** (promedio), luego de la saturación fue de **0.72** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.06**.
- En ésta unidad se tuvieron relaciones de vacíos bajas, PVS bajos, los cambios de humedad para llegar a la saturación fueron altos, éstas condiciones propiciaron que esta unidad sea de **colapsabilidad moderada**.

#### **De forma general para la unidad F en condición natural:**

Al evaluar los resultados para el índice y potencial de colapso obtenidos para la unidad F, se observa lo siguiente:

- La disminución de la relación de vacíos en la etapa de colapso, el valor promedio para el índice fue de **0.10**, que es mayor al del potencial con un valor promedio de **0.06**.
- Para la condición de índice y para el potencial, si ésta presenta una humedad baja (menos de 6.9 y 6.7% respectivamente) y el suelo se ve afectado por cambios en la humedad hasta alcanzar la saturación (humedades de 33.4 y 29.6% respectivamente como valores promedio), este puede sufrir un **colapso moderado**, caso similar ocurrido en la unidad G.

- El índice de colapso se encuentra sobre el valor superior del rango moderado, mientras el potencial se encuentra cercano al valor promedio del mismo rango establecido por la normativa de referencia [2.1 a 6.0].

**IGNIMBRITA BETA SUPERIOR:** Para ésta unidad se obtuvo un **índice y potencial de colapso ligero** en ambos casos, y se describirán los resultados de cada uno a continuación:

### Análisis de resultados del Índice de Colapso

- Para esta unidad (**Ignimbrita Beta superior**) se estimaba de correlaciones (ver Tabla No. 2.6 y Gráfico No 2.1), un **grado de colapso bajo**, obteniéndose de los resultados **ligero** (bajo), por lo que se puede decir que la correlación tiene una buena aproximación.
- Se pudo determinar que, para ésta unidad, si ésta presenta una humedad inicial de **15.6%** que corresponde a un grado de saturación del **55.1%** y luego es afectada por un cambio de humedad hasta alcanzar un valor de **28.0%** aproximadamente, éste puede sufrir un grado de colapso **ligero**.
- El cambio de humedad (aumento) que experimentó esta unidad desde la condición inicial a la saturación fue de **12.4%**.
- Esta unidad presentó PVS iniciales altos en el orden de **1438 kg/m<sup>3</sup>** como valor promedio.
- Los cambios en la relación de vacíos que tuvo ésta unidad durante la saturación fueron muy pequeños a pesar de que éste experimentó variación en la humedad de **15.6 a 28.0%** (12.4%), Sin embargo, hay que destacar que ésta unidad presenta relaciones de vacíos muy bajas, PVS iniciales altos y humedades iniciales intermedias, y dadas éstas condiciones presenta un grado de colapso **ligero** (bajo, casi nulo).
- Además, la condición de grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **32.1% a 85.2%**, con un valor promedio de **55.1%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **50%**.

- Respecto a la relación de vacíos, se observa el siguiente comportamiento: la relación de vacíos inicial fue de **0.75** (promedio), previo a la saturación era de **0.71** (promedio), luego de la saturación fue de **0.71** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.00**.

### Análisis de resultados del Potencial de Colapso

- Para ésta unidad se estimaba de correlaciones un potencial de colapso **menor a 0.25 %** (ver Tabla No. 2.6), resultando un valor de **0.1%**, por lo que el resultado se encuentra dentro del rango proporcionado por la correlación.
- El resultado presentó un valor medio de potencial de colapso (0.1), que corresponde a un **grado ligero** (casi nulo).
- Esta unidad presentó PVS iniciales altos en el orden de **1452 kg/m<sup>3</sup>** (valor promedio).
- No presentó cambios considerables cuando se evalúa su comportamiento, es decir presentó una humedad inicial alta promedio de **23.0%**, que correspondía a un grado de saturación del **80.0%**, que luego llegó a la saturación con una humedad de **28.4%** con la que alcanzó el colapso, para un esfuerzo de **950 kPa**.
- El cambio de humedad (aumento) que experimentó esta unidad desde la condición inicial a la saturación fue de **5.4%**.
- El asentamiento por colapso que presentaría la unidad, tomado el espesor del estrato de 0.60 m resultaría un valor de:

$$\delta h = 0.1 * \frac{0.6}{100} = 0.0006 \text{ m} \cong \mathbf{0.06 \text{ cm}}$$

Por lo que si sobre éste tipo de suelo con un espesor de 0.60 m, que además posea una humedad cercana a la saturación, y sobre éste se tiene una estructura que transmite un esfuerzo de 950 kPa, y luego experimenta un cambio de humedad hasta alcanzar la saturación, éste no colapsaría,

ya que presentaría asentamientos cercanos a 0.06 cm, que son muy inferiores a las deformaciones máximas permisibles de 2.5 cm., por lo que la edificación no sufriría ningún daño.

- La condición de grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **71.1%** a **88.8%**, con un valor promedio de **80.0%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **20.0%**.
- Respecto a la relación de vacíos, se observa el siguiente comportamiento: la relación de vacíos inicial fue de **0.73** (promedio), previo a la saturación era de **0.68** (promedio), luego de la saturación fue de **0.67** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.01**.
- En ésta unidad se tuvo relaciones de vacíos muy bajas, PVS altos, los cambios de humedad para llegar a la saturación fue baja, éstas condiciones propiciaron que esta unidad sea de **colapsabilidad ligera**

#### **De forma general para la Ignimbrita Beta superior:**

Al evaluar los resultados para el índice y potencial de colapso obtenidos para la Ignimbrita Beta superior, se observa lo siguiente:

- Los valores de relación de vacíos iniciales para esta unidad (Ignimbrita Beta superior) son mucho menores que los de las unidades G y F.
- La disminución en la relación de vacíos en la etapa de colapso, se muestra casi despreciable para ambos casos.
- Para la condición de índice como de potencial, si ésta presenta una humedad inicial intermedia y cercana a la saturación (mayores de 15.6 y 23.0 % respectivamente) y se ve afectado por cambios en la humedad hasta alcanzar la saturación (con humedad mayor de 28.0 %), este puede sufrir un **colapso ligero**.

- El grado de colapso para las dos condiciones se encuentran sobre el valor inferior del rango ligero, establecido por la normativa de referencia [0.1 a 2.0].
- Al comparar las condiciones iniciales y finales de los resultados se observa que la Ignimbrita Beta superior presenta una menor probabilidad a colapsar que las unidades G y F, y se le puede atribuir a que ésta presenta relaciones de vacíos más bajos, PVS iniciales más altos y, que además sus humedades iniciales se encontraban cercanas a la humedad de saturación, por lo que no se presentó una variación significativa entre los valores de índice y potencial.

**IGNIMBRITA BETA INFERIOR:** Para ésta unidad se obtuvo un **índice y potencial de colapso ligero**, y se describirán los resultados de cada uno a continuación:

#### **Análisis de resultados del Índice de Colapso**

- Para esta unidad (**Ignimbrita Beta inferior**) se estimaba de correlaciones (ver Tabla No. 2.6 y Gráfico No 2.1), un grado de colapso **bajo**, obteniéndose el resultado de **ligero** (bajo), por lo que se puede decir que la correlación tiene una buena aproximación.
- Se pudo determinar que para ésta unidad, si ésta presenta una humedad inicial de **12.5%**, que corresponde a un grado de saturación del **57.9%** y luego es afectada por cambios de humedad hasta alcanzar un valor de **21.80%** aproximadamente, este puede sufrir un grado de colapso **ligero**.
- El cambio de humedad (aumento) que experimentó ésta unidad desde la condición inicial a la saturación fue de **9.3%**.
- Además, la condición de grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **55.2%** a **60.5%**, con un valor promedio de **57.9%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **42%**.



- Ésta unidad presentó PVS iniciales altos en el orden de **1627 kg/m<sup>3</sup>** (valor promedio).
- Respecto a la relación de vacíos, se observa el siguiente comportamiento: la relación de vacíos inicial fue de **0.54** (promedio), previo a la saturación era de **0.51** (promedio), luego de la saturación fue de **0.50** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.01**.
- Ésta unidad presenta relaciones de vacíos muy bajas, PVS iniciales altos y humedades iniciales bajas, y dadas éstas condiciones presenta un grado de colapso **ligero** (bajo, casi nulo).

### **Análisis de resultados del Potencial de Colapso**

- Para esta unidad se estimaba de correlaciones (ver Tabla No. 2.6) un potencial de colapso **menor a 0.25 %**, resultando un valor de **0.2 %**, por lo que el resultado se encuentra dentro del rango proporcionado por la correlación.
- El resultado presentó un valor medio de potencial de colapso (**0.2**), que corresponde a un **grado ligero** (casi nulo).
- Esta unidad presentó PVS iniciales altos en el orden de **1670 kg/m<sup>3</sup>** (valor promedio).
- Además, no presentó cambios considerables cuando se evalúa su comportamiento, es decir presentó una humedad inicial baja promedio de **10.1 %**, que correspondía a un grado de saturación del **49.9%**, que luego llegó a la saturación con una de humedad de **19.5%**, con la que alcanzó el colapso, para un esfuerzo de **950 kPa**.
- El cambio de humedad que experimentó ésta unidad desde la condición inicial a la saturación fue de **9.4%**.
- La condición de grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **48.7% a 51.1%**, con un valor promedio de **49.9%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **51.1%**.

- El asentamiento por colapso que presentaría la unidad, tomando el espesor del estrato de 0.40 m, resultaría un valor de:

$$\delta h = 0.2 * \frac{0.40}{100} = 0.0008 \text{ m} \cong \mathbf{0.08 \text{ cm}}$$

Por lo que si sobre este tipo de suelo con un espesor de 0.40 m, que además posea una humedad con una magnitud de la mitad de la saturación, y sobre éste se tiene una estructura que transmite un esfuerzo de 950 kPa, y luego experimenta un cambio de humedad hasta alcanzar la saturación, este no colapsaría, ya que presentaría asentamientos cercanos a 0.08 cm, que son muy inferiores a las deformaciones máximas permisibles de 2.5 cm, por lo que la edificación no sufriría ningún daño.

- Respecto a la relación de vacíos, se observa el siguiente comportamiento: la relación de vacíos inicial fue de **0.51** (promedio), previo a la saturación era de **0.41** (promedio), luego de la saturación fue de **0.41** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.00**.
- Es importante hacer notar que la relación de vacíos de esta unidad es muy baja, presenta PVS altos, el grado de saturación se encontraba en el orden del 50%, lo que se reflejó en un leve cambio de humedad para conseguir la saturación (9.4%), éstas condiciones propiciaron que esta unidad sea de **colapsabilidad ligera**, con un valor casi despreciable.

#### **De forma general para la Ignimbrita Beta inferior:**

Al evaluar los resultados para el índice y potencial de colapso obtenidos para la Ignimbrita Beta inferior, se observa lo siguiente:

- La disminución en la relación de vacíos en la etapa de colapso para ambos casos se muestra casi despreciable.

- El grado de colapso para las dos condiciones se encuentra cercano al valor inferior del rango ligero, establecido por la normativa de referencia [0.1 a 2.0].
- Al comparar las condiciones iniciales y finales de los resultados se observa que, la Ignimbrita Beta inferior presenta tendencias similares a la Ignimbrita Beta superior con menor probabilidad a colapsar que las unidades G y F, ya que también presenta relaciones de vacíos muy bajas y PVS iniciales altos.
- Comparando los valores de índice y potencial, se observa que para ésta unidad no hubo cambios significativos en la colapsabilidad al haber empleado distintas magnitudes de esfuerzo aplicado.

**IGNIMBRITA ALFA:** Para ésta unidad se obtuvo un índice y **potencial de colapso ligero** en ambos casos, y se describen los resultados de cada uno a continuación:

#### **Análisis de resultados del Índice de Colapso**

- Para ésta unidad (**Ignimbrita Alfa**) se estimaba de correlaciones (ver Tabla No. 2.6 y Gráfico No 2.1) un **grado de colapso medio o moderado**, obteniéndose el resultado de **ligero** (bajo), por lo que la correlación en este caso no coincide con los resultados obtenidos.
- Se pudo determinar que, para ésta unidad, si esta presenta una humedad inicial de **7.4%** que corresponde a un grado de saturación inicial de **23.6%** y luego es afectada por cambios de humedad hasta alcanzar un valor de **26.0%** aproximadamente, este puede sufrir un grado de colapso **ligero**.
- El cambio de humedad (aumento) que experimentó esta unidad desde la condición inicial a la saturación fue de **18.6%**.
- Esta unidad presentó PVS iniciales considerados intermedios, con valor promedio de **1389 kg/m<sup>3</sup>**.

- El grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **22.7%** a **24.4%**, con un valor promedio de **23.6%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **76.4%**.
- Respecto a la relación de vacíos, se observa el siguiente comportamiento: la relación de vacíos inicial fue de **0.76** (promedio), previo a la saturación era de **0.70** (promedio), luego de la saturación fue de **0.68** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.02**.
- Ésta unidad presenta relaciones de vacíos iniciales muy bajas, PVS intermedios, humedades iniciales bajas y cambios de humedad altos para llegar a la saturación, dadas éstas condiciones presenta un grado de colapso **bajo** o **ligero**, que se le puede atribuir a sus condiciones geológicas y a la consolidación de éste material.

#### **Análisis de resultados del Potencial de Colapso**

- Para ésta unidad se estimaba de correlaciones (ver Tabla No. 2.6) un potencial de colapso entre **0.25** a **1.0%**, resultando un valor de **1.5%**, por lo que la correlación en este caso no coincide con los resultados obtenidos.
- El resultado presentó un valor medio de potencial de colapso (1.5), que corresponde a un **grado ligero**.
- Presentó PVS inicial intermedio en el orden de **1321** kg/m<sup>3</sup> como valor promedio.
- Además, no presentó cambios considerables cuando se evalúa su comportamiento, es decir presentó una humedad inicial baja promedio de **8.6%**, que correspondía a un grado de saturación del **24.2%**, que luego llegó a la saturación con humedad de **26.2%**, con la que alcanzó el colapso, para un esfuerzo de **950** kPa.
- El cambio de humedad (aumento) que experimentó ésta unidad desde la condición inicial a la saturación fue de **17.6%**.

- La condición de grado de saturación inicial se encontraba en el orden del **21.3% a 25.8%**, con un valor promedio de **24.2%**, por lo que la capacidad de adquirir agua hasta llegar a la saturación fue cerca del **75.8%**.
- El asentamiento por colapso que presentaría la unidad, tomando el espesor del estrato de 3.30 m resultaría un valor de:

$$\delta h = 1.5 * \frac{3.3}{100} = 0.0495 \text{ m} \cong \mathbf{4.95 \text{ cm}}$$

Por lo que para éste tipo de suelo, con espesor de 3.30 m, que además posea una humedad inicial de magnitud de un tercio de la saturación (8.6%), y sobre este se tiene una estructura que transmite un esfuerzo de 950 kPa, y luego experimenta un cambio de humedad hasta alcanzar la saturación, este podría sufrir asentamientos que podrían manifestarse en grietas, ya que presentaría asentamientos cercanos a 4.95 cm, que son superiores a las deformaciones máximas permisibles de 2.5 cm, por lo que la edificación sufriría daños.

- Respecto a la relación de vacíos, se observa el siguiente comportamiento: la relación de vacíos inicial fue de **0.87** (promedio), previo a la saturación era de **0.70** (promedio), luego de la saturación fue de **0.68** (promedio), por lo que durante el colapso la variación fue de **0.02**.
- Es importante hacer notar que la relación de vacíos de esta unidad es muy baja, presenta un PVS intermedio, además el cambio de humedad para conseguir la saturación fue considerable (17.6%), ya que el grado de saturación inicial se encontraba en el orden de un tercio, estas condiciones propiciaron que ésta unidad sea de **colapsabilidad ligera**, aunque podría experimentar grietas en la estructura.

### **De forma general para la Ignimbrita Alfa:**

Al evaluar los resultados para el índice y potencial de colapso obtenidos para la Ignimbrita Alfa, se observa lo siguiente:

- La disminución en la relación de vacíos en la etapa de colapso para ambos casos (índice y potencial) es de **0.02**.
- Comparando los valores de índice y potencial, ambos se encuentran cercanos al valor superior del rango ligero; se observa que para ésta unidad no hubo cambios significativos en la colapsabilidad al haber aplicado distintas magnitudes de esfuerzo.
- Al comparar los resultados iniciales y finales se observa que, la Ignimbrita Alfa presenta una menor probabilidad de colapsar en comparación a las unidades G y F, pero mayor en relación a la Ignimbrita Beta. La Ignimbrita Alfa es más colapsable pues a pesar que su grado de colapso es ligero, ésta podría provocar asentamientos mayores a los permisibles.
- Los valores promedios de relación de vacíos iniciales, fueron mayores que los de las Ignimbritas Betas, pero menores que las unidades G y F.
- Los PVS iniciales promedios fueron menores que las Ignimbritas Betas, pero son mayores que los de las unidades G y F.

#### **Análisis de las propiedades de colapsabilidad:**

Al respecto de la comparación con los resultados de índice y potencial de colapso con las correlaciones con sus propiedades físicas utilizadas se observa:

- Se utilizó el criterio de González de Vallejo (ver Tabla No. 2.6) y el criterio de Moghadam (Gráfico No 2.1) para estimar a priori el resultado de colapsabilidad de las distintas unidades de TBJ estudiadas, partiendo de sus propiedades físicas; PVS y porcentaje de partículas más finas que la malla No. 200. En ambos casos se obtuvo predicciones indirectas en su mayoría acertadas, ya que para ambos criterios se observó que cuatro de cinco predicciones acertaron. (Ver Tabla No. 5.4 y 5.5). La selección de estos criterios no es arbitraria, ya que las principales características de un suelo colapsable dependen de la estructura que puedan presentar:

granulometría mal distribuida, estructura abierta, entre otras propiedades citadas en este documento.

**Tabla No. 5.4. Comparación de resultados del potencial de colapso cada unidad de TBJ estudiada con el criterio de predicción indirecta según González de Vallejo.**

Unidad	PVS (KN/m3)	Predicción indirecta según criterio de González de Vallejo, Tabla No. 5.2		Resultados obtenidos por aplicación de metodología dada por ASTM 5333		
		Potencial de Colapso	Grado de Colapso	Potencial de Colapso (%) valores promedio	Grado de Colapso	Acierto con los resultados obtenidos
<b>G</b>	10.84	1.0% - 5.0%	Medio - Alto	3.6	Moderado	Acertó
<b>F</b>	11.48	1.0% - 5.0%	Medio - Alto	3.1	Moderado	Acertó
<b>Ignimbrita <math>\beta</math> Superior</b>	14.15	Menor a 0.25%	Bajo	0.1	Ligero	Acertó
<b>Ignimbrita <math>\beta</math> Inferior</b>	16.16	Menor a 0.25%	Bajo	0.2	Ligero	Acertó
<b>Ignimbrita <math>\alpha</math></b>	13.22	0.25% - 1.0%	Bajo - Medio	1.5	Ligero	No acertó
No de aciertos						4/5
% de aciertos						80

*Fuente: De los Autores*

**Tabla No. 5.5. Comparación de resultados del potencial de colapso cada unidad de TBJ estudiada con el criterio de predicción indirecta según Moghadam.**

Unidad	PVS (KN/m3)	% Malla 200	Predicción indirecta según criterio de Moghadam (Gráfico 2.1)	Resultados obtenidos por aplicación de metodología dada por ASTM 5333	
			Grado de Colapso	Grado de Colapso	Acierto con los resultados obtenidos
<b>G</b>	10.84	80.10	Moderado - Alto	Moderado	Acertó
<b>F</b>	11.48	32.86	Moderado - Alto	Moderado	Acertó
<b>Ignimbrita <math>\beta</math> Superior</b>	14.15	69.04	Bajo - Nulo	Ligero	Acertó
<b>Ignimbrita <math>\beta</math> Inferior</b>	16.16	68.33	Bajo - Nulo	Ligero	Acertó
<b>Ignimbrita <math>\alpha</math></b>	13.22	20.71	Moderado - Alto	Ligero	No Acertó
No de aciertos					4/5
% de aciertos					80

*Fuente: De los Autores*

Con respecto a los asentamientos calculados para todas las unidades estudiadas se interpreta que:

- En los asentamientos calculados para cada unidad, se partió de las siguientes consideraciones: a) Utilizar el valor Promedio de Potencial de Colapso y b) Utilizar el espesor del estrato en el talud de origen, se obtuvo:
  - Unidad G con un asentamiento de **6.12** cm,
  - Unidad F con un asentamiento de **6.82** cm,
  - Ignimbritas Beta superior e inferior con **0.06** y **0.08** cm respectivamente
  - Ignimbrita Alfa con un asentamiento de **4.95** cm

Éstos resultados fueron presentados anteriormente en el análisis del potencial de colapso y se tabulan en la Tabla No. 5.8.

- Si se considera que la saturación ocurre parcialmente, es decir no se satura todo el espesor del estrato, el asentamiento por metro de altura de estrato se puede calcular utilizando un factor unitario (con dimensiones de mm/mm) a partir de la información dada para la determinación del potencial de colapso según ASTM D5333 se calcula:
  - Altura inicial del espécimen (**H<sub>o</sub>**)
  - Altura del espécimen previo a la saturación (**h'**)
  - Altura del espécimen después del colapso (**h''**)
  - Deformación unitaria por colapso (DU)

$$DU = \frac{h'' - h'}{H_o}$$

Para cada unidad de TBJ se tabularon los datos iniciales y el resultado de la deformación en Tabla No. 5.6:



**Tabla No. 5.6. Cálculo de deformación unitaria por colapso en cada unidad de TBJ estudiada a partir del potencial de colapso.**

Ensayo No.	Parámetro	Esfuerzo axial (kPa)	Ho (mm) Altura inicial de espécimen	h' (mm) Altura del espécimen previo a la saturación	h'' (mm) altura del espécimen después de colapso	Deformación por colapso (mm)	Deformación por colapso referida a la altura inicial del espécimen (DU) (mm/mm)
Unidad: G							
38	Potencial	950	19.500	16.5300	15.8325	0.6975	0.0358
39	Potencial	950	19.600	16.8525	16.0825	0.7700	0.0393
59	Potencial	950	19.600	17.4925	16.8450	0.6475	0.0330
Unidad: F							
18	Potencial	950	19.500	17.3650	16.7100	0.6550	0.0336
19	Potencial	950	19.600	17.9750	17.4330	0.5420	0.0277
Unidad: Ignimbrita Beta Superior							
14	Potencial	950	19.500	18.8680	18.8430	0.0250	0.0013
15	Potencial	950	19.600	19.1230	19.1000	0.0230	0.0012
Unidad: Ignimbrita Beta Inferior							
32	Potencial	950	19.500	18.3630	18.3150	0.0480	0.0025
33	Potencial	950	19.600	18.3700	18.3350	0.0350	0.0018
Unidad: Ignimbrita Alfa							
16	Potencial	950	19.500	17.8080	17.4800	0.3280	0.0168
17	Potencial	950	19.600	17.8300	17.4780	0.3520	0.0180
61	Potencial	950	19.600	17.6980	17.4930	0.2050	0.0105

*Fuente: De los Autores*

Dados los resultados anteriores, y considerando para éste análisis un estrato de un (1) metro de espesor, los asentamientos por unidad se muestran en la Tabla No. 5.7, por tanto:

- Para la unidad G, se percibiría un asentamiento de 36 mm por metro de espesor,
- Para la unidad F, se percibiría un asentamiento de 31 mm por metro de espesor,
- Para las ignimbritas Beta Superior e Inferior, se percibiría un asentamiento de 1 y 2 mm por metro de espesor respectivamente, y
- Para la unidad Alfa, se percibiría un asentamiento 15 mm por metro de espesor.

**Tabla No. 5.7. Asentamiento unitario en cada unidad de TBJ estudiada a partir del potencial de colapso.**

Ensayo No.	Deformación por colapso referida a la altura inicial del espécimen (DU) (mm/mm)	Asentamiento por metro de espesor (mm)	Asentamiento promedio (mm/m)
Unidad: G			
38	0.0358	35.7692	36
39	0.0393	39.2857	
59	0.0330	33.0357	
Unidad: F			
18	0.0336	33.5897	31
19	0.0277	27.6531	
Unidad: Ignimbrita Beta Superior			
14	0.0013	1.2821	1
15	0.0012	1.1735	
Unidad: Ignimbrita Beta Inferior			
32	0.0025	2.4615	2
33	0.0018	1.7857	
Unidad: Ignimbrita Alfa			
16	0.0168	16.8205	15
17	0.0180	17.9592	
61	0.0105	10.4592	

*Fuente: De los Autores*

Lo anterior se resume en la Tabla No. 5.8:

**Tabla No. 5.8 Resumen de asentamientos por colapso determinados a partir del potencial de colapso y el espesor del estrato de cada unidad de TBJ estudiada.**

Unidad	Espesor de Unidad (m)	Potencial de Colapso. (%)	Asentamiento por colapso (cm)	Asentamiento unitario (mm/m)
<b>G</b>	1.70	3.6 (Moderado)	6.12	36
<b>F</b>	2.20	3.1 (Moderado)	6.82	31
<b>Ign. Beta Superior.</b>	0.60	0.1 (Ligero)	0.06	1
<b>Ign. Beta Inferior.</b>	0.40	0.2 (Ligero)	0.08	2
<b>Ign. Alfa</b>	3.30	1.5 (Ligero)	4.95	15

*Fuente: de los Autores*

De la Tabla No. 5.8 se puede decir, que las unidades G y F son las que presentarían las mayores deformaciones al saturarse, resultando en valores superiores a los admisibles.

Comparando las características físicas iniciales de humedad, relación de vacíos, peso volumétrico seco y los resultados de colapso de todas las unidades se observa:

- La Ignimbrita Beta superior e inferior poseen los mayores PVS y relación de vacíos más bajos, presentaron índice y potencial de colapso más bajos, en consecuencia, las menores deformaciones, a diferencia de las Unidades G y F las que poseen los menores PVS y relación de vacíos más altos, presentaron índice y potencial de colapso más altos. Por otra parte, las propiedades físicas de la Ignimbrita Alfa y sus resultados de colapsabilidad se consideran intermedios respecto a las unidades antes mencionadas.
- El contenido de humedad inicial juega un papel muy importante en la magnitud del colapso, la relación entre éstas se observó en la unidad G: para los especímenes en que el contenido de humedad inicial era más alto, el colapso fue menor que en las que la humedad inicial era menor. Este comportamiento puede ser atribuido al incremento de grado de saturación, dado el incremento del contenido de humedad inicial, de tal forma que, el volumen de aire contenido en los vacíos del suelo disminuye y a su vez la tendencia a colapsar.
- Referente a las variaciones volumétricas reflejadas en deformaciones; se observa una reducción de la deformación de colapso a medida que aumenta la magnitud de la carga vertical aplicada sobre el suelo, esto a propósito del comportamiento de las diferentes unidades de TBJ estudiadas, ya que el índice de colapso fue evaluado con 200 kPa y el potencial a 950 kPa. De acuerdo a Mauricio Barrera Bucio (2004) en una

publicación técnica llamada “*Estudios experimentales del comportamiento hidromecánico de suelos colapsable*”, ésta tendencia se debe a que al aplicar mayores cargas, la reducción del volumen de poros consiguiente se traduce en una estructura más densa, que dificulta el desarrollo de las deformaciones de colapso.

## **5.5 RESULTADOS DE COLAPSABILIDAD EN CONDICIÓN COMPACTADA**

Para evaluar el efecto que tiene la compactación del suelo en el fenómeno de colapsabilidad, se realizó la compactación de los especímenes de las unidades F y G para obtener los pesos volumétricos máximos y la humedad óptima basados en la norma ASTM D 698 método A, obtenidos estos valores se procedió a compactar muestras para preparar los especímenes con la humedad óptima, y con variaciones de humedad  $\pm 2\%$  de la humedad óptima. Compactadas dichas unidades se sometieron a las mismas condiciones de esfuerzo y saturación que las unidades naturales descritas en el apartado 5.4 para determinar el potencial de colapso, cuyos resultados se muestran a continuación:

### **UNIDAD G COMPACTADA (MA-11)**

Del ensayo de compactación para la unidad G se obtuvo un peso volumétrico máximo seco de **1380** kg/m<sup>3</sup> que se obtiene con una humedad óptima de **25%** y una humedad de saturación de **27.5%**.

Nota: Refiérase al capítulo 4, apartado 4.7 *RESULTADOS DE ENSAYO*, en la *Tabla 4.24 para observar la hoja de resultados de la Determinación de relación densidad – humedad, según ASTM D698, en la Unidad G. Para la correspondiente verificación gráfica de los valores de densidad máxima seca y humedad óptima de compactación.*

**Tabla No. 5.9. Resultados de ensayos de Potencial de Colapso (950 kPa) de la Unidad G (MA-11) en muestras compactadas, según norma ASTM D 698 (equivalencia AASHTO T99)**

$Y_h$ Max (kg/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	Condiciones Iniciales Especímenes Compactados						Condiciones Finales						Parámetros de colapso		
		$\omega_i$ Ensayo (%)	Sat <sub>i</sub> (%)	$Y_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Y_{di}$ (kg/m <sup>3</sup> )	G <sub>c</sub> (%)	$e_i$	$\omega_f$ (%)	$Y_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Y_{df}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_{pre.sat.}$	$e_{post-colapso}$	$\Delta e$	$e_f$	$I_c$ (%)	Grado de Colapso
1380	Opt. 25	26.4	81.0	1710	1353	98.0	0.79	28.3	1824	1421	0.71	0.71	0.00	0.70	0.04	Nulo
		25.8	79.8	1707	1357	98.3	0.78	27.5	1854	1454	0.67	0.67	0.00	0.66	0.1	Ligero
		24.1	77.0	1708	1376	99.7	0.76	28.3	1854	1445	0.68	0.68	0.00	0.67	0.1	Ligero
	Sat. 27.5	23.9	74.5	1688	1363	98.8	0.78	30.8	1859	1421	0.71	0.71	0.00	0.70	0.1	Ligero
		21.0	60.5	1590	1314	95.2	0.84	30.1	1804	1386	0.75	0.75	0.00	0.74	0.1	Ligero
		21.2	62.4	1610	1328	96.2	0.82	29.8	1800	1386	0.75	0.75	0.00	0.74	0.1	Ligero

Fuente: De los Autores

Donde:

$\omega_i, \omega_f$	=	humedad inicial, final	$e_{pre.sat}$	=	relación de vacíos antes de la saturación
Sat <sub>i</sub>	=	grado de saturación inicial	$e_{post-colapso}$	=	relación de vacíos después de la etapa de colapso
$Y_h$	=	peso volumétrico húmedo	$\Delta e$	=	diferencia de la relación de vacíos ( $e_{pre.sat} - e_{post-colapso}$ )
$Y_{di}, Y_{df}$	=	peso volumétrico seco inicial, final	$I_c$	=	potencial de colapso
$Y_{sat}$	=	peso volumétrico saturado			
G <sub>c</sub>	=	grado de compactación			
$e_i, e_f$	=	relación de vacíos inicial, final			

Con respecto a las propiedades de colapso obtenidas y otros parámetros relacionados (refiérase Tabla No. 5.9) a se observa lo siguiente para la unidad G, según contenidos de humedad de los especímenes:

### **Rama seca (4% menos que la humedad óptima)**

#### **Análisis de resultados**

Para el análisis de los resultados de la compactación con una variación del 4% de la humedad óptima en la rama seca, se tomarán como referencia las características físicas de la unidad G en condición natural, que presentó un Potencial de colapso **moderado**.

Si se comparan las condiciones iniciales en estado natural y compactado se determina lo siguiente:

- En estado natural el suelo tenía un PVS promedio inicial de **1121 kg/m<sup>3</sup>**, que si se compara con la densidad óptima cuyo valor es de **1380 kg/m<sup>3</sup>**, se puede decir que el suelo natural tendría un grado de compactación del **81%**.
- El PVS obtenido para la condición en estudio fue de **1321 kg/m<sup>3</sup>**, alcanzando con ello un grado de compactación de **95.7%**, lo que refleja un **incremento** de grado de compactación con respecto al valor natural de **14.7%**, (para una humedad de compactación de 21.1%)
- Luego de la saturación el suelo obtuvo un PVS de **1386 kg/m<sup>3</sup>**, que comparado con el valor óptimo, tuvo un incremento de **0.43%**, esto se debe por el acomodo de las partículas del suelo saturado producto del esfuerzo aplicado.
- La relación de vacíos inicial en estado natural (promedio) era de **1.17** y la obtenida luego de la compactación para esta condición fue de **0.83**, significa que producto de la compactación el suelo tuvo una disminución de relación de vacíos de **0.34** respecto a la condición natural.

- Durante la etapa de colapso la relación de vacíos final en la condición natural fue de **0.80**, por otra parte, la relación de vacíos final en la condición compactada fue de **0.75**, lo que significa una variación de **0.05**.
- El grado de saturación inicial en la condición natural fue de **28.1%**, que se consiguió con una humedad de **13.3%** (promedio), por otro lado, para la condición compactada fue de **61.5%**, que se consiguió con una humedad de **21.1%** (promedio).
- En la condición natural, el 100% de la saturación se consiguió con una humedad de **34.9%**, por otro lado, en la condición compactada, la saturación se consiguió con un valor de humedad de **29.9%** (promedio), lo que significa una variación (disminución) de un **5%** en el contenido de humedad.
- El potencial de colapso, para la condición natural fue de **3.6** (promedio); para la condición compactada, con un 4% debajo de la humedad óptima se obtuvo un valor de **0.1**, lo que conlleva a una disminución de **3.5** en el potencial, es decir, disminuye su propensión al colapso.

Del análisis anterior se puede decir que cuando se alcanzan grados de compactación cercanos al 96% obtenido en la rama seca y con una humedad de compactación de 21.1% se puede disminuir las características de colapsabilidad de la unidad G de la siguiente manera:

- Se reduce el potencial de colapso de **3.6** (estado natural) a **0.1** (producto de la compactación), es decir de condición moderada a condición casi nula
- Existe un incremento en el grado de compactación del **14.7%** con respecto al natural, lo que se refleja en una disminución de la relación de vacíos en **0.34**, producto de la compactación.
- Existe una disminución de la humedad para alcanzar la saturación en un valor de **5%** entre la condición natural y compactada.

## **Rama seca (1% aproximadamente menos que la humedad óptima)**

### **Análisis de resultados**

Para el análisis de los resultados de la compactación con una variación del 1% de la humedad óptima en la rama seca, se tomarán como referencia las características físicas que presentó la unidad G en condición natural, que presentó un Potencial de colapso moderado.

Si se comparan las condiciones iniciales en estado natural y compactado se determina lo siguiente:

- En estado natural el suelo presentó un grado de compactación del **81%**.
- El PVS obtenido para la condición en estudio fue de **1370 kg/m<sup>3</sup>**, alcanzando con ello un grado de compactación de **99.3%**, lo que refleja un **incremento** de grado de compactación con respecto al valor natural de **18.3%**, (para una humedad de compactación de 24%)
- Luego de la saturación el suelo obtuvo un PVS de **1433 kg/m<sup>3</sup>**, que comparado con el valor óptimo, tuvo un incremento de **3.84%**, esto se debe por el acomodo de las partículas del suelo saturado producto del esfuerzo aplicado.
- La relación de vacíos inicial en estado natural era de **1.17** (promedio) y la obtenida luego de la compactación para ésta condición fue de **0.77**, significa que producto de la compactación el suelo tuvo una disminución de relación de vacíos de **0.40** respecto a la condición natural.
- Durante la etapa de colapso la relación de vacíos final en la condición natural fue de **0.80**, por otra parte, la relación de vacíos final en la condición compactada fue de **0.70**, lo que significa una variación de **0.10**.
- El grado de saturación inicial en la condición natural fue de **28.1%**, que se consiguió con una humedad de **13.3%** (promedio), por otro lado, para la



condición compactada fue de **75.8%**, que se consiguió con una humedad de **24.0%** (promedio).

- En la condición natural, el 100% de la saturación se consiguió con una humedad de **34.9%**, por otro lado, en la condición compactada, la saturación se consiguió con un valor de humedad de **29.5%** (promedio), lo que significa una variación (disminución) de un **5.4%** en el contenido de humedad.
- El potencial de colapso, para la condición natural fue de **3.6** (promedio); para la condición compactada, con un 1% debajo de la humedad óptima se obtuvo un valor de **0.1**, lo que conlleva a una disminución de **3.5** en el potencial, es decir, disminuye su propensión al colapso.

Del análisis anterior se puede decir que cuando se alcanzan grados de compactación cercanos al 99% obtenido en la rama seca y con una humedad de compactación de 24.0% se puede disminuir las características de colapsabilidad de la unidad G de la siguiente manera:

- Se reduce el potencial de colapso de **3.6** (estado natural) a **0.1** (producto de la compactación), es decir de condición moderada a condición casi nula.
- Existe un incremento en el grado de compactación del **18.3%** con respecto al natural, lo que se refleja en una disminución de la relación de vacíos en **0.40**, producto de la compactación.
- Existe una disminución de la humedad para alcanzar la saturación en un valor de **5.4%** entre la condición natural y compactada.

### **Rama húmeda (1% aproximadamente mayor que la humedad óptima)**

#### **Análisis de resultados**

Para el análisis de los resultados de la compactación con una variación del 1% de la humedad óptima en la rama húmeda, se tomarán como referencia las

características físicas de la unidad G en condición natural, que presentó un Potencial de colapso moderado.

Si se comparan las condiciones iniciales en estado natural y compactado se determina lo siguiente:

- En estado natural el suelo presentó un grado de compactación del **81%**.
- El PVS obtenido para la condición en estudio fue de **1355 kg/m<sup>3</sup>**, alcanzando con ello un grado de compactación de **98.2%**, lo que refleja un **incremento** de grado de compactación con respecto al valor natural de **17.2%**, (para una humedad de compactación de 26.1%).
- Luego de la saturación el suelo obtuvo un PVS de **1438 kg/m<sup>3</sup>**, que comparado con el valor óptimo, tuvo un incremento de **4.20%**, esto se debe al acomodo de las partículas del suelo saturado producto del esfuerzo aplicado.
- La relación de vacíos inicial en estado natural era de **1.17** (promedio) y la obtenida luego de la compactación para esta condición fue de **0.79**, significa que producto de la compactación el suelo tuvo una disminución de relación de vacíos de **0.38** respecto a la condición natural.
- Durante la etapa de colapso la relación de vacíos final en la condición natural fue de **0.80**, por otra parte, la relación de vacíos final en la condición compactada fue de **0.68**, lo que significa una variación de **0.12**.
- El grado de saturación inicial en la condición natural fue de **28.1%**, que se consiguió con una humedad de **13.3%** (promedio), por otro lado, para la condición compactada fue de **80.4%**, que se consiguió con una humedad de **26.1%** (promedio).
- En la condición natural, el 100% de la saturación se consiguió con una humedad de **34.9%**, por otro lado, en la condición compactada, la saturación se consiguió con un valor de humedad de **27.9%** (promedio), lo

que significa una variación (disminución) de un **7%** en el contenido de humedad.

- El potencial de colapso, para la condición natural fue de **3.6** (promedio); para la condición compactada, con un **1%** por encima de la humedad óptima se obtuvo un valor de **0.07**, lo que conlleva a una disminución de **3.53** en el potencial, es decir, disminuye su propensión al colapso.

Del análisis anterior se puede decir que: cuando se alcanza grados de compactación cercanos al 98% obtenido en la rama húmeda y con una humedad de compactación de 26.1% se puede disminuir las características de colapsabilidad de la unidad G de la siguiente manera:

- Se reduce el potencial de colapso de **3.6** (estado natural) a **0.07** (producto de la compactación), es decir de condición moderada a condición casi nula.
- Existe un incremento en el grado de compactación del **17.2%** con respecto al natural, lo que se refleja en una disminución de la relación de vacíos en **0.38**, producto de la compactación.
- Existe una disminución de la humedad para alcanzar la saturación en un valor de 7% entre la condición natural y compactada.

### **Análisis de compactación de la unidad G**

Se realiza a continuación un análisis para los rangos de grados de compactación a los que se les evaluó el potencial de colapso, al respecto se puede decir:

Cuando se aplica un esfuerzo de **950 kPa** a éste suelo (Unidad G) compactado con las variaciones de contenido de humedad de **4%** y **1%** debajo de la humedad óptima, se alcanzaron grados de compactación en el orden de **96%**, **99%**, respectivamente, y, con variación del **1%** sobre la humedad óptima se alcanzó un grado de compactación de **98%**, se logró reducir el potencial de colapso de un valor de **3.6** para una condición inalterada a un valor de **0.1**, como se observó

en la rama seca, y, a **0.07** en la rama húmeda; en consecuencia, se redujo el colapso de **moderado a ligero (casi nulo)**.

La disminución del potencial de colapso desde **3.6** hasta **0.10** se obtuvo con **incrementos del grado de compactación** respecto a la condición natural según se detalla:

- Incremento cercano al **15%**, para un grado de compactación ( $G_c$ ) del **96%** con humedades de compactación del orden de **4%** debajo de la óptima.
- Incremento cercano al **18%**, para un  $G_c$  del **99%** con humedades de compactación del orden de **1%** debajo de la óptima.

Y una disminución de potencial de colapso hasta **0.07** con incremento cercano al **17%**, para un  $G_c$  del **98%** con humedades de compactación del orden de **1%** sobre de la óptima.

Existe una **disminución de la humedad de saturación** entre la condición natural y compactada según se detalla:

- Para el  $G_c$  del **96%** se redujo en **5%**,
- Para el  $G_c$  del **99%** se redujo en **5.4%**, ambas en rama seca, y,
- Para el  $G_c$  del **98%** se redujo en **7%**, en la rama húmeda.

Existe una **disminución de la relación de vacíos** entre la condición natural y compactada de la siguiente forma:

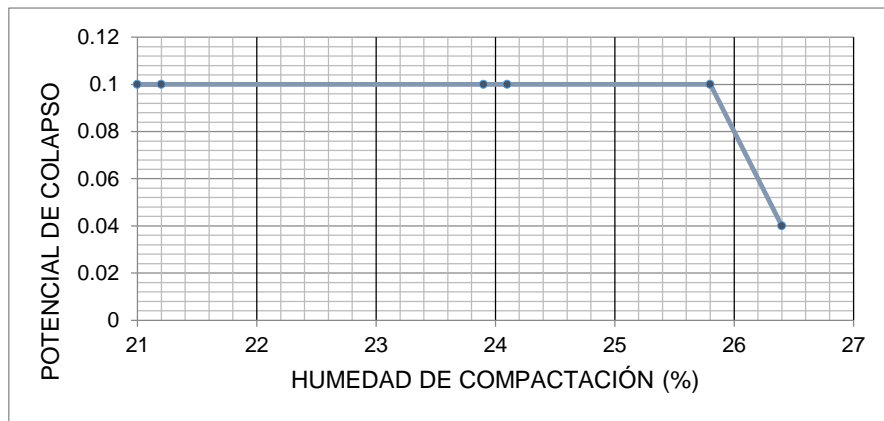
- Para el  $G_c$  del **96%**, alrededor de **0.34**,
- Para el  $G_c$  del **99%**, alrededor de **0.40**, ambos en la rama seca, y,
- Para el  $G_c$  del **98%**, alrededor de **0.38**, en la rama húmeda.

Por lo anterior, se determina entonces que cuando la unidad G es sometida a un proceso de compactación mecánica se reduce significativamente la propensión natural de ésta unidad a experimentar colapso, ya que después de compactarse

se observa un cambio de la condición de **moderado** a **ligero** (casi nulo) en su grado de colapso, lo que se logra con grados de compactación en el rango del **96% al 99%**.

Para esta unidad, y bajo las condiciones de ensayo a los especímenes compactados no se observan cambios significativos en el potencial de colapso dada la variación de las humedades de compactación, como se muestra en el Gráfico No. 5.1.

**Gráfico 5.1. Relación potencial de colapso y humedad de compactación de la Unidad G.**



Fuente: De los Autores

### **UNIDAD F COMPACTADA (MA-09)**

Del ensayo de compactación para la unidad F se obtuvo que el peso volumétrico máximo seco fue de **1400 kg/m<sup>3</sup>** que se obtiene con una humedad óptima de **18%** y una humedad de saturación de **25.6%**.

Nota: Refiérase al capítulo 4, apartado 4.7 *RESULTADOS DE ENSAYO*, en la Tabla No 4.25 para observar la hoja de resultados de la Determinación de relación densidad – humedad, según ASTM D698, en la Unidad F. Para la correspondiente verificación gráfica de los valores de densidad máxima seca y humedad óptima de compactación.

**Tabla No. 5.10. Resultados de ensayos de Potencial de Colapso (950 kPa) de la Unidad F (MA – 09) (Talud No2 UES), en muestras compactadas, según norma ASTM D 698 (equivalencia AASHTO T99)**

Y <sub>h</sub> Max kg/m <sup>3</sup>	ω (%)	Condiciones iniciales Especímenes Compactados						Condiciones Finales						Parámetros de colapso		
		ω Ensayo. (%)	Sat <sub>i</sub> (%)	Y <sub>h</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Y <sub>di</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	G <sub>c</sub> (%)	e <sub>i</sub>	ω <sub>f</sub> (%)	Y <sub>sat</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Y <sub>df</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	e <sub>pre.sat.</sub>	e <sub>post- colapso</sub>	Δe	e <sub>f</sub>	I <sub>c</sub> (%)	Grado de Colapso
1400	Opt 18	15.2	39.6	1393	1208	86.3	0.87	29.3	1792	1386	0.68	0.64	0.04	0.63	2.00	Ligero
		16.7	48.3	1479	1267	90.5	0.78	25.9	1723	1369	0.67	0.65	0.02	0.65	1.05	Ligero
		16.3	46.2	1490	1280	91.4	0.83	25.0	1721	1377	0.72	0.70	0.02	0.69	1.05	Ligero
		18.7	58.0	1584	1334	95.3	0.75	25.8	1817	1444	0.63	0.63	0.00	0.62	0.41	Ligero
		18.1	55.5	1536	1300	92.9	0.74	25.8	1776	1412	0.61	0.60	0.01	0.6	0.19	Ligero
		18.5	61.8	1597	1348	96.3	0.68	27.7	1854	1452	0.56	0.56	0.00	0.56	0.26	Ligero
	Sat 25.6	20.5	67.5	1648	1367	97.7	0.71	24.8	1817	1455	0.62	0.61	0.01	0.60	0.35	Ligero
		20.3	62.1	1596	1327	94.8	0.76	25.2	1790	1430	0.65	0.64	0.01	0.63	0.34	Ligero
		20.7	63.4	1571	1302	93.0	0.74	24.8	1796	1439	0.59	0.58	0.01	0.57	0.45	Ligero
		20.7	62.9	1563	1295	92.5	0.75	24.4	1731	1391	0.64	0.63	0.01	0.62	0.34	Ligero
		21.4	71.8	1673	1378	98.4	0.70	23.8	1798	1452	0.62	0.61	0.01	0.61	0.14	Ligero
		22.3	72.7	1666	1362	97.3	0.72	25.3	1818	1451	0.62	0.62	0.00	0.61	0.14	Ligero
		23.3	69.9	1589	1288	92.0	0.75	26.5	1774	1402	0.62	0.62	0.00	0.61	0.17	Ligero
		23.6	75.2	1634	1322	94.4	0.71	25.7	1764	1403	0.62	0.62	0.00	0.61	0.10	Ligero

Fuente: De los Autores

Con respecto a las propiedades de colapso obtenidas y otros parámetros relacionados (refiérase Tabla No. 5.10) a se observa lo siguiente para la unidad F, según contenidos de humedad de los especímenes:

### **Rama seca (3% aproximadamente menos que la humedad óptima)**

#### **Análisis de resultados**

Para el análisis de los resultados de la compactación con una variación del **3%** de la humedad óptima en la rama seca, se tomarán como referencia las características físicas de la unidad F en condición natural, que presentó un Potencial de colapso **moderado**.

Si se comparan las condiciones iniciales en estado natural y compactado se determina lo siguiente:

- En estado natural el suelo tenía un PVS promedio inicial de **1191 kg/m<sup>3</sup>**, que si se compara con la densidad óptima cuyo valor es de **1400 kg/m<sup>3</sup>**, se puede decir que el suelo natural tendría un grado de compactación del **85%**.
- El PVS obtenido para la condición en estudio fue de **1208 kg/m<sup>3</sup>**, alcanzando con ello un G<sub>c</sub> de **86.3%**, lo que refleja un **incremento** en el grado de compactación con respecto al valor natural de **1.3%**, (para una humedad de compactación de 15.2%)
- Luego de la saturación el suelo obtuvo un PVS de **1386 kg/m<sup>3</sup>**, incrementando **14.7%** respecto a la condición inicial, debido al acomodo de las partículas del suelo producto del esfuerzo aplicado, sin embargo, al compararlo con el valor óptimo, se encontró por debajo en un **1.0%**, esto puede deberse al grado de saturación inicial del suelo, dado el bajo contenido de humedad para compactación.
- La relación de vacíos inicial en estado natural (promedio) era de **0.97** y la obtenida luego de la compactación para esta condición fue de **0.87**,

significa que producto de la compactación el suelo tuvo una disminución de relación de vacíos de **0.10** respecto a la condición natural.

- Durante la etapa de colapso la relación de vacíos final en la condición natural fue de **0.72**, por otra parte, la relación de vacíos final en la condición compactada fue de **0.64**, lo que significa una variación (disminución) de **0.08**.
- El grado de saturación inicial en la condición natural fue de **15.7%**, que se consiguió con una humedad de **6.7%** (promedio), por otro lado, para la condición compactada fue de **39.6%**, que se consiguió con una humedad de **15.2%** (promedio).
- En la condición natural, el 100% de la saturación se consiguió con una humedad de **29.6%**, por otro lado, en la condición compactada, la saturación se consiguió con un valor de humedad de **29.3%** (promedio), lo que significa una variación (disminución) de un **0.3%** en el contenido de humedad.
- El potencial de colapso, para la condición natural fue de **3.1** (promedio); para la condición compactada, con una humedad del 3% debajo de la óptima se obtuvo un valor de **2.00**, lo que conlleva a una disminución de **1.1** en el potencial, es decir, disminuye su propensión al colapso

Del análisis anterior se puede decir que cuando se alcanzan grados de compactación cercanos al 86% obtenido en la rama seca y con una humedad de compactación de 15.2% se pueden disminuir las características de colapsabilidad de la unidad F de la siguiente manera:

- Se reduce el potencial de colapso de **3.1** (estado natural) a **2.00** (producto de la compactación), es decir de condición **moderada** a condición **ligera**.
- Existe un incremento en el grado de compactación del **1.3%** con respecto al natural, lo que se refleja en una disminución de la relación de vacíos en **0.10**, producto de la compactación.



- Existe una disminución de la humedad para alcanzar la saturación en un valor de **0.3%** entre la condición natural y compactada.

### **Rama seca (1% aproximadamente menos de la humedad óptima)**

#### **Análisis de resultados**

Para el análisis de los resultados de la compactación con una variación del 1% de la humedad óptima en la rama seca, se tomarán como referencia las características físicas de la unidad F en la condición natural, que presentó un Potencial de colapso **moderado**.

Si se comparan las condiciones iniciales en estado natural y compactado se determina lo siguiente:

- En estado natural el suelo tenía un grado de compactación del **85%**.
- El PVS obtenido para la condición en estudio fue de **1274 kg/m<sup>3</sup>**, alcanzando con ello un grado de compactación de **91.0%**, lo que refleja un **incremento** de grado de compactación con respecto al valor natural de **6.0%**, (para una humedad de compactación de 16.5%).
- Luego de la saturación el suelo obtuvo un PVS de **1373 kg/m<sup>3</sup>**, incrementando **7.77%** respecto a la condición inicial, debido al acomodo de las partículas del suelo producto del esfuerzo aplicado, sin embargo, al compararlo con el valor óptimo, se encontró por debajo en un **1.93%**, esto puede deberse al grado de saturación inicial del suelo, dado el bajo contenido de humedad para compactación.
- La relación de vacíos inicial en estado natural (promedio) era de **0.97** y la obtenida luego de la compactación para esta condición fue de **0.81**, significa que producto de la compactación el suelo tuvo una disminución de relación de vacíos de **0.16** respecto a la condición natural.

- Durante la etapa de colapso la relación de vacíos final en la condición natural fue de **0.72**, por otra parte, la relación de vacíos final en la condición compactada fue de **0.68**, lo que significa una variación de **0.04**.
- El grado de saturación inicial en la condición natural fue de **15.7%**, que se consiguió con una humedad de **6.7%** (promedio), por otro lado, para la condición compactada fue de **47.3%**, que se consiguió con una humedad de **16.5%** (promedio).
- En la condición natural, el 100% de la saturación se consiguió con una humedad de **29.6%**, por otro lado, en la condición compactada, la saturación se consiguió con un valor de humedad de **25.5%** (promedio), lo que significa una variación (disminución) de un **4.1%** en el contenido de humedad.
- El potencial de colapso, para la condición natural fue de **3.1** (promedio); para la condición compactada, con una humedad del 1% debajo de la óptima se obtuvo un valor de **1.05**, lo que conlleva a una disminución de **2.05** en el potencial, es decir, disminuye su propensión al colapso.

Del análisis anterior se puede decir que cuando se alcanzan grados de compactación cercanos al 91% obtenido en la rama seca y con una humedad de compactación de 16.5% se pueden disminuir las características de colapsabilidad de la unidad F de la siguiente manera:

- Se reduce el potencial de colapso de **3.1** (en estado natural) a **1.05** (producto de la compactación), es decir de condición **moderada** a condición **ligera**.
- Existe un incremento del grado de compactación del **6.0%**, con respecto al natural, lo que se refleja en una disminución de la relación de vacíos en **0.16**, producto de la compactación.
- Existe una disminución de la humedad para alcanzar la saturación en un valor de **4.1%** entre la condición natural y compactada.

## **Rama húmeda (1%, aproximadamente mayor de la humedad óptima)**

### **Análisis de resultados**

Para el análisis de los resultados de la compactación con una variación del 1% de la humedad óptima en la rama húmeda, se tomarán como referencia las características físicas de la unidad F en la condición natural, que presentó un Potencial de colapso **moderado**.

Si se comparan las condiciones iniciales en estado natural y compactado se determina lo siguiente:

- En estado natural el suelo presentaba un grado de compactación del **85%**.
- El PVS obtenido para la condición en estudio fue de **1327 kg/m<sup>3</sup>**, alcanzando con ello un grado de compactación de **94.8%**, lo que refleja un **incremento** de grado de compactación con respecto al valor natural de **9.8%**, (para una humedad de compactación de 18.4%).
- Luego de la saturación el suelo obtuvo un PVS de **1436 kg/m<sup>3</sup>**, que, comparada con el valor óptimo, tuvo un incremento de **2.57%**, esto se debe al acomodo de las partículas del suelo saturado producto del esfuerzo aplicado.
- Las relaciones de vacíos inicial en estado natural (promedio) era de **0.97** (promedio) y la obtenida luego de la compactación para esta condición fue de **0.72** (promedio), significa que producto de la compactación el suelo tuvo una disminución de relación de vacíos de **0.25** respecto a la condición natural.
- Durante la etapa de colapso la relación de vacíos final en la condición natural fue de **0.72**, por otra parte, la relación de vacíos final en la condición compactada fue de **0.60**, lo que significa una variación de **0.12**.
- El grado de saturación inicial en la condición natural fue de **15.7%**, que se consiguió con una humedad de **6.7%** (promedio), por otro lado, para la

condición compactada fue de **58.4%**, que se consiguió con una humedad **18.4%** (promedio).

- En la condición natural, el 100% de la saturación se consiguió con una humedad de **29.6%**, por otro lado, en la condición compactada, la saturación se consiguió con un valor de humedad de **26.4%** (promedio), lo que significa una variación (disminución) de un **3.2%** en el contenido de humedad.
- El potencial de colapso, para la condición natural fue de **3.1** (promedio); para condición compactada, con una humedad del 1% arriba de la óptima se obtuvo un valor de **0.29**, lo que conlleva a una disminución de **2.81** en el potencial, es decir, disminuye su propensión al colapso

Del análisis anterior se puede decir que cuando se alcanzan grados de compactación cercanos al 95%, obtenido con una humedad del 18% aproximadamente, se pueden disminuir las características de colapsabilidad de la unidad F de la siguiente manera:

- Se reduce el potencial de colapso de **3.1** (estado natural) a **0.29** (producto de la compactación), es decir de condición **moderada** a condición **ligera (casi nulo)**.
- Existe un incremento en el grado de compactación del **9.8%**, con respecto al natural, lo que se refleja en una disminución de la relación de vacíos en **0.25**, producto de la compactación.
- Existe una disminución de la humedad para alcanzar la saturación en un valor de **3.2%** entre la condición natural y compactada.

### **Rama húmeda (3% aproximadamente mayor de la humedad óptima)**

#### **Análisis de resultados**

Para el análisis de los resultados de la compactación con una variación del 3% de la humedad óptima en la rama húmeda, se tomarán como referencia las

características físicas de la unidad F en la condición natural, que presentó un Potencial de colapso **moderado**.

Si se comparan las condiciones iniciales en estado natural y compactado se determina lo siguiente:

- En estado natural el suelo tenía un grado de compactación del **85%**.
- El PVS obtenido para la condición en estudio fue de **1323 kg/m<sup>3</sup>**, alcanzando con ello un grado de compactación de **94.5%**, lo que refleja un **incremento** de grado de compactación con respecto al valor natural de **9.5%**, (para una humedad de compactación de 20.6%).
- Luego de la saturación el suelo obtuvo un PVS de **1429 kg/m<sup>3</sup>**, que, comparado con el valor óptimo, tuvo un incremento de **2.07%**, esto se debe al acomodo de las partículas del suelo saturado producto del esfuerzo aplicado.
- Las relaciones de vacíos inicial en estado natural (promedio) era de **0.97** y la obtenida luego de la compactación para esta condición fue de **0.74**, significa que producto de la compactación, el suelo tuvo una disminución de relación de vacíos de **0.23** respecto a la condición natural.
- Durante la etapa de colapso la relación de vacíos final en la condición natural fue de **0.72**, por otra parte, la relación de vacíos final en la condición compactada fue de **0.62**, lo que significa una variación de **0.10**.
- El grado de saturación inicial en la condición natural fue de **15.7%**, que se consiguió con una humedad de **6.7%** (promedio), por otro lado, para la condición compactada fue de **64.0%**, que se consiguió con una humedad de **20.6%** (promedio).
- En la condición natural, el 100% de la saturación se consiguió con una humedad de **29.6%**, por otro lado, en la condición compactada, la saturación se consiguió con un valor de humedad de **24.8%** (promedio), lo

que significa una variación (disminución) de un **4.8%** en el contenido de humedad.

- El potencial de colapso, para la condición natural fue de **3.1** (promedio); para la condición compactada, con un **3%** por encima de la humedad óptima se obtuvo un valor de **0.37**, lo que conlleva a una disminución de **2.73** en el potencial, es decir, disminuye su propensión al colapso.

Del análisis anterior se puede decir que cuando se alcanzan grados de compactación cercanos al 95% obtenido en la rama húmeda y con una humedad de compactación de 20.6% se pueden disminuir las características de colapsabilidad de la unidad F de la siguiente manera:

- Se reduce el potencial de colapso de **3.1** (estado natural) a **0.37** (producto de la compactación), es decir de condición **moderada** a condición **ligera (casi nulo)**.
- Existe un incremento del grado de compactación del **9.5%**, con respecto al natural, lo que se refleja en una disminución de la relación de vacíos de **0.23**, producto de la compactación.
- Existe una disminución de la humedad para alcanzar la saturación en un valor de **4.8 %** entre la condición natural y compactada.

### **Rama húmeda (4% aproximadamente mayor de la humedad óptima)**

#### **Análisis de resultados**

Para el análisis de los resultados de la compactación con una variación del 4% de la humedad óptima en la rama húmeda, se tomarán como referencia las características físicas de la unidad F en la condición natural, que presentó un Potencial de colapso **moderado**.

Si se comparan las condiciones iniciales en estado natural y compactado se determina lo siguiente:

- En estado natural el suelo presentaba un grado de compactación del **85%**.
- El PVS obtenido para la condición en estudio fue de **1362 kg/m<sup>3</sup>**, alcanzando con ello un grado de compactación de **97.9%**, lo que refleja un **incremento** de grado de compactación con respecto al valor natural de **12.9%**, (para una humedad de compactación de 21.9%).
- Luego de la saturación el suelo obtuvo un PVS de **1452 kg/m<sup>3</sup>**, que comparado con el valor óptimo, tuvo un incremento de **3.71%**, esto se debe al acomodo de las partículas del suelo saturado producto del esfuerzo aplicado.
- Las relaciones de vacíos inicial en estado natural (promedio) era de **0.97** y la obtenida luego de la compactación para esta condición fue de **0.71**, significa que producto de la compactación el suelo tuvo una disminución de relación de vacíos de **0.26** respecto a la condición natural.
- Durante la etapa de colapso la relación de vacíos final en la condición natural fue de **0.72**, por otra parte, la relación de vacíos final en la condición compactada fue de **0.62**, lo que significa una variación de **0.10**
- El grado de saturación inicial en la condición natural fue de **15.7%**, que se consiguió con una humedad de **6.7%** (promedio), por otro lado, para la condición compactada fue de **72.3%**, que se consiguió con una humedad de **21.9%** (promedio).
- En la condición natural, el 100% de la saturación se consiguió con una humedad de **29.6%**, por otro lado, en la condición compactada, la saturación se consiguió con un valor de humedad de **24.6%** (promedio), lo que significa una variación (disminución) de un **5.0%** en el contenido de humedad.
- El potencial de colapso, para la condición natural fue de **3.1** (promedio); para la condición compactada, con una humedad del **4%** por encima de la óptima se obtuvo un valor de **0.14**, lo que conlleva a una disminución de **2.96** en el potencial, es decir, disminuye su propensión al colapso.

Del análisis anterior se puede decir que cuando se alcanzan grados de compactación cercanos al 98% obtenido en la rama húmeda y con una humedad de compactación de 21.9% se pueden disminuir las características de colapsabilidad de la unidad F de la siguiente manera:

- Se reduce el potencial de colapso de **3.1** (estado natural) a **0.14** (producto de la compactación), es decir de condición **moderada** a condición **ligera (casi nulo)**.
- Existe un incremento del grado de compactación del **12.9%**, con respecto al grado de compactación natural, lo que se refleja en una disminución de la relación de vacíos de **0.26**, producto de la compactación.
- Existe una disminución de la humedad para alcanzar la saturación en un valor de **5.0 %** entre la condición natural y compactada.

### **Rama húmeda (5% aproximadamente mayor de la humedad óptima)**

#### **Análisis de resultados**

Para el análisis de los resultados de la compactación con una variación del 5% de la humedad óptima en la rama húmeda, se tomarán como referencia las características físicas de la unidad F en la condición natural, que presentó un Potencial de colapso **moderado**.

Si se comparan las condiciones iniciales en estado natural y compactado se determina lo siguiente:

- En estado natural el suelo presentaba un grado de compactación del **85%**.
- El PVS obtenido para la condición en estudio fue de **1305 kg/m<sup>3</sup>**, alcanzando con ello un grado de compactación de **93.2%**, lo que refleja un **incremento** de grado de compactación con respecto al valor natural de **8.2%**, (para una humedad de compactación de 23.5%).



- Luego de la saturación el suelo obtuvo un PVS de **1403** kg/m<sup>3</sup>, que, comparado con el valor óptimo, tuvo un incremento de **0.21%**, esto se debe al acomodo de las partículas del suelo saturado producto del esfuerzo aplicado.
- Las relaciones de vacíos inicial en estado natural (promedio) era de **0.97** y la obtenida luego de la compactación para esta condición fue de **0.73**, significa que producto de la compactación el suelo tuvo una disminución de relación de vacíos de **0.24** respecto a la condición natural.
- Durante la etapa de colapso la relación de vacíos final en la condición natural fue de **0.72**, por otra parte, la relación de vacíos final en la condición compactada fue de **0.62**, lo que significa una variación de **0.10**.
- El grado de saturación inicial en la condición natural fue de **15.7%**, que se consiguió con una humedad de **6.7%** (promedio), por otro lado, para la condición compactada fue de **72.6%**, que se consiguió con una humedad de **23.5%** (promedio).
- En la condición natural, el 100% de la saturación se consiguió con una humedad de **29.6%**, por otro lado, en la condición compactada, la saturación se consiguió con un valor de humedad de **26.1%** (promedio), lo que significa una variación (disminución) de un **3.5%** en el contenido de humedad.
- El potencial de colapso, para la condición natural fue de **3.1** (promedio); para la condición compactada, con un **4%** por encima de la humedad óptima se obtuvo un valor de **0.14**, lo que conlleva a una disminución de **2.96** en el potencial, es decir, disminuye su propensión al colapso.

Del análisis anterior se puede decir que cuando se alcanzan grados de compactación cercanos al 93% obtenido en la rama húmeda y con una humedad de compactación de 23.5% se pueden disminuir las características de colapsabilidad de la unidad F de la siguiente manera:

- Se reduce el potencial de colapso de **3.1** (estado natural) a **0.14** (producto de la compactación), es decir de condición **moderada** a condición **ligera (casi nula)**.
- Existe un incremento del grado de compactación del **8.2%**, con respecto al grado de compactación natural, lo que se refleja en una disminución de la relación de vacíos de **0.24**, producto de la compactación.
- Existe una disminución de la humedad para alcanzar la saturación en un valor de **3.5 %** entre la condición natural y compactada.

### **Análisis de compactación de la unidad F**

Se realiza continuación un análisis para los rangos de grados de compactación a los que se les evaluó el potencial de colapso, al respecto se puede decir:

- Cuando se aplica un esfuerzo de **950 kPa** a éste suelo (Unidad F) compactado con las variaciones de contenido de humedad de **3%** y **1%** debajo de la humedad óptima, se alcanzaron grados de compactación en el orden de **86%** y **91%**, respectivamente, se logró reducir el potencial de colapso de un valor de **3.1** para la condición inalterada a valores de **2.00** y **1.05** respectivamente, producto de la compactación; pasando de una condición **moderada** a **ligera**.
- Bajo el mismo esfuerzo, sin embargo, compactando con las variaciones de contenido de humedad de **1%** y **3%** arriba de la humedad óptima, se alcanzaron grados de compactación en el orden de **95%**, se logró reducir el potencial de colapso de un valor de **3.1** para la condición inalterada a valores de **0.29** y **0.37** respectivamente, producto de la compactación; pasando de una condición **moderada** a **ligera (casi nulo)**.
- Por otra parte, compactando con las variaciones de contenido de humedad de **4%** y **5%** arriba de la humedad óptima, se alcanzaron grados de compactación en el orden de **98%** y **93%**, respectivamente, se logró

reducir el potencial de colapso de un valor de **3.1** para la condición inalterada a valores de **0.14** en ambos casos, producto de la compactación; pasando de una condición **moderada** a **ligera (casi nulo)**.

- La disminución del potencial de colapso se obtuvo con **incrementos de grado de compactación** respecto a la condición natural según se detalla:

#### **Rama seca:**

- Disminución de potencial de colapso hasta **2.00** con incremento del 1% para un grado de compactación ( $G_c$ ) del **86%** con humedades de compactación del orden de **3%** debajo de la óptima.
- Disminución del potencial de colapso hasta **1.05** con incremento del 6% para un  $G_c$  del **81%** con humedades de compactación del orden de **1%** debajo de la óptima.

#### **Rama húmeda:**

- Disminución del potencial de colapso hasta **0.29** con incremento cercano al **10%**, para un  $G_c$  del **95%** con humedades de compactación del orden de **1%** sobre de la óptima.
- Disminución de potencial de colapso hasta **0.37** con incremento cercano al **10%**, para un  $G_c$  del **95%** con humedades de compactación del orden de **3%** sobre de la óptima.
- Disminución de potencial de colapso hasta **0.14** con incremento cercano al **13%**, para un  $G_c$  del **98%** con humedades de compactación del orden de **4%** sobre de la óptima.
- Disminución de potencial de colapso hasta **0.14** con incremento cercano al **8%**, para un  $G_c$  del **93%** con humedades de compactación del orden de **5%** sobre de la óptima.

- Existe una **disminución de la humedad de saturación** entre la condición natural y compactada según se detalla:
  - Para el  $G_c$  del **86%** se redujo en **0.3%**,
  - Para el  $G_c$  del **91%** se redujo en **4.1%**; ambos en la rama seca,
  - Para el  $G_c$  del **93%** se redujo en **3.5%**,
  - Para el  $G_c$  del **95%** se redujo en un rango de **3.2%** a **4.8%**,
  - Para el  $G_c$  del **98%** se redujo en **5.0%**, todos en anteriores en la rama húmeda.
- Existe una **disminución de la relación de vacíos** entre la condición natural y compactada de la siguiente forma:
  - Para el  $G_c$  del **86%** se redujo en **0.10**,
  - Para el  $G_c$  del **91%** se redujo en **0.16**, % ambos en la rama seca;
  - Para el  $G_c$  del **93%** se redujo en **0.24**,
  - Para el  $G_c$  del **95%** se redujo en un rango de **0.23** a **0.25**,
  - Para el  $G_c$  del **98%** se redujo en **0.26**, todas las anteriores en la rama húmeda.

Por lo anterior, se observa que para humedades de compactación más altas que la óptima en un rango de **1** a **5%**, se consiguieron mejores resultados de compactación, ya que el PVS del suelo aumenta hasta en un **22.2%** y el Grado de Compactación aumenta hasta un **13%** de su valor original, así mismo, el potencial de colapso decrece hasta en un **95.5%**

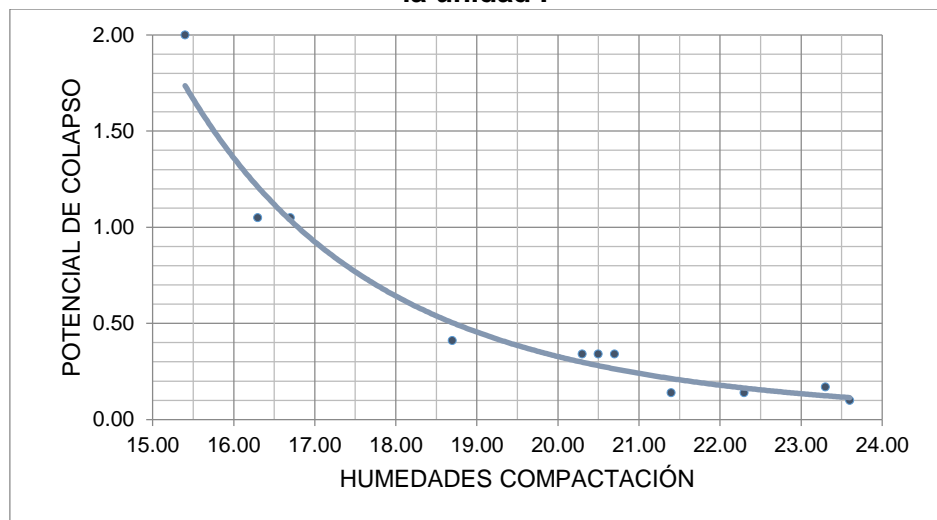
Es importante notar que el contenido de humedad inicial en las muestras inalteradas fue la humedad in situ; para los especímenes compactados, aquella con que se prepara la muestra para su compactación.

- La estructura suelta del suelo colapsable, en el caso de interés, las TBJ, es un elemento clave en el fenómeno de colapso. De estudios anteriores, se ha encontrado que cuando ingresa la humedad a éstos suelos la unión

cementante se debilita o disuelve a tal grado en que ya no es capaz de soportar la carga aplicada, y el suelo colapsa.

- Se observó que cuando el grado de compactación del suelo es del 95% o mayor, el potencial de colapso disminuye hasta en un 95.5% del valor en estado natural o inalterado.
- Es importante destacar que a medida que el contenido de humedad inicial incrementó, así también el grado de saturación, en ésta misma medida, disminuyó el potencial de colapso, ésta relación se presenta en el Gráfico No. 5.2. en donde se observa una curva decreciente.

**Gráfico No. 5.2 Relación potencial de colapso y humedad de compactación de la unidad F**



*Fuente: De los Autores*

- Para valores menores de grado de compactación, entre el 90 y el 95%, el potencial de colapso es relativamente mayor; con resultados entre **0.29** a **1.05**, pero menor al del estado natural (**3.1**).

- Para compactaciones menores al 90%, los resultados de colapsabilidad incrementaron hasta un valor de **2.0**, sin embargo, continúan siendo menores al del estado natural.
- La humedad de compactación para disminuir significativamente el potencial de colapso se observa que se encuentra comprendida entre la humedad óptima de compactación (**18%**) y hasta un **5%** mayor a ésta, pero sin llegar a la humedad de saturación (**25.6%**), ya que, al compactar un suelo con poca humedad, las partículas carecen de la lubricación necesaria para reorganizarse en un estado más denso. La adición de agua mejora la cohesión y lubricación, pero con el exceso se saturan los vacíos, llenándose de agua provocando la disminución en la resistencia a la carga de la estructura del suelo.

# **CAPITULO No. 6**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 6.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo de graduación se presentan clasificadas según:

- Propiedades geotécnicas de las unidades estudiadas,
- Colapsabilidad en especímenes inalterados,
- Colapsabilidad en especímenes compactados,

## PROPIEDADES GEOTÉCNICAS

De los resultados obtenidos de la caracterización de las muestras recolectadas en campo a fin de determinar sus propiedades físicas, se concluye respecto a los taludes de origen:

### Talud No 3 UES

- En éste talud se encontró Unidad G, clasificada según SUCS como Limo con Arena (ML), con partículas de pómez, color café claro con finos no plásticos, Tamaño Máximo de la partícula de 4.75 mm, Gravedad Específica de 2.42, Peso Volumétrico Seco promedio de 1105 Kg/m<sup>3</sup>, relación de vacíos inicial de 1.20 y grado de saturación inicial de 30.9%.

### Talud No 2 UES

- En éste talud se encontró Unidad F, clasificada según SUCS como Arena con Limo (SM), con partículas de pómez, color beige con finos no plásticos, Tamaño Máximo de la partícula de 37.5 mm, Gravedad Específica de 2.26, Peso Volumétrico Seco promedio de 1171 Kg/m<sup>3</sup>, relación de vacíos inicial de 0.97 y grado de saturación inicial de 15.9%.

### Talud ZF-1

En éste talud fueron encontradas las siguientes unidades:

- Ignimbrita Beta Superior, clasificada según SUCS como Limo con Arena (ML), color café con finos no plásticos, Tamaño Máximo de la partícula de



2.0 mm, Gravedad Especifica de 2.50, Peso Volumétrico Seco promedio de 1443 Kg/m<sup>3</sup>, relación de vacíos inicial de 0.74 y grado de saturación inicial de 63.4%.

- Ignimbrita Beta Inferior, clasificada según SUCS como Limo con Arena (ML), color gris con finos no plásticos, Tamaño Máximo de la partícula de 2.0 mm, Gravedad Especifica de 2.51, Peso Volumétrico Seco promedio de 1648 Kg/m<sup>3</sup> relación de vacíos inicial de 0.52 y grado de saturación inicial de 53.9%.
- Ignimbrita Alfa, clasificada según SUCS como Arena con Limo (SM), con trazas de pómez color beige y finos no plásticos, Tamaño Máximo de la partícula de 25.0 mm, Gravedad Especifica de 2.47, Peso Volumétrico Seco promedio de 1348 Kg/m<sup>3</sup>, relación de vacíos inicial de 0.83 y grado de saturación inicial de 24.0%.

De manera general, respecto a la caracterización geotécnica de las Unidades de TBJ estudiadas, se concluye:

- De las unidades de TBJ, las Ignimbrita Beta superior e inferior presentaron los pesos volumétricos secos y gravedades específicas más altos y las más bajas relaciones de vacíos.
- Las unidades G y F presentaron los pesos volumétricos y gravedades específicas más bajos, y, relaciones de vacíos más altas.
- Los valores intermedios para estas propiedades geotécnicas fueron presentados por la Ignimbrita Alfa.
- Para todas las unidades de TBJ estudiadas las relaciones de vacíos resultaron ser bajas a muy bajas.

- Las variaciones en los pesos volumétricos se pueden atribuir a la forma de depósito y su posición relativa al resto de unidades en la columna estratigráfica; por otra parte, las variaciones en las gravedades específicas, a la composición mineralógica propia de cada unidad.

## **COLAPSABILIDAD EN ESPECIMENES INALTERADOS**

Con base a los resultados obtenidos mediante el procedimiento de ensayo de la determinación de índice y potencial de colapso, basado en la norma ASTM D 5333, se concluye:

- Respecto a la Unidad G:
  - Presentó dos rangos de índice de colapso: ligero y moderado.
  - Esta unidad presentó un potencial de colapso de moderado.
  - La colapsabilidad de esta unidad está muy relacionada con el grado de saturación inicial del suelo, de tal manera que, cuando el grado de saturación aumenta, el índice de colapso disminuye.
- La unidad F, presento un índice y potencial de colapso moderado.
- Las unidades de TBJ, que presentaron la mayor propensión al colapso, las relaciones de vacíos más altas, los Pesos Volumétricos Secos y grados de saturación más bajos fueron la G y F
- Las Ignimbrita Beta superior e inferior, presentaron el índice y potencial de colapso más bajo, clasificado como ligero, además presentaron las relaciones de vacíos más bajas, Pesos Volumétricos Secos y grado de saturación más altos.
- La Ignimbrita Alfa presento índice y potencial de Ligero, además las relaciones de vacíos muy bajas, Pesos Volumétricos Secos y grado de saturación intermedia respecto al resto de unidades.
- Respecto al Índice (Ie) y Potencial (Ic) de colapso:

- Los valores más altos corresponden a las unidades G y F.
- El valor intermedio corresponde a la Ignimbrita Alfa.
- Las Ignimbritas Betas presentaron los valores más bajos.
- De manera general, para las unidades de TBJ, a menor densidad seca, grado de saturación y mayor relación de vacíos; mayores serán las características de colapsabilidad que presenten (unidades F y G).
- Al evaluar las características de colapsabilidad de forma indirecta, de las TBJ, a través del PVS y de la fracción más fina que la malla 200 (0.075 mm), se acertó en un 80%
- Las unidades G, F e Ignimbrita Alfa, presentaron deformaciones durante el colapso mayores a 2.5 cm, considerando la saturación completa del estrato, de presentarse dicho fenómeno estos suelos pueden sufrir agrietamientos y asentamientos importantes
- Al considerar la saturación completa del estrato para la Ignimbrita Beta, esta presentó deformaciones durante el colapso menores a 2.5 cm, por lo que se determina que el riesgo de colapso es bajo, con tendencia a nulo.

## **COLAPSO EN ESPECIMENES COMPACTADOS**

Con base a los resultados obtenidos mediante el procedimiento de ensayo dado por la normativa ASTM C 698 para determinación de la relación Densidad - Humedad óptima de compactación, y de la determinación de potencial de colapso, basado en la norma ASTM D 5333, se concluye:

Respecto a la Unidad G:

- Al compactar con el Método A de la norma ASTM D698 se logró incrementar el peso volumétrico seco del suelo hasta obtener un grado de compactación del 99% respecto al óptimo, y reduciendo en un 34.2% la relación de vacíos comparado con la condición inalterada.

- Cuando es compactada al menos al 95% del PVS máximo, el potencial de colapso disminuyó hasta en un 97.2% comparado con el valor de la condición inalterada, pasando de un grado de colapso moderado a ligero (casi nulo).
- Para ésta unidad se presentó una disminución en el contenido de humedad necesario para alcanzar la saturación en un valor de 7% entre la condición natural y compactada.
- Al compactar esta unidad con humedades alrededor de la óptima (25%) no se observaron cambios en el potencial de colapso con la variación del contenido de humedad en la rama húmeda y seca, manteniéndose un valor aproximadamente uniforme.

### **Respecto a la Unidad F:**

Al variar los contenidos de humedad para compactación, se observó un comportamiento que relaciona el grado de compactación con la severidad de colapso, según se describe:

- **Rama seca**
  - Al compactar la unidad de F en la rama seca con el Método A de la norma ASTM D698 se incrementó el peso volumétrico seco del suelo en estado natural, obteniéndose grados de compactación entre el 86 y 91% respecto a la densidad óptima, reduciendo la relación de vacíos hasta en un 16.5% en relación de la condición inalterada.
  - Se logró reducir el potencial de colapso entre un 35.5 a 66.1%, pasando de un grado de colapso moderado a ligero.

- **Rama húmeda**

- Al compactar la unidad de F en la rama húmeda, se observó un incremento en el peso volumétrico seco del suelo, en estado natural logrando grados de compactación arriba del 95% respecto al óptimo, reduciendo la relación de vacíos hasta en un 26.8% en relación con la condición inalterada.
- Se logró reducir el potencial de colapso hasta en un 95.5%, pasando de un grado de colapso moderado a ligero (casi nulo).

- **De forma general para la unidad F compactada se observó:**

- Al aumentar el grado de compactación, disminuye el contenido de humedad requerido para la saturación.
- Con la compactación aplicada, tanto en la rama seca y en la húmeda, el colapso se logró disminuir de moderado a ligero.
- La mayor disminución de las características de colapso se presentó en especímenes compactados con contenidos de humedad más altos que el óptimo (rama húmeda).

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Para identificar preliminarmente la susceptibilidad al colapso de un suelo, se puede hacer el uso de propiedades como el peso volumétrico seco y el porcentaje de material más fino que la malla No. 200 (0.075 mm), ya que se comprobó que existe para las TBJ una buena correlación.
- Cuando se identifiquen unidades de TBJ con densidades bajas, y humedades naturales muy por debajo de las de saturación, será necesario aplicar alguna técnica de mejora del terreno, ya que podría presentar problemas de colapsabilidad al saturarse.
- Se recomienda compactar las unidades F y G al menos al 95% de su peso volumétrico seco máximo, con humedades mayores a la óptima pero menores a la de saturación; para un mejoramiento significativo ante el fenómeno de colapso, minimizando los asentamientos.
- Los asentamientos por colapso pueden ser determinados considerando el potencial de colapso y tomando en cuenta el espesor sometido a saturación.
- Debido a que la unidad G compactada con una variación en la humedad de  $\pm 2\%$  respecto a la óptima no presentó variaciones en el potencial de colapso, y, que las humedades de ensayo en la rama húmeda se aproximaron a la humedad de saturación, se sugiere la extensión de la investigación, realizando pruebas con muestras compactadas ampliando el rango dentro de la rama seca, para observar el comportamiento del colapso con un mayor rango de humedades de compactación.

- Se recomienda ampliar la investigación relacionada a la colapsabilidad de las TBJ, ya que éstos son los estratos más superficiales, problemáticos y abundantes del AMSS. En especial en lo relativo a:
  - Estudios similares a éste en la extensión territorial del AMSS,
  - Comportamiento del colapso en las unidades de TBJ en estado natural ante los cambios de humedad, propios del clima regional,
  - Incidencia de la cementación y características mineralógicas de los enlaces de las partículas en la estructura intergranular,
  - Metodologías de mejoramiento de éstos suelos, a fin de disminuir la severidad del colapso,
  - Incidencia de las fuerzas capilares (succión); en cuanto al colapso de unidades de TBJ en estado natural y compactado debido a las variaciones de humedad, y,
  - Realizar estudios para determinar el potencial de colapso aplicando distintos valores de carga, observando el comportamiento del fenómeno bajo esta condición.
  
- Incluir en la enseñanza superior el estudio al fenómeno de colapso y del comportamiento de los suelos no saturados, como parte en las asignaturas relacionadas a la Mecánica de Suelos o Análisis Geotécnico, para la adaptación de éstas asignaturas a los materiales predominantes en nuestro medio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alfaro Soto, M. A.: Deformaciones volumétricas con y sin colapso de algunos suelos no saturados. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31(120): 355-362, 2007. ISSN 0370-3908.
- Amaya, C., & Hayem, E. (2000), "Introducción al estudio de suelos parcialmente saturados e inicio de la caracterización de la Tierra Blanca del AMSS". Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), Trabajo de Graduación.
- Aragón et al. (1999). "Estudio de la colapsabilidad en suelos". Trabajo de graduación para optar al grado de Ingeniero Civil. Universidad Centro Americana. San Salvador, El Salvador.
- ASTM. (2003). Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils.
- Ayala Valdez (2013), "Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de Tierra Blanca Joven (TBJ), unidad G", Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Trabajo de Graduación.
- Bautista et al. (2016). "Determinación de la tasa de deterioro en taludes constituidos por materiales piroclásticos en el Área Metropolitana de San Salvador". Trabajo de graduación para optar al grado de Ingeniero Civil. Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador.



- Behzad Kalantari PhD. (11/2012). Foundations on collapsible soils: a review. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 166 Issue FE2, 57–63. 07/2012, De Institution of Civil Engineers Base de datos.
- Chávez José A., Walter Hernández, Lubomir Kopecky, (2012). “Problemática y conocimiento actual de las Tefras Tierra Blanca Joven en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador”. Revista Geológica de América Central, 47, 117-132.
- Chavez, (2016). “Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador”
- Das, Braja M, (7ma ed.). (2011). “Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones”, (J. L. Cárdenas, Trans.). Cengage Learning.
- Gómez González, C. A. (2018). “Obtención de la tasa de erosión en taludes conformados por Tierra Blanca Joven (TBJ) en la zona oriente del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)”. Trabajo de graduación para optar al grado de Ingeniero Civil. Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador.
- González de Vallejo Luis I. (2002). Ingeniería Geológica. (pág. 112). Madrid: Pearson Prentice Hall.

- Hernández, W, (2004). “Características Geotécnicas y Vulcanológicas de las tefras de Tierra Blanca Joven, de Ilopango, El Salvador”. Tesis de Maestría, Universidad Politecnica de El Salvador.
- Hernández, W, (2006). “Mecanismos de Ruptura de Taludes en ignimbritas de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango, El Salvador”.
- Jiménez Salas, J.A, (1980). “Geotecnia y Cimientos III”. Rueda. Madrid.
- Khaled E. Gaaver. (2012). Geotechnical properties of Egyptian collapsible soils. Alexandria Engineering Journal, 51, 205-210. 8 June 2012.
- Mauricio Barrera Bucio. (2004). ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO HIDROMECAÁNICO DE SUELOS COLAPSABLES. Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 226, 435. 2004,
- Redolfi R Emilio, (2007). “Suelos colapsables”. Córdoba. Argentina
- Rolo et. al. (2004), “Geologic and engineering characterization of Tierra Blanca pyroclastic ash deposits”. Geological Society of America.
- Sebesta, J. & Chávez, J. (2010). “Cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el Área Metropolitana de San Salvador”. 85 págs. OPAMSS-Embajada de República Checa en Costa Rica.
- Suarez Díaz, Jaime, (1ra ed.) (2013) “Deslizamientos: Análisis Geotécnico”. Bucaramanga, Colombia.

# **ANEXOS**

# **ANEXO A**

## **MANUAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE COLAPSO**

# MANUAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE COLAPSO DE UN SUELO<sup>18</sup>. (Basado en ASTM D 5333-03<sup>19</sup>)

## OBJETIVOS

### General

- Determinar la magnitud del colapso adimensional en suelos no saturados cuando son saturados.

### Específicos

- Explicar el procedimiento de forma general para determinar el grado de colapso de un suelo
- Definir los conceptos de Colapso, índice, Potencial y Grado de Colapso según la Norma ASTM D 5333-03
- Determinar el índice y potencial de colapso de un suelo, para obtener el grado de colapso.

## RESUMEN DEL METODO DE ENSAYO

El método de ensayo consiste en colocar un espécimen de suelo con contenido de humedad natural en un consolidómetro, aplicando un predeterminado esfuerzo vertical al espécimen e inundándolo con agua destilada o desmineralizada para inducir el colapso del espécimen de suelo.

## TERMINOLOGIA

**Colapso.** Disminución súbita en la altura de un suelo confinado por humedecimiento, a una presión vertical constante aplicada.

---

<sup>18</sup> Redactado por los autores.

<sup>19</sup> Ver en ANEXO C el original de la norma de ensayo ASTM D 5333-03, y la traducción al español por G. Quintanilla.

**Índice de Colapso ( $I_e$ ).** Magnitud relativa del colapso del suelo, determinado a 200 kPa (2 tsf).

**Potencial de Colapso ( $I_c$ ).** Magnitud relativa del colapso de suelo, determinado a cualquier nivel de esfuerzo y es usado para determinar los asentamientos de un espesor de un estrato determinado.

**Grado de Colapso.** Clasificación cualitativa de la propensión de un suelo a experimentar el Colapso.

El índice de colapso,  $I_e$ , es clasificado según lo que se muestra en la Tabla No A.1

**Tabla No A.1 Clasificación del Índice de Colapso,  $I_e$**

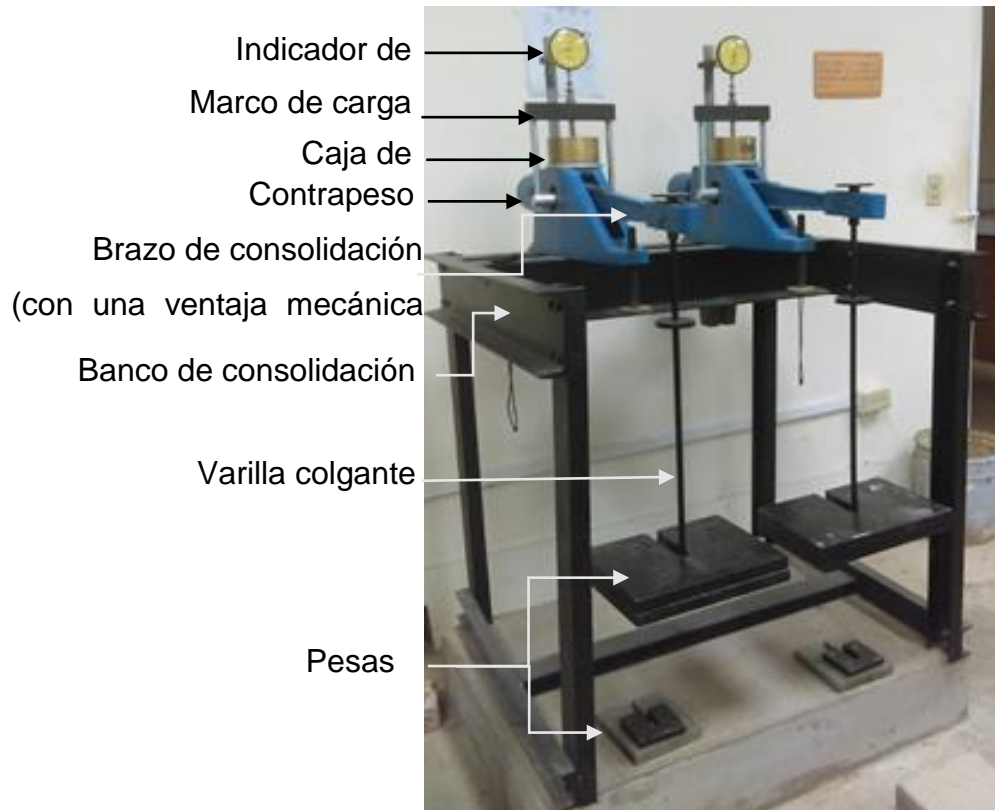
<b>Grado de Colapso</b>	<b>Índice de colapso (%)</b>
Ninguno	0
Ligero	0.1 a 2.0
Moderado	2.1 a 6.0
Moderado a Severo	6.0 a 10.0
Severo	>10.0

*Fuente: ASTM D5333-03. Método de Prueba Estándar para la Medición del Potencial de Colapso de los Suelos.*

### **MATERIAL Y EQUIPO (conforme al método de Ensayo ASTM D 2435)**

- Muestra de suelos: en condición inalterada o alterada
- Agua destilada o desmineralizada
- Dispositivo de carga (ver Figura No A.1)
- Caja de consolidación con sus respectivas piedras porosa y el anillo
- Indicador de deformación (legibilidad de 0.0025 mm)
- Balanza (legibilidad de 0.01 g)
- Juego de pesas

- Papel filtro (No 54 o que reúna los requisitos de permeabilidad y durabilidad para el ensayo).
- Otros: cronómetro digital (legibilidad de 1s), cuchillos espátulas, termómetro, recipientes para humedad, franelas, tijeras, vernier.



**Figura No A. 1. Dispositivo de carga usado en el ensayo de colapso.**

## **PROCEDIMIENTO**

### **Obtención de muestra inalterada**

- a. Seleccione y descubra la capa de material donde obtendrá la muestra, limpie la superficie de maleza y/o raíces.
- b. Excave una pequeña zanja alrededor de la marca, dejando entre el borde de la muestra y el borde interno de la zanja unos 10cm, de manera que esta pequeña excavación no afecte la muestra. La zanja deberá ser

suficientemente ancha para permitir las operaciones de tallado, parafinado in situ y corte. Con las herramientas adecuadas, dele una forma aproximadamente cubica y se tallará hasta que tenga el tamaño final que se requiere, cuidando la muestra a medida que el proceso de tallado se acerque a la cara superior y a las cuatro caras laterales.

- c. Una vez que la zanja está suficientemente profunda y las caras de la muestra estén perfiladas, proceda a extraer la muestra utilizando cuchillos, paletas o sierras, y se retira cuidadosamente. Si la muestra tiene una buena consistencia, talle la cara inferior antes de proceder a parafinarla.
- d. Aplique una primera capa de parafina usando una brocha y cúbrala con una venda. Repita el proceso hasta obtener un recubrimiento impermeable de 3 mm de espesor como mínimo.
- e. Si la muestra no tiene suficiente consistencia, antes de proceder a la extracción, una vez tallada la cara superior y las cuatro caras laterales, estas deben parafinarse como se describió en el párrafo anterior, confine la muestra con una caja y proceda a la extracción. La última cara (inferior), se parafina inmediatamente después de la extracción.
- f. Etiquete la muestra con la siguiente información: **procedencia**, especificando con marcas las caras superior e inferior, y **ubicación** dentro; sierre la caja y coloque en el exterior otra etiqueta con los mismos datos, indicando adicionalmente advertencias de las precauciones requeridas para el transporte de la misma.
- g. Registre la altura del estrato (desde el pie del talud) a donde se extrajo la muestra, si fuese posible, desde la corona del talud hacia la misma, y de ser necesario tome fotografías para tener referencia visual.

### **Obtención de muestras alteradas**

- a. Identificar cada estrato presente en el talud, utilizando la metodología que se describe en el apartado 3.6 de este capítulo.



- b. Extraiga la muestra alterada de cada estrato que se haya identificado. Recolecte la cantidad suficiente de material de cada estrato según lo que indican los métodos para la realización de los ensayos de laboratorio que se pretenden realizar.
- c. Registre la altura del estrato (desde el pie del talud) a donde se extrajo la muestra, si fuese posible, desde la corona del talud hacia la misma, y de ser necesario tome fotografías para tener referencia visual.
- d. Identifique cada muestra colocando en la bolsa el nombre del talud y nombre del estrato al que pertenece el suelo extraído.
- e. Introduzca en una segunda bolsa si es necesario la muestra, debido a que se necesita conservar las condiciones que posee In Situ.

### **Calibración del equipo de consolidación**

El montaje y calibración del consolidómetro debe ser de acuerdo al Método de Ensayo ASTM D2435 “Métodos de prueba estándar para las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos mediante carga incremental”

### **Determinación de la masa y dimensiones del anillo**

- a. Determine la masa del anillo de consolidación con una balanza de 0.01 g de precisión.
- b. Tome cuatro medidas de la altura del anillo de consolidación cercana a 0.025 mm (0.001 pulg), y calcule el valor promedio y regístrelo como altura inicial del espécimen.
- c. Tome cuatro medidas de diámetro del anillo de consolidación, en la parte superior e inferior, con un vernier. Calcule el valor promedio y regístrelo como diámetro inicial del espécimen ( $d_i$ ).

### **Preparación de los especímenes**

Pueden ser tomados de muestras inalteradas (ver Figura No A.2) o compactadas (ver Figura No A.2B) según el Método de Ensayo ASTM D698

- a. Coloque la muestra obtenida de campo o compactada sobre una superficie horizontal y con la cara inferior hacia arriba
- b. Alise la cara inferior de la muestra y sobre esta coloque el anillo de consolidación con el extremo delgado hacia abajo
- c. Corte el suelo cuidadosamente alrededor del anillo, avance verticalmente una pequeña distancia para formar el diámetro final del espécimen y prosiga hasta que este penetre en el anillo y sobresalga ligeramente (ver Figura No A.2)



A.

B.

**Figura No A.2. Labrado de espécimen A. en muestra inalterada, B. en cilindro compactado**

- d. Corte los bordes del espécimen nivelándolos con los extremos planos del anillo (ver Figura No A.3), reduciendo ligeramente el espécimen desde abajo hacia arriba en la parte superior del anillo y posteriormente un recortado de la parte inferior.
- e. Determinar el peso del espécimen más anillo, luego colóquelo en un desecador o cúbralo con una franela húmeda para evitar pérdida de humedad.
- f. Determine dos contenidos de humedad con el material sobrante del labrado según la norma ASTM D 2216.

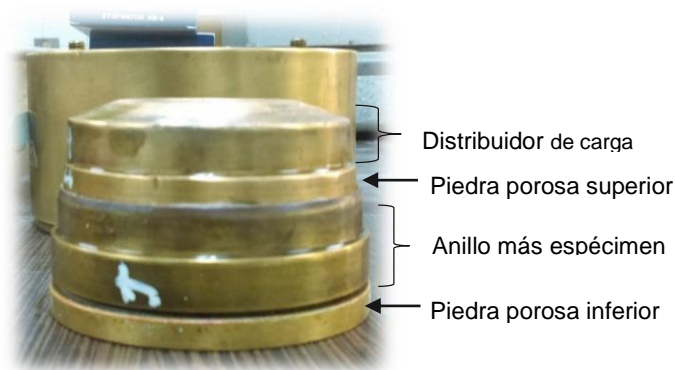


**Figura No A.3. Nivelación de los extremos del espécimen, apoyándose con una placa de vidrio**

### **Colocación del espécimen en el dispositivo de carga**

La instalación del consolidómetro sobre el banco de consolidación está basada en la norma ASTM D 2435.

- a. Determine el peso de dos discos de papel filtros. El diámetro de los discos debe ser el adecuado para evitar que se ingresen finos en las piedras porosas.
- b. Coloque dentro de la caja de consolidación la piedra porosa inferior con su papel filtro, anillo con su espécimen, anillo de fijación (para centrar la pastilla), papel filtro con piedra porosa superior y placa de distribución de carga como se muestra en las Figuras No A.3 y A.4.



**Figura No A.4. Esquema de representacion del queda armado el anillo de consolidacion dentro de la caja de consolidación**



**Figura No A.5. Esquema de representacion del orden de colocación de las piezas dentro de la caja de consolidación**

- c. Una vez armado el sistema dentro de la caja de consolidación, cúbralo con papel toalla, membrana de plástico o franela humedad, para evitar la pérdida de humedad.
- d. Nivele el brazo de aplicación de carga hasta que quede horizontal.
- e. Coloca la caja de consolidación con el espécimen, sobre el banco de consolidación.

- f. Apoye el tornillo del marco de carga sobre los distribuidos de carga y verifique que el brazo de consolidación quede ligeramente por encima de su posición horizontal.
- g. Coloque el indicador de deformación sobre el tornillo del marco de carga, y ajústelo a cero o a una lectura inicial  $L_1$

### **Aplicación de cargas**

- a. Aplique un esfuerzo de fijamiento de 5 kPa por un tiempo de 5 minutos.
- b. Registre como lectura inicial  $d_0$  la lectura que indica el dial luego de transcurrido los 5 minutos.
- c. Aplicar incrementos de esfuerzo de 12, 25, 50, 100 y 200 kPa en lapsos de una hora.

*Nota 1: La carga aplicada al suelo previo a la inundación dependerá ya sea que el plan sea determinar el Índice de Colapso  $I_e$ , o, potencial de colapso  $I_c$ , según corresponda.*

*Nota 2: El intervalo de tiempo entre incrementos de esfuerzo se ha establecido en una hora para evitar que la pérdida de humedad de la probeta pueda dar lugar a resultados erróneos.*

- d. Registre la lectura del dial después de cada incremento de esfuerzo<sup>20</sup>
- e. Inunde el espécimen con agua destilada o desmineralizada una hora después de haber aplicada la última carga y se haya registrado la lectura del dial.
- f. Inmediatamente haya sido inundado el espécimen, registre lecturas del dial a 6, 15, 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos y 1, 2, 4, 8 y 24 horas.

*Nota 3: En suelos provenientes de cenizas volcánicas, el colapso se puede dar entre las 4 o 6 horas después de ser saturados.*

---

<sup>20</sup> El intervalo de tiempo entre incrementos de esfuerzo se ha establecido en una hora para evitar que la pérdida de humedad de la probeta pueda dar lugar a resultados erróneos.

- g. Luego de que en el espécimen se haya producido el colapso y de haber registrado la lectura final, proceda a seguir cargando el espécimen, incrementándola al doble de la carga previo a la saturación.
- h. Mantenga la carga hasta por toda la noche, o hasta que no se observen cambios en la lectura del dial y registre su valor.

### **Determinación del peso seco del espécimen**

- a. Retire cuidadosamente las pesas de la varilla colgante y desmonte la caja de consolidación.
- b. Determine la masa de un recipiente y regístrelo.
- c. Decante el exceso de agua de la caja de consolidación y extraiga cuidadosamente en anillo con el espécimen saturado y papel filtro.
- d. Registre la masa del recipiente más anillo más espécimen saturado más papel filtro y determine la humedad del espécimen según el Método de Ensayo ASTM D 2216

### **CÁLCULOS**

**Calcule el área de la sección transversal del espécimen, con la siguiente ecuación:**

$$A = \frac{\pi}{4} x D^2 \qquad \text{Ecuación A.1}$$

Donde:

$A$  = Área del espécimen,  $\text{cm}^2$  o  $\text{m}^2$

$D$  = Diámetro del espécimen,  $\text{cm}$  o  $\text{m}$

**Calcule a humedad inicial y final del espécimen, de la siguiente manera:**

$$w_i = \frac{M_{hi} - M_s}{M_s} x 100 \qquad \text{Ecuación A.2}$$

$$w_f = \frac{M_{hf} - M_s}{M_s} x 100 \qquad \text{Ecuación A.3}$$

Donde:

$M_s$  = Masa seca del espécimen, en g

$M_{hi}$  = Masa húmeda inicial del espécimen antes del ensayo, en g

$M_{hf}$  = Masa húmeda final del espécimen después del ensayo, en g

**Calcule la densidad seca inicial del espécimen con la siguiente ecuación:**

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_i} \times 100 \quad \text{Ecuación A.4}$$

Donde:

$\rho_s$  = Densidad seca del espécimen, en g/cm<sup>3</sup> o Kg/ m<sup>3</sup>

$M_s$  = Masa seca del espécimen, en g o Kg

$V_i$  = Volumen inicial del espécimen, en cm<sup>3</sup> o m<sup>3</sup>

**Calcule los esfuerzos actuantes sobre el espécimen con la siguiente ecuación:**

$$\sigma = \frac{P}{A} \times \text{ventaja mecánica} \quad \text{Ecuación A.5}$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo actuante sobre el espécimen en kPa

$P$  = Carga actuante sobre el espécimen en N

$A$  = Área del espécimen, cm<sup>2</sup> o m<sup>2</sup>

*Nota 4: La **ventaja mecánica** es una magnitud adimensional que indica cuánto se amplifica la fuerza aplicada usando un mecanismo, y depende del consolidometro.*

**Calcule el cambio de deformación en cada incremento de carga de la siguiente manera:**

$$\Delta h = h - h_i \quad \text{Ecuación A.6}$$

Donde:

$\Delta h$  = Cambio de deformación en cm o mm

$h$  = Lectura del dial para cada incremento de carga, en cm o mm

$h_i$  = Lectura del dial inicial anterior para cada incremento de carga, en cm o mm

**Calcule el cambio de deformación acumulada de la siguiente manera:**

$$d_o = \Delta h_i + \Delta h_f \quad \text{Ecuación A.7}$$

Donde:

$d_o$  = deformación acumulada en el ciclo de carga

$\Delta h_i$  = Cambio de deformación inicial en cada incremento de carga en cm o mm

$\Delta h_f$  = Cambio de deformación inicial en cada incremento de carga, en cm o mm

**Calcule el cambio de altura del espécimen de la siguiente manera:**

$$\Delta H = d - d_o \quad \text{Ecuación A.8}$$

Donde:

$\Delta H$  = Cambio de altura del espécimen en cm o mm

$d$  = Altura inicial del espécimen, en cm o mm

$d_o$  = Deformación acumulada en el ciclo de carga

**Calcule la deformación porcentual del espécimen de la siguiente manera:**

$$\delta\% = \left(1 - \frac{\Delta H}{d}\right) \times 100 \quad \text{Ecuación A.9}$$

Donde:

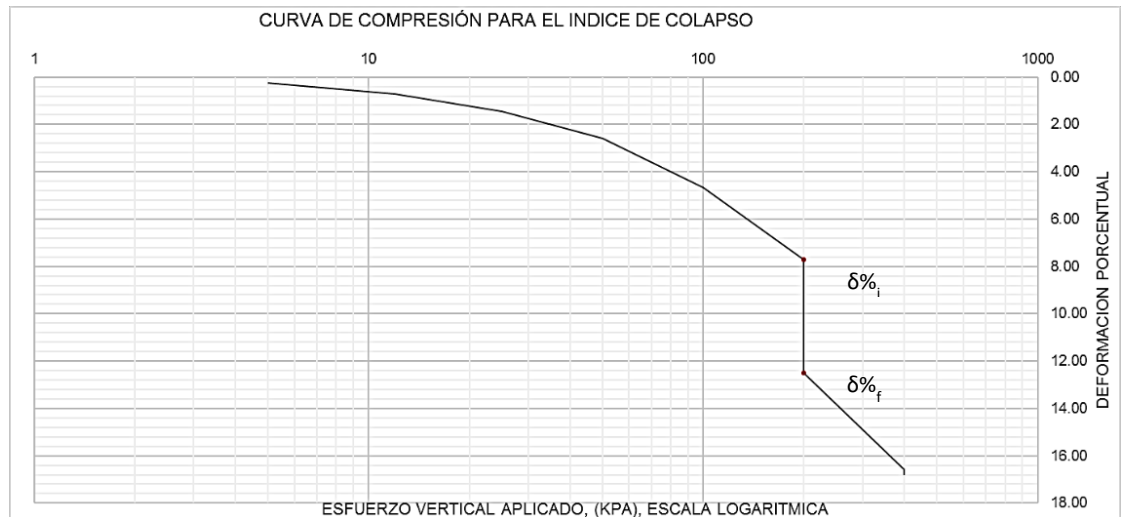
$\delta\%$  = Deformación porcentual

$\Delta H$  = Cambio de altura del espécimen en cm o mm

$d$  = Altura inicial del espécimen, en cm o mm



**Grafique la curva esfuerzo aplicado (en escala logarítmica) versus deformación porcentual del espécimen (ver Figura No. A.6)**



**Figura No A.6. Ejemplo de curva esfuerzo vertical en escala logarítmica versus deformación porcentual en escala aritmética.**

**Calcule el Índice de colapso de la siguiente manera:**

$$I_e = \delta\%_f - \delta\%_i \quad \text{Ecuación A.10}$$

Donde:

$I_e$  = Índice de Colapso, en %

$\delta\%_f$  = Deformación porcentual final después de la inundación, en %

$\delta\%_i$  = Deformación porcentual inicial previo a la inundación, en %

## REPORTE

- Identificación y descripción del espécimen de prueba, incluyendo si se trata de una muestra inalterada, o compactada.
- Contenido de agua inicial y final (precisión de 0.1%) y peso volumétrico seco (precisión de 1 kg/m<sup>3</sup>).


- Dimensiones del espécimen (precisión de 0.01 cm)
- Descripción del consolidómetro.
- Carga vertical aplicada al momento de la inundación y,
- Porcentaje de compresión o deformación del espécimen ante cada esfuerzo vertical aplicado previo a la inundación.

# **ANEXO B**

**RESULTADO DE LAS PROPIEDADES  
FÍSICAS Y CÁLCULO DEL POTENCIAL DE  
COLAPSO DE LAS UNIDADES DE TBJ**

## EJEMPLO 1

### RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA UNIDAD F.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"					
<b>DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA (HUMEDAD) DE UN SUELO EN LABORATORIO POR MASA. (BASADO EN ASTM D 2216-98)</b>					
<b>Proyecto:</b>			<b>Fecha de ensayo:</b>		
Determinación de Índice, Grado y Potencial de Colapso de la			5/4/2019		
Tierra Blanca Joven del Área Proximal y Distal del AMSS.			<b>Laboratorista:</b>		
<b>Lugar de procedencia:</b>			R. Lima		
Talud No 2 UES, Sobre Bovedad de la FIA			<b>Calculó:</b>		
<b>No de sondeo:</b>			E. Miranda		
<b>Descripción y tipo de suelo</b>					
Arena con Limo con trazas de pómez, color beige					
<b>Temperatura de secado</b>					
110 °C					
<b>No. De muestra</b>		1	2		
<b>No, de recipiente</b>		0-4	14-9		
<b>Masa de recipiente (Mt)</b>	g	50.86	65.22		
<b>Masa de suelo humedo + recipiente (Mh+t)</b>	g	359.71	376.98		
<b>Masa de suelo seco + recipiente (Ms+t)</b>	g	341.00	359.32		
<b>Masa de agua (Mw)</b>	g	18.71	17.66		
<b>Masa de suelo seco (Ms)</b>	g	290.14	294.10		
<b>Contenido de agua (ω)</b>	%	6.45%	6.00%		
<b>Humedad promedio (ω)</b>	%	6.23%			
<b>Observaciones:</b>					
_____					
_____					
_____					



**DETERMINACION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS DEL SUELO POR EL METODO DE  
 PICNOMETRO CON AGUA (BASADO EN ASTM D 854-02)**

<b>Proyecto:</b> Determinación de Índice, Grado y Potencial de Colapso de la Tierra Blanca Joven del área proximal y distal del AMSS.	<b>Fecha de ensayo:</b> 26/2/2019
<b>Lugar de procedencia:</b> Talud No 2 UES, Sobre Bóveda de la FIA	<b>No. De Muestra:</b> MA-9
<b>Nombre del estrato:</b> Unidad F	<b>No. De ensayo:</b> 3
<b>Descripción y tipo de suelo:</b> Arena con Limo con trazas de pómez, color café	<b>Laborarista:</b> E. Miranda
	<b>Calculó:</b> E. Miranda

**Determinación de la muestra seca**

No. De Picnometro	T5	T3
Masa de picnometro mas agua <span style="float: right;">g</span>	276.36	336.08
Masa de picnometro mas agua mas suelo <span style="float: right;">g</span>	377.50	428.65
Masa del suelo seco <span style="float: right;">g</span>	101.14	92.57

**Calibración del picnometro**

Temperatura de ensayo ( <i>T<sub>e</sub></i> ) <span style="float: right;">°C</span>	23.8	23.6
Densidad del agua a temperatura de ensayo <span style="float: right;">g/cm<sup>3</sup></span>	0.99735	0.9974
Masa de picnometro+suelo+agua a <i>T<sub>e</sub></i> <span style="float: right;">g</span>	715.02	719.87
Masa de picnometro+agua a <i>T<sub>e</sub></i> <span style="float: right;">g</span>	657.06	666.84
Masa de los solidos del suelo. <span style="float: right;">g</span>	101.14	92.57
Gravedad especifica a temperatura de ensayo ( <i>G<sub>t</sub></i> )	2.342	2.341
Coefficiente de temperatura	0.99914	0.99919
Gravedad especifica a temperatura de 20°C ( <i>G<sub>s</sub></i> )	<b>2.340</b>	<b>2.339</b>
Gravedad especifica promedio a temp. de 20°C ( <i>G<sub>s</sub></i> )	<b>2.340</b>	

Observaciones \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_



FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES  
 "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



**DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63, REAPROBADO EN 1998)**

<b>Proyecto:</b> Determinación de Índice, Grado y Potencial de Colapso de la Tierra Blanca Joven del Área Proximal y Distal del AMSS.	<b>Fecha de ensayo:</b> 28/2/2019
<b>Lugar de procedencia:</b> Talud No 2 UES, Sobre Bóveda de la FIA	<b>No. De Muestra:</b> MA-9 <sup>1</sup>
<b>No de sondeo</b> -	<b>No. De ensayo:</b> 5
<b>Descripcion y tipo de suelo</b> Arena con Limo con trazas de pomez, color beige	<b>Laborarista:</b> E. Miranda
<b>Hidrometro No</b> 152 H	<b>Calculó:</b> E. Miranda
<b>Hora de inicio</b> 9.41 am	<b>Factor de corrección para el peso unitario de los solidos (a)</b> 1.087
<b>Peso del suelo (g)</b> 116.13	
<b>Gs de los solidos</b> 2.34	

L <sub>agua superior</sub>	-2	L <sub>def. superior</sub>	5	Cd	7
L <sub>agua inferior</sub>	-1	L <sub>def. inferior</sub>	6	Cm	1

**Humedad higroscópica**

No de tara		13	25
Peso de tara	g	13.68	10.63
Peso de suelo <sub>humedo</sub> + tara	g	25.13	23.01
Peso de suelo <sub>seco</sub> + tara	g	25.08	22.95
Peso del suelo <sub>seco</sub>	g	11.4	12.32
Humedad	%	0.44	0.49
Humedad promedio	%	0.46	
Peso de suelo seco <sub>corregic</sub>	g	115.60	

Tiempo transcurrido (minutos)	Lectura real del hidrometro (Rr)	Temperatura (°C)	Correccion por temperatura	Lectura corregida del hidrometro Rc	Hidrometro corregido por menisco R	% de suelo en suspensión	L	K	D (mm)	% que pasa la malla No 200
2	36.0	26.2	1.72	30.72	37.00	28.89842	10.4	0.0140597	0.0321	24.7192
5	30.0	26.2	1.72	24.72	31.00	23.2542	11.4	0.0140597	0.0212	19.8913
15	24.0	26.2	1.72	18.72	25.00	17.60998	12.4	0.0140597	0.0128	15.0633
30	20.0	26.2	1.72	14.72	21.00	13.84716	13	0.0140597	0.0093	11.8446
60	17.0	26.2	1.72	11.72	18.00	11.02505	13.5	0.0140597	0.0067	9.4306
250	11.0	26.9	1.97	5.97	12.00	5.611298	14.5	0.0139505	0.0034	4.7998
1440	9.0	24.4	1.12	3.12	10.00	2.934996	14.8	0.0143495	0.0015	2.5105

Observaciones

---



---



---





FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES  
 "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



**DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63, REAPROBADO EN 1998)**

<b>Proyecto:</b> Determinación de Índice, Grado y Potencial de Colapso de la Tierra Blanca Joven del Área Proximal y Distal del AMSS.	<b>Fecha de ensayo:</b> 28/2/2019
<b>Lugar de procedencia:</b> Talud No 2 UES, Sobre Bóveda de la FIA	<b>No. De Muestra:</b> MA-9 <sup>2</sup>
<b>No de sondeo</b> -	<b>No. De ensayo:</b> 6
<b>Descripción y tipo de suelo</b> Arena con Limo con trazas de pomez, color beige	<b>Laboratorista:</b> E. Miranda
<b>Hidrometro No</b> 152 H	<b>Calculó:</b> E. Miranda
<b>Hora de inicio</b> 9.59 am	<b>Factor de corrección para el peso unitario de los solidos (a)</b> 1.087
<b>Peso del suelo (g)</b> 116.2	
<b>Gs de los solidos</b> 2.34	

<b>L<sub>agua superior</sub></b>	-2	<b>L<sub>def. superior</sub></b>	5	<b>Cd</b>	7
<b>L<sub>agua inferior</sub></b>	-1	<b>L<sub>def. inferior</sub></b>	6	<b>Cm</b>	1

**Humedad higroscópica**

No de tara	31.1	68
Peso de tara g	10.74	9.51
Peso de suelo <sub>humedo</sub> + tara g	23.97	22.03
Peso de suelo <sub>seco</sub> + tara g	23.91	21.97
Peso del suelo <sub>seco</sub> g	13.17	12.46
Humedad %	0.46	0.48
Humedad promedio %	0.47	
Peso de suelo seco <sub>corregic</sub> g	115.66	

Tiempo transcurrido (minutos)	Lectura real del hidrometro (Rr)	Temperatura (°C)	Correccion por temperatura	Lectura corregida del hidrometro Rc	Hidrometro corregido por menisco R	% de suelo en suspensión	L	K	D (mm)	% que pasa la malla No 200
2	37.0	26.3	1.755	31.755	38.00	29.85576	10.2	0.0140442	0.0317	25.5622
5	31.0	26.3	1.755	25.755	32.00	24.21462	11.2	0.0140442	0.0210	20.7323
15	24.0	26.4	1.79	18.79	25.00	17.66619	12.4	0.0140286	0.0128	15.1256
30	20.0	26.4	1.79	14.79	21.00	13.90542	13	0.0140286	0.0092	11.9057
60	16.0	26.5	1.825	10.825	17.00	10.17757	13.7	0.0140130	0.0067	8.7139
250	10.0	26.9	1.97	4.97	11.00	4.668048	14.7	0.0139505	0.0034	3.9967
1440	8.0	24.6	1.18	2.18	9.00	2.049616	15	0.0143174	0.0015	1.7549

Observaciones

---

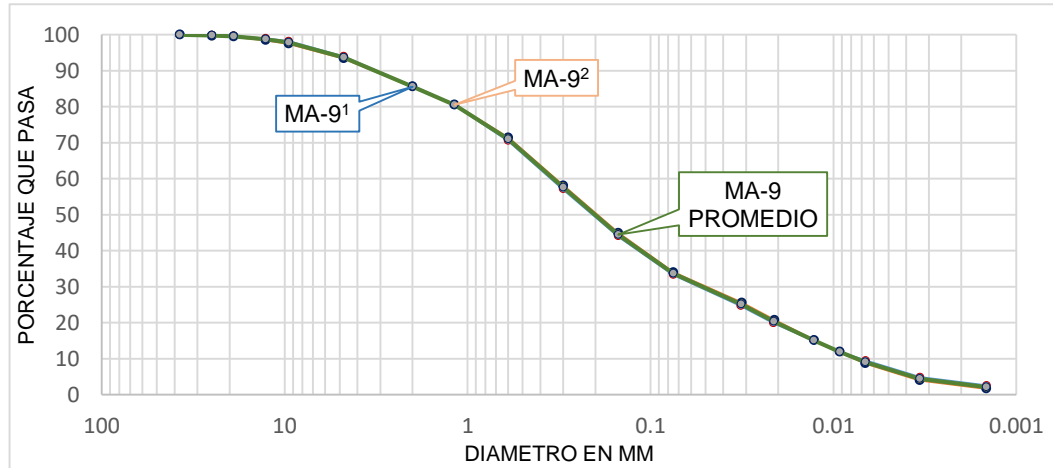


---



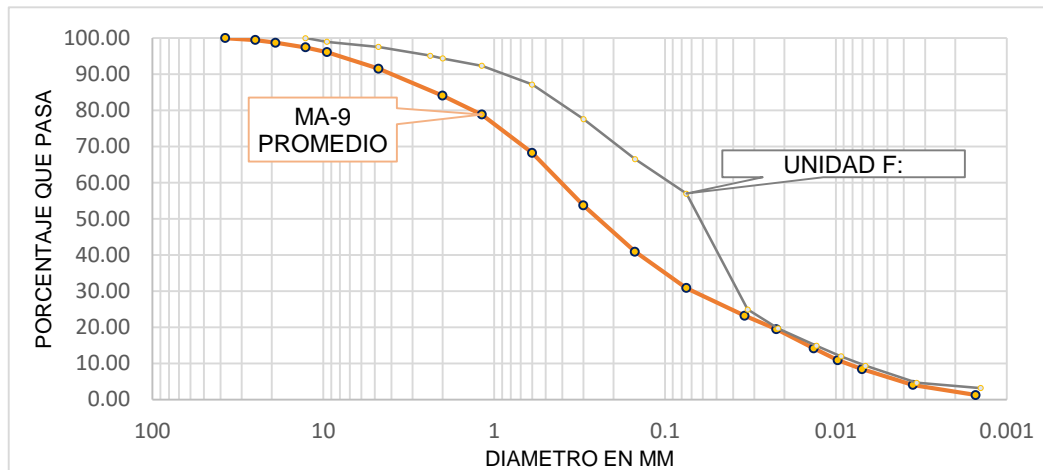
---

**Gráfico B1. Curvas granulométricas de las muestras correspondientes a MA-9, curva promedio, y porcentajes promedios de materiales que contiene.**



Gruesos	% de grava:	6.31	Finos	% de limo:	29.27	Color:	Beige
	% de arena:	60.03		% de arcilla:	2.27		Clasificación según SUCS:
			% de coloides:	2.13	Tamaño máximo	1 ½ "	

**Gráfico B2. Comparación de la curva granulométrica promedio de la muestra MA-9, con la unidad F de Bautista et al (2016).**



**Conclusión:**

La muestra MA-9 corresponde a la unidad F con una granulometría más gruesa que la curva de comparación.

## MÉTODO DE CÁLCULO DE POTENCIAL DE COLAPSO DE LA UNIDAD F, SEGÚN ASTM D5333-03

### Datos recolectados del ensayo

Ensayo No 18  
 Fecha 05 de abril de 2019  
 Lugar FIA UES

Muestra MI-9 (Unidad F)  
 Consolidometro No 3  
 K micrómetro (mm) 0.0025

Gs	2.34
----	------

DATOS GENERALES	
Peso del Anillo (g)	62.97
Peso del espécimen + Anillo (g)	137.86
Peso del espécimen (g)	74.89
Diámetro (cm)	6.35
Altura (cm)	1.95
Área (cm <sup>2</sup> )	31.67

DATOS ANTES DEL COLAPSO	
Peso Húmedo (g)	74.89
Peso Seco (g)	70.16
Peso de Agua inicial (g)	4.73
Volumen total inicial (cm <sup>3</sup> )	61.75
Volumen de solidos (cm <sup>3</sup> )	29.98
Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )	31.77
Humedad inicial (%)	6.74%
Grado de saturación inicial (%)	14.89%

DATOS DESPUES DEL COLAPSO	
Peso Húmedo (g)	91.32
Peso Seco (g)	70.16
Peso de Agua final (g)	21.16
Volumen total final (cm <sup>3</sup> )	52.56
Volumen de solidos (cm <sup>3</sup> )	29.98
Volumen de vacíos final (cm <sup>3</sup> )	22.58
Humedad final (%)	30.16%
Grado de saturación final (%)	93.71%

REGISTRO DE LECTURAS TIEMPO DEFORMACIÓN				
HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO	TEMPERATURA °C	PRESION kPa	LECTURA DEL DIAL
	0 h	-	0	7.2475
	5 minutos		5	7.2700
	1 h		60	8.0500
	2 h		120	8.3300
	3 h		240	9.2825
	4 h		475	10.3100
	5 h		950	11.3825
	saturación		-	11.3925
	6 seg		950	11.4050
	15 seg		950	11.4300
	30 seg		950	11.4875
	1 min		950	12.0950
	2 min		950	12.2800
	4 min		950	12.4300
	9 min		950	12.4625
	15 min		950	12.4900
	30 min		950	13.0175
	1 h		950	13.0375
	2 h		950	13.0575
	4 h		1150	13.1500
	8h	-	1150	13.1975
	24 h		1150	7.2475

**Tabla No. 1. Datos de un espécimen correspondiente a la unida F, procedente de la zona de la Bóveda de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, ensayada en condición natural para los diferentes ciclos de carga antes y después de la saturación.**

Tiempo	Esfuerzo (kPa)	Lecturas	Lecturas ajustadas (a)	Delta h (mm) (b)	Deformación Acumulada (mm) (c)	(d-do) (mm) (d)	(d-do)/ho per (e)	2H-2Ho (f)	(2H-2Ho)/2Ho (g)
0 h	0	7.2475	7.2475	0.000	0.000	19.500	--	10.032	1.060
0 h	5	7.2700	7.2700	0.0225	0.0225	19.478	0.12	10.010	1.06
1 h	60	8.0500	7.5500	0.2800	0.3025	19.198	1.55	9.730	1.03
2 h	120	8.3300	7.8300	0.2800	0.5825	18.918	2.99	9.450	1.00
3 h	240	9.2825	8.2825	0.4525	1.0350	18.465	5.31	8.997	0.95
4 h	475	10.3100	8.8100	0.5275	1.5625	17.938	8.01	8.470	0.89
5 h	950	11.3825	9.3825	0.5725	2.1350	17.365	10.95	7.897	0.83
6 seg	950	11.3925	9.3925	0.0100	2.1450	17.355	11.00	7.887	0.83
15 seg	950	11.4050	9.4050	0.0125	2.1575	17.343	11.06	7.875	0.83
30 seg	950	11.4300	9.4300	0.0250	2.1825	17.318	11.19	7.850	0.83
1 min	950	11.4875	9.4875	0.0575	2.2400	17.260	11.49	7.792	0.82
2 min	950	12.0950	9.5950	0.1075	2.3475	17.153	12.04	7.685	0.81
4 min	950	12.2800	9.7800	0.1850	2.5325	16.968	12.99	7.500	0.79
8 min	950	12.4300	9.9300	0.1500	2.6825	16.818	13.76	7.350	0.78
15 min	950	12.4625	9.9625	0.0325	2.7150	16.785	13.92	7.317	0.77
30 min	950	12.4900	9.9900	0.0275	2.7425	16.758	14.06	7.290	0.77
1 h	950	13.0175	10.0175	0.0275	2.7700	16.730	14.21	7.262	0.77
2 h	950	13.0375	10.0375	0.0200	2.7900	16.710	14.31	7.242	0.76
4 h	1150	13.0575	10.0575	0.0200	2.8100	16.690	14.41	7.222	0.76
24h	1150	13.1975	10.1975	0.0475	2.9500	16.550	15.13	7.082	0.75

Fuente: De los Autores

### Cálculo de la carga actuante

Para aplicar un esfuerzo de **60 kPa** con un equipo de consolidación con una ventaja mecánica de **10**, la carga en kg será de:

$$P = \frac{\sigma \times A}{\text{ventaja mecánica}} = \frac{(60 \text{ kPa}) \times (0.003209 \text{ m}^2)}{10} = 19.254 \text{ N}$$
$$P_{(kg)} = \frac{19.254 \text{ N}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \mathbf{1.96 \text{ kg}}$$

### Así la carga se va multiplicando hasta 950 kPa

*Nota: La **ventaja mecánica** es una magnitud adimensional que indica cuánto se amplifica la fuerza aplicada.*

### Cálculo de lecturas ajustadas (a)

Utilizando un indicador de deformación, con una legibilidad de lectura de 0.0025 mm, que, al completar una vuelta, ésta equivale a 0.50 mm de deformación, por lo que las lecturas deberán corregirse restando 0.50 mm en cada vez que ocurra un cambio en el entero de la lectura del dial, así como se muestra a continuación:

Lectura inicial: 7.2475

- Para la lectura de 8.0500

$$8.0500 - 0.50 = \mathbf{7.5500}$$

- Para la lectura de 8.3300

$$8.3300 - 0.50 = \mathbf{7.8300}$$

- La siguiente lectura es de 9.2825, lo que implica que la deformación en el espécimen se acumula y la aguja del indicador ha completado dos vueltas:

$$9.2825 - 1.00 = \mathbf{18.2825}$$

- Para la lectura de 10.3100, la deformación se ha acumulado y la aguja del dial ha completado tres vueltas:

$$10.3100 - 1.50 = \mathbf{8.8100}$$

De esta misma manera se deben calcular los ajustes a las lecturas del dial de deformación, según el número de vueltas que se completen en el dial de deformación, y cada vuelta acumula 0.5000 mm.

### **Calculo los cambios de deformación (b)**

Se parte del valor de la lectura inicial del dial, para el caso, 7.2475, a este se le toma como lectura anterior, y se calcula utilizando las *lecturas ajustadas*:

$$\Delta h = h - h_i = 7.2700 - 7.2475 = \mathbf{0.0225},$$

A continuación, para cada lectura, se debe restar de la anterior para calcular la deformación generada en cada ciclo de carga:

$$\Delta h = h - h_i = 7.5500 - 7.2700 = \mathbf{0.2800}$$

$$\Delta h = h - h_i = 7.8300 - 7.5500 = \mathbf{0.2800},$$

Y sucesivos

### **Cálculo de Deformación Acumulada (c)**

Se calcula a partir del  $\Delta h$  acumulando para cada uno de los intervalos:

$$d_o = \Delta h_i + \Delta h_f = 0.0000 + 0.0225 = \mathbf{0.0225}$$

$$d_o = \Delta h_i + \Delta h_f = 0.0225 + 0.2800 = \mathbf{0.3025}$$

$$d_o = \Delta h_i + \Delta h_f = 0.3025 + 0.2800 = \mathbf{0.5825},$$

Y sucesivos

### **Deformación del espécimen (d)**

Se calcula de la siguiente con la ecuación:  $\Delta H = d - d_o$

Dónde:  $\Delta H$  = Cambio de altura del espécimen

$d$  = Altura inicial del espécimen

$d_0$  = Deformación acumulada en el ciclo de carga

Por tanto:

$$\Delta H = d - d_o = 19.500 - 0.0225 = \mathbf{19.4775}$$

$$\Delta H = d - d_o = 19.500 - 0.3025 = \mathbf{19.1975}$$

$$\Delta H = d - d_o = 19.500 - 0.5825 = \mathbf{18.9175}$$

Y sucesivos

### Deformación porcentual del espécimen (e)

Se calcula con la siguiente ecuación:  $\delta\% = \left(1 - \frac{\Delta H}{d}\right) \times 100$

Así:

$$\delta\% = \left(1 - \frac{0}{19.5000}\right) \times 100 = 0$$

$$\delta\% = \left(1 - \frac{19.4775}{19.5000}\right) \times 100 = 0.1154$$

$$\delta\% = \left(1 - \frac{19.1975}{19.5000}\right) \times 100 = 1.5513$$

Y sucesivos

Las columnas **f** y **g** son utilizadas para calcular los cambios en las relaciones de vacíos, en caso que el Gráfico sea requerido en términos de **carga axial aplicada** vs. **relación de vacíos**. Para ello se introduce también el término de **altura equivalente de los sólidos (2Heq)**, que se calcula como sigue:

$$2Heq = \frac{\text{Volumen de solidos}}{\text{Area de la seccion}}$$

El volumen de lo solidos se calcula como:

$$Vs = \frac{w_s}{Gs \times \rho w}$$

Donde:

$W_s$ = Peso seco de los sólidos del suelo, en kg

$G_s$ = Gravedad específica de los sólidos del suelo, y

$\rho_w$ = Densidad del agua, en g/cm<sup>3</sup>

Para este espécimen en particular, se tiene:

$W_s$ = 70.16 g

$G_s$ = 2.34, y

$\rho_w$ = 1.00 en g/cm<sup>3</sup>

Por tanto;

$$V_s = \frac{w_s}{G_s \times \rho_w} = \frac{70.16}{2.34 \times 1.00} = \mathbf{29.9829 \text{ cm}^3}$$

$$2Heq = \frac{29.9829 \text{ cm}^3}{31.67 \text{ cm}^2} = 0.9467 \text{ cm}$$

$$2Heq = \frac{31.6979 \text{ cm}^3}{32.09 \text{ cm}^2} = 9.4673 \text{ mm}$$

### Deformación en el ciclo de carga (f)

Se calcula como sigue:

$$2H - 2H_0 = (d - d_0) - 2Heq$$

$$2H - 2H_0 = (19.5000 - 0.0000) - 9.4673 = \mathbf{10.0327}$$

$$2H - 2H_0 = (19.5000 - 0.0225) - 9.4673 = \mathbf{10.0102}$$

$$2H - 2H_0 = (19.5000 - 0.3025) - 9.4673 = \mathbf{9.7302}$$

Y sucesivos



### **Deformación porcentual o relación de vacíos (g)**

Se calcula como sigue:

$$\frac{2H - 2H_0}{2H_0} = \frac{2H - 2H_0}{2Heq}$$

$$\frac{2H - 2H_0}{2Heq} = \frac{10.0327}{9.4673} = \mathbf{1.0597}$$

$$\frac{2H - 2H_0}{2Heq} = \frac{10.0102}{9.4673} = \mathbf{1.0573}$$

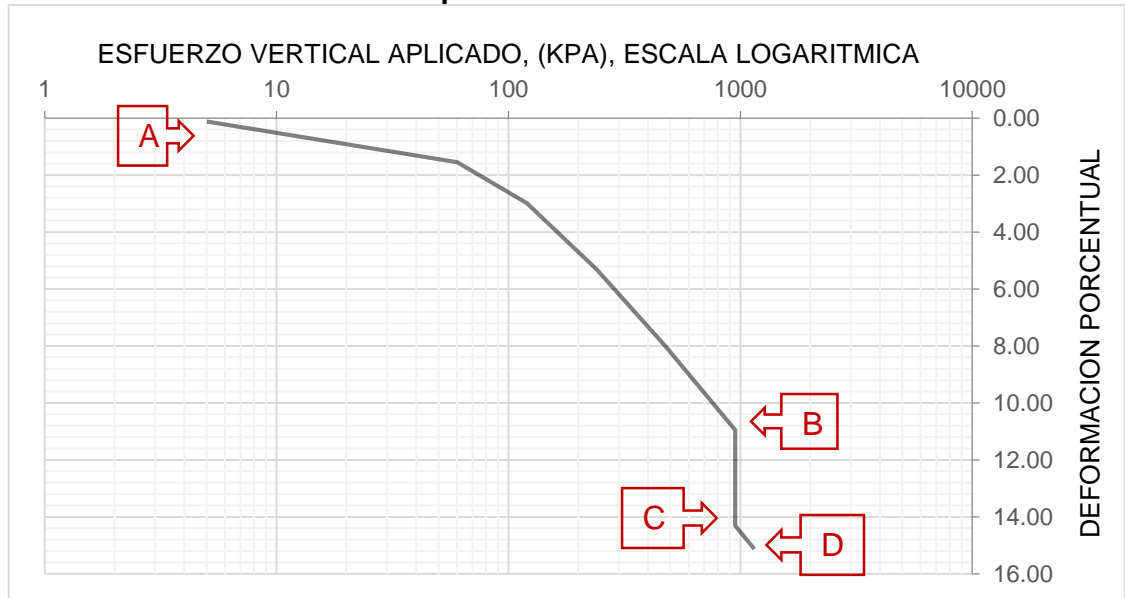
$$\frac{2H - 2H_0}{2Heq} = \frac{9.7302}{9.4673} = \mathbf{1.0278}$$

Y sucesivos

### **Grafica de esfuerzo aplicado, contra deformación porcentual del espécimen**

A continuación, se muestra un ejemplo donde se grafican los resultados de la deformación porcentual del espécimen en escala aritmética (correspondiente a la columna e), versus el esfuerzo aplicado en la escala logarítmica (Gráfico No. B3).

**Gráfico No B3: Curva de esfuerzo axial aplicado Vs deformación porcentual para un espécimen de la unidad F.**



Del Gráfico No B3:

Para determinar el potencial de colapso, se toman los valores de la deformación porcentual del espécimen en el punto B (deformación antes de la inundación) y el punto A (deformación después de haber alcanzado el colapso) correspondientes a un esfuerzo aplicado de 950 kPa. el potencial de colapso de calcula de la siguiente manera:

**Deformación en el punto B ( $\delta\%_f$ ) 10.95<sup>21</sup>**

**Deformación en el punto C ( $\delta\%_i$ ): 14.31**

Por tanto:

$$I_c = (\delta\%_f - \delta\%_i) = 14.31 - 10.95 = 3.36\%$$

El potencial también puede ser determinado por medio de la relación de vacíos, tal como se muestra a continuación:

**Relación de vacíos en el punto B: 0.83**

<sup>21</sup> Las abscisas de la curva están calculadas como deformación porcentual.

**Relación de vacíos en el punto C: 0.76**


**Relación de vacíos Inicial del espécimen: 1.06**

$$I_c = \left[ \frac{\Delta_e}{1 + e_o} \right] x 100 = \frac{0.83 - 0.76}{1 + 1.06} x 100 = \mathbf{3.39\%}$$

Por lo tanto, la clasificación según la Tabla No. 1 presentada en el manual de colapso es (2.1 a 6.0) **Moderado**.

## EJEMPLO 2

### RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA IGNIMBRITA ALFA.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"					
<b>DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA (HUMEDAD) DE UN SUELO EN LABORATORIO POR MASA. (BASADO EN ASTM D 2216-98)</b>					
<b>Proyecto:</b>			<b>Fecha de ensayo:</b>		
Determinación de Índice, Grado y Potencial de Colapso de la Tierra Blanca Joven del Área Proximal y Distal del AMSS.			5/4/2019		
<b>Lugar de procedencia:</b>			<b>Laboratorista:</b>		
Talud ZF-1, Quebrada Arenal Seco, San Bartolo, Ilopango			R. Lima		
<b>No de sondeo:</b>			<b>Calculó:</b>		
-			E. Miranda		
<b>Descripción y tipo de suelo</b>					
Arena con limo y trazas de pómez, color café claro a beige					
<b>Temperatura de secado</b>					
110 °C					
<b>No. De muestra</b>		1	2		
<b>No, de recipiente</b>		No. 7	10-2		
<b>Masa de recipiente (Mt)</b>	g	64.70	64.88		
<b>Masa de suelo humedo + recipiente (Mh+t)</b>	g	343.28	380.84		
<b>Masa de suelo seco + recipiente (Ms+t)</b>	g	323.21	358.74		
<b>Masa de agua (Mw)</b>	g	20.07	22.10		
<b>Masa de suelo seco (Ms)</b>	g	258.51	293.86		
<b>Contenido de agua (ω)</b>	%	7.76%	7.52%		
<b>Humedad promedio (ω)</b>	%	7.64%			
<b>Observaciones:</b>					
_____					
_____					
_____					



**DETERMINACION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS DEL SUELO POR EL METODO DE PICNOMETRO  
 CON AGUA (BASADO EN ASTM D 854-02)**

<b>Proyecto:</b> Determinación de Índice, Grado y Potencial de Colapso de la Tierra Blanca Joven del área proximal y distal del AMSS.	<b>Fecha de ensayo:</b> 4/3/2019
<b>Lugar de procedencia:</b> Arenal seco, Zona Franca San Bartolo Ilopango	<b>No. De Muestra:</b> MA-1
<b>Nombre del estrato:</b> Ignimbrita Alfa	<b>No. De ensayo:</b> 6
<b>Descripción y tipo de suelo:</b> Arena con limo con trazas de pómez, color café a claro a beige	<b>Laboratorista:</b> E. Miranda
	<b>Calculó:</b> E. Miranda

**Determinación de la muestra seca**

No. De Picnometro	T4	T5
Masa de picnometro mas agua <span style="float: right;">g</span>	342.82	300.23
Masa de picnometro mas agua mas suelo <span style="float: right;">g</span>	437.77	396.94
Masa del suelo seco <span style="float: right;">g</span>	94.95	96.71

**Calibración del picnometro**

Temperatura de ensayo ( $T_e$ ) <span style="float: right;">°C</span>	24.1	24.1
Densidad del agua a temperatura de ensayo <span style="float: right;">g/cm<sup>3</sup></span>	0.99727	0.99727
Masa de picnometro+suelo+agua a $T_e$ <span style="float: right;">g</span>	722.82	714.64
Masa de picnometro+agua a $T_e$ <span style="float: right;">g</span>	666.27	657.03
Masa de los solidos del suelo. <span style="float: right;">g</span>	94.95	96.71
Gravedad especifica a temperatura de ensayo ( $G_t$ )	2.473	2.474
Coefficiente de temperatura	0.99907	0.99907
Gravedad especifica a temperatura de 20°C ( $G_s$ )	<b>2.471</b>	<b>2.471</b>
Gravedad especifica promedio a temp. de 20°C ( $G_s$ )	<b>2.471</b>	

Observaciones \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_



**DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63, REAPROBADO EN 1998)**

**Proyecto:**

Determinación de Índice, Grado y Potencial de Colapso de la Tierra Blanca Joven del Área Proximal y distal del AMSS.

**Lugar de procedencia:**

Talud ZF-1, Quebrada Arenal Seco, San Bartolo, Ilopango

**No de sondeo:**

-

**Descripcion y tipo de suelo:**

Arena con limo y trazas de pómez, color café claro a beige

**Fecha de ensayo:**

1/3/2019

**No de Muestra:**

MA-1<sup>1</sup>

**No de ensayo:**

11

**Laboratorista:**

D. Mejía

**Calculó:**

E. Miranda

**ANALISIS GRANULOMETRICO DEL MATERIAL QUE SE RETIENE EN EL TAMIZ No. 10**

Masa Inicial: 5353.71 g

Malla No.	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida corregida	Porcentaje de Retenido		Porcentaje mas fino
				Parcial	Acumulado	
1"	25	0	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	19	0	0	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.7	43	43	0.80	0.80	99.20
3/8"	9.5	170.19	170.19	3.18	3.98	96.02
No 4	4.75	213.62	213.62	3.99	7.97	92.03
No 10	2	479.67	376.77	7.04	15.01	84.99
Pasa No 10	-	32.22	4550.13	84.99		
	-					
Total		938.7	5353.71			

**ANALISIS GRANULOMETRICO DEL MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ No. 10**

Masa Inicial: 116.67 g                      Masa despues de lavado 89.97 g

Malla No.	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida corregida	Porcentaje de Retenido		Porcentaje mas fino	Porcentaje mas fino referido a muestra total
				Parcial	Acumulado		
No 10	2	0	0	0.00	0.00	100.00	84.99
No 16	1.18	8.43	8.43	7.23	7.23	92.77	78.85
No 30	0.6	19.54	19.54	16.75	23.97	76.03	64.61
No 50	0.3	23.94	24.12	20.67	44.65	55.35	47.04
No 100	0.15	20.17	20.17	17.29	61.94	38.06	32.35
No 200	0.075	15.31	15.31	13.12	75.06	24.94	21.20
Pasa No 200	-	2.4	29.10	24.94			
Total		89.79	116.67				

Observaciones \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES  
 "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



**DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63,**

**Proyecto:**

Determinación de Índice, Grado y Potencial de Colapso de la Tierra Blanca Joven del area proximal y distal del

**Lugar de procedencia:**

Talud ZF-1, Quebrada Arenal Seco, San Bartolo, Ilopango

**No de sondeo**

-

**Descripcion y tipo de suelo**

Arena con limo y trazas de pómez, color café claro a beige

**Hidrometro No**

152 H

**Hora de inicio**

9.07 am

**Peso del suelo (g)**

116.96

**Gs de los solidos**

2.47

**Fecha de ensayo:**

4/3/2019

**No. De Muestra:**

MA-1<sup>1</sup>

**No. De ensayo:**

11

**Laboratorista:**

E. Miranda

**Calculó:**

E. Miranda

**peso unitario de los solidos**

(a)

1.046

L <sub>agua superior</sub>	-2	L <sub>def. superior</sub>	4	Cd	6
L <sub>agua inferior</sub>	-1	L <sub>def. inferior</sub>	5	Cm	1

**Humedad higroscópica**

No de tara		65	100
Peso de tara	g	11.93	10.47
Peso de suelo <sub>humedo</sub> + tara	g	23.6	22.7
Peso de suelo <sub>seco</sub> + tara	g	23.58	22.66
Peso del suelo <sub>seco</sub>	g	11.65	12.19
Humedad	%	0.17	0.33
Humedad promedio	%	0.25	
Peso de suelo seco <sub>corregic</sub>	g	116.67	

Tiempo transcurrido (minutos)	Lectura real del hidrometro (Rr)	Temperatura (°C)	Correccion por temperatura	Lectura corregida del hidrometro Rc	Hidrometro corregido por menisco R	% de suelo en suspensión	L	K	D (mm)	% que pasa la malla No 200
2	22.0	28.5	2.775	18.775	23.00	16.83207	12.7	0.0130781	0.0330	14.3056
5	17.0	28.5	2.775	13.775	18.00	12.34949	13.5	0.0130781	0.0215	10.4959
15	13.0	28.2	2.61	9.61	14.00	8.615509	14.2	0.0131213	0.0128	7.3223
30	11.0	28	2.5	7.5	12.00	6.723863	14.5	0.0131500	0.0091	5.7146
60	9.0	27.7	2.35	5.35	10.00	4.796355	14.8	0.0131953	0.0066	4.0764
250	6.0	27.70	2.35	2.35	7.00	2.10681	15.3	0.0131953	0.0033	1.7906
1440	6.0	25.6	1.51	1.51	7.00	1.353738	15.3	0.0135112	0.0014	1.1505

Observaciones

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_





FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES  
 "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



**DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELOS (BASADO EN ASTM D422-63, REAPROBADO EN 1998)**

**Proyecto:**

Determinación de Índice, Grado y Potencial de Colapso de

la Tierra Blanca Joven del area proximal y distal del AMSS.

**Lugar de procedencia:**

Talud ZF-1, Quebrada Arenal Seco, San Bartolo, Ilopango

**No de sondeo**

-

**Descripcion y tipo de suelo**

Arena con Limo con trazas de pómez, color café claro a beige

**Hidrometro No**

152 H

**Hora de inicio**

9.41 am

**Peso del suelo (g)**

115.36

**Gs de los solidos**

2.47

**Fecha de ensayo:**

4/3/2019

**No. De Muestra:**

MA-1<sup>2</sup>

**No. De ensayo:**

12

**Laborarista:**

E. Miranda

**Calculó:**

E. Miranda

**Factor de corrección para el peso unitario de los solidos (a)**

1.046

L <sub>agua superior</sub>	-2	L <sub>def. superior</sub>	4	Cd	6
L <sub>agua inferior</sub>	-1	L <sub>def. inferior</sub>	5	Cm	1

**Humedad higroscópica**

No de tara	x-1	13-0
Peso de tara g	11.34	13.69
Peso de suelo <sub>humedo</sub> + tara g	24.98	26.78
Peso de suelo <sub>seco</sub> + tara g	24.95	26.75
Peso del suelo <sub>seco</sub> g	13.61	13.06
Humedad %	0.22	0.23
Humedad promedio %	0.23	
Peso de suelo seco <sub>corregic</sub> g	115.10	

Tiempo transcurrido (minutos)	Lectura real del hidrometro (Rr)	Temperatura (°C)	Correccion por temperatura	Lectura corregida del hidrometro Rc	Hidrometro corregido por menisco R	% de suelo en suspensión	L	K	D (mm)	% que pasa la malla No 200
2	21.0	28.1	2.555	17.555	22.00	15.95265	12.9	0.0131356	0.0334	13.5294
5	17.0	28.1	2.555	13.555	18.00	12.31776	13.5	0.0131356	0.0216	10.4467
15	13.0	27.9	2.45	9.45	14.00	8.587443	14.2	0.0131651	0.0128	7.2830
30	11.0	27.9	2.45	7.45	12.00	6.769995	14.5	0.0131651	0.0092	5.7416
60	9.0	27.6	2.3	5.3	10.00	4.816238	14.8	0.0132103	0.0066	4.0846
250	6.0	27.90	2.45	2.45	7.00	2.226374	15.3	0.0131651	0.0033	1.8882
1440	5.0	25.9	1.615	0.615	6.00	0.558865	15.5	0.0134646	0.0014	0.4740

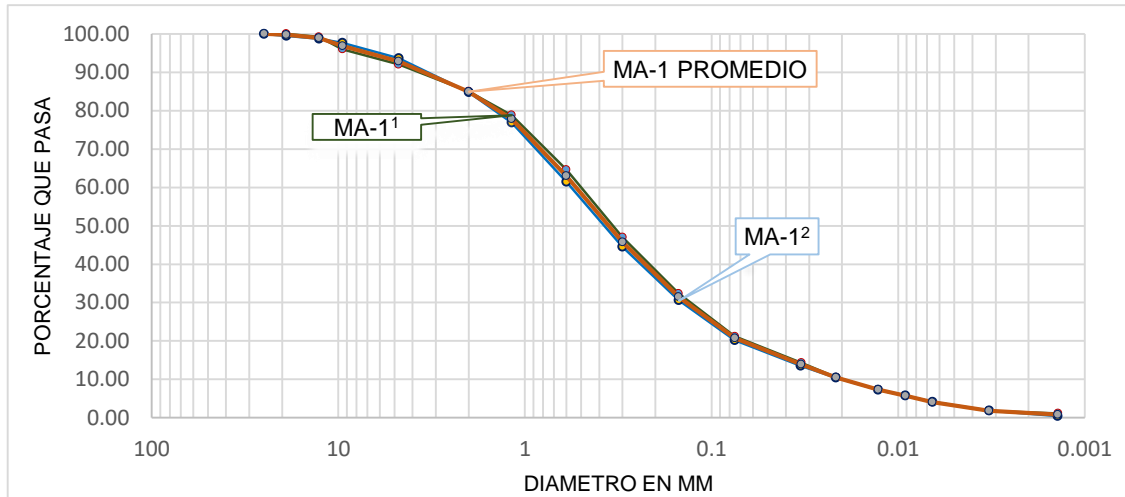
Observaciones

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

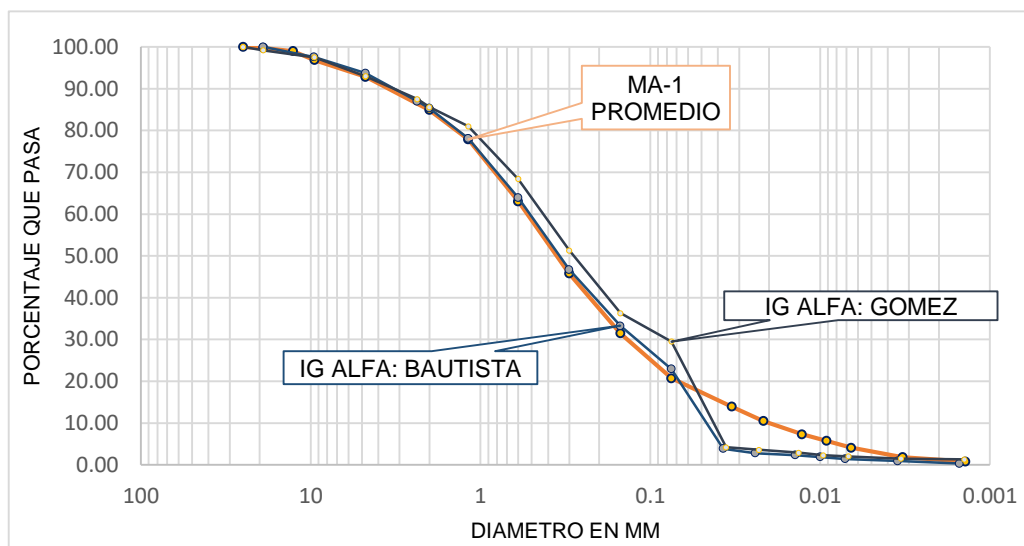
\_\_\_\_\_

**Gráfico No B4. Curvas granulométricas de las muestras correspondientes a MA-1, curva promedio, y porcentajes promedios de materiales que contiene.**



<b>Gruesos</b>	% de grava:	7.16	<b>Finos</b>	% de limo:	18.87	<b>Color:</b>	Beige
	% de arena:	72.13		% de arcilla:	1.03	<b>Clasificación</b>	según SM
				% de coloides:	0.81	<b>SUCS:</b>	
						<b>Tamaño máximo</b>	1"

**Gráfico No B5. Comparación de curvas granulométricas promedio de la muestra MA-1, con Ignimbrita Alfa de Bautista et al (2016) y Gómez (2018).**



## Conclusión:

La muestra MA-1 corresponde a Ignimbrita Alfa, ya que su curva granulométrica se asemeja a las curvas de comparación.

## MÉTODO DE CÁLCULO DE POTENCIAL DE COLAPSO DE LA IGNIMBRITA ALFA, SEGÚN ASTM D5333-03

### Datos recolectados del ensayo

<b>Ensayo No</b>	61	<b>Muestra</b>	MI-1 (Ignimbrita Alfa)
<b>Fecha</b>	18 de julio de 2019	<b>Consolidometro No</b>	4
<b>Lugar</b>	FIA UES	<b>K micrómetro (mm)</b>	0.0025

DATOS GENERALES	
Peso del Anillo (g)	63.66
Peso del espécimen + Anillo (g)	149.31
Peso del espécimen (g)	85.65
Diámetro (cm)	6.392
Altura (cm)	1.96
Área (cm <sup>2</sup> )	32.09

<b>G<sub>s</sub></b>	2.47
----------------------	------

DATOS ANTES DEL COLAPSO	
Peso Húmedo (g)	85.65
Peso Seco (g)	77.66
Peso de Agua inicial (g)	7.99
Volumen total inicial (cm <sup>3</sup> )	62.90
Volumen de sólidos (cm <sup>3</sup> )	31.44
Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )	31.45
Humedad inicial (%)	10.29%
Grado de saturación inicial (%)	25.40%

DATOS DESPUES DEL COLAPSO	
Peso Húmedo (g)	98.11
Peso Seco (g)	77.66
Peso de Agua final (g)	20.45
Volumen total final (cm <sup>3</sup> )	55.85
Volumen de sólidos (cm <sup>3</sup> )	31.44
Volumen de vacíos final (cm <sup>3</sup> )	24.41
Humedad final (%)	26.33%
Grado de saturación final (%)	83.78%

REGISTRO DE LECTURAS TIEMPO DEFORMACIÓN				
HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO	TEMPERATURA °C	PRESION kPa	LECTURA DEL DIAL
	0 h	-	0	11.2375
6:17 am	5 minutos	25.1	5	11.2700
	1 h	24.6	60	12.2300
	2 h	24.5	120	12.4725
	3 h	24.7	240	13.2950
	4 h	24.9	475	14.1825
	5 h	25.1	950	15.1400
	saturación	-	-	-
	6 seg	25.1	950	15.1400
	15 seg	25.1	950	15.1400
	30 seg	25.1	950	15.1450
	1 min	25.1	950	15.1525
	2 min	25.1	950	15.1800
	4 min	25.1	950	15.2175
	9 min	25.2	950	15.2550
	15 min	25.2	950	15.2725
	30 min	25.2	950	15.2925
	1 h	25.4	950	15.3125
	2 h	25.6	950	15.3325
	4 h	26.1	950	15.3450
	24 h	-	1150	15.4325

**Tabla No. 2. Datos de un espécimen correspondiente a Ignimbrita Alfa, procedente del Arenal Seco de la Zona Franca San Bartolo Ilopango, ensayada en condición natural para los diferentes ciclos de carga antes y después de la saturación.**

Tiempo	Esfuerzo (kPa)	Lecturas	Lecturas ajustadas (a)	Delta h (mm) (b)	Deformación Acumulada (mm) (c)	(d-do) (mm) (d)	(d-do)/ho per (e)	2H-2Ho (f)	(2H-2Ho)/2Ho (g)
0 h	0	11.2375	11.2375	0.000	0.000	19.600	--	9.722	0.984
0 h	5	11.2700	11.2700	0.0325	0.0325	19.568	0.17	9.690	0.98
1 h	60	12.2300	11.7300	0.4600	0.4925	19.108	2.51	9.230	0.93
2 h	120	12.4725	11.9725	0.2425	0.7350	18.865	3.75	8.987	0.91
3 h	240	13.2950	12.2950	0.3225	1.0575	18.543	5.40	8.665	0.88
4 h	475	14.1825	12.6825	0.3875	1.4450	18.155	7.37	8.277	0.84
5 h	950	15.1400	13.1400	0.4575	1.9025	17.698	9.71	7.820	0.79
6 seg	950	15.1400	13.1400	0.0000	1.9025	17.698	9.71	7.820	0.79
15 seg	950	15.1400	13.1400	0.0000	1.9025	17.698	9.71	7.820	0.79
30 seg	950	15.1450	13.1450	0.0050	1.9075	17.693	9.73	7.815	0.79
1 min	950	15.1525	13.1525	0.0075	1.9150	17.685	9.77	7.807	0.79
2 min	950	15.1800	13.1800	0.0275	1.9425	17.658	9.91	7.780	0.79
4 min	950	15.2175	13.2175	0.0375	1.9800	17.620	10.10	7.742	0.78
9 min	950	15.2550	13.2550	0.0375	2.0175	17.583	10.29	7.705	0.78
15 min	950	15.2725	13.2725	0.0175	2.0350	17.565	10.38	7.687	0.78
30 min	950	15.2925	13.2925	0.0200	2.0550	17.545	10.48	7.667	0.78
1 h	950	15.3125	13.3125	0.0200	2.0750	17.525	10.59	7.647	0.77
2 h	950	15.3325	13.3325	0.0200	2.0950	17.505	10.69	7.627	0.77
4 h	950	15.3450	13.3450	0.0125	2.1075	17.493	10.75	7.615	0.77
24 h	1150	15.4325	13.4325	0.0875	2.1950	17.405	11.20	7.527	0.76

Fuente: De los Autores

### Cálculo de la carga actuante

Para aplicar un esfuerzo de **60 kPa** con un equipo de consolidación con una ventaja mecánica de **10**, la carga en kg será de:

$$P = \frac{\sigma \times A}{\text{ventaja mecánica}} = \frac{(60 \text{ kPa}) \times (0.003209 \text{ m}^2)}{10} = 19.254 \text{ N}$$
$$P_{(kg)} = \frac{19.254 \text{ N}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \mathbf{1.96 \text{ kg}}$$

### Así la carga se va multiplicando hasta llegar a los 950 kPa

*Nota: La **ventaja mecánica** es una magnitud adimensional que indica cuánto se amplifica la fuerza aplicada.*

### Cálculo de lecturas ajustadas (a)

Utilizando un indicador de deformación, con una legibilidad de lectura de 0.0025 mm, que, al completar una vuelta, ésta equivale a 0.50 mm de deformación, por lo que las lecturas deberán corregirse restando 0.50 mm en cada vez que ocurra un cambio en el entero de la lectura del dial, así como se muestra a continuación:

Lectura inicial: 11.2375

- Para la lectura de 12.2300

$$12.2300 - 0.50 = \mathbf{11.7300}$$

- Para la lectura de 12.4725

$$12.4725 - 0.50 = \mathbf{11.9725}$$

- La siguiente lectura es de 13.2950, lo que implica que la deformación en el espécimen se acumula y la aguja del indicador ha completado dos vueltas:

$$13.2950 - 1.00 = \mathbf{12.2925}$$

- Para la lectura de 14.1825, la deformación se ha acumulado y la aguja del dial ha completado tres vueltas:

$$14.1825 - 1.50 = \mathbf{12.6825}$$

De esta misma manera se deben calcular los ajustes a las lecturas del dial de deformación, según el número de vueltas que se completen en el dial de deformación, y cada vuelta acumula 0.5000 mm.

### **Calculo los cambios de deformación (b)**

Se parte del valor de la lectura inicial del dial, para el caso, 11.2375, a este se le toma como lectura anterior, y se calcula utilizando las *lecturas ajustadas*:

$$\Delta h = h - h_i = 11.2700 - 11.2375 = \mathbf{0.0325},$$

A continuación, para cada lectura, se debe restar de la anterior para calcular la deformación generada en cada ciclo de carga:

$$\Delta h = h - h_i = 11.7300 - 11.2700 = \mathbf{0.4600}$$

$$\Delta h = h - h_i = 11.9725 - 11.7300 = \mathbf{0.2425},$$

Y sucesivos

### **Cálculo de Deformación Acumulada (c)**

Se calcula a partir del  $\Delta h$  acumulando para cada uno de los intervalos:

$$d_o = \Delta h_i + \Delta h_f = 0.0000 + 0.0325 = \mathbf{0.0325}$$

$$d_o = \Delta h_i + \Delta h_f = 0.0325 + 0.4600 = \mathbf{0.4925}$$

$$d_o = \Delta h_i + \Delta h_f = 0.4925 + 0.2425 = \mathbf{0.7325},$$

Y sucesivos

### **Deformación del espécimen (d)**

Se calcula de la siguiente con la ecuación:  $\Delta H = d - d_o$

Dónde:  $\Delta H$  = Cambio de altura del espécimen

$d$  = Altura inicial del espécimen

$d_0$  = Deformación acumulada en el ciclo de carga

Por tanto:

$$\Delta H = d - d_0 = 19.6000 - 0.0325 = \mathbf{19.5675}$$

$$\Delta H = d - d_0 = 19.6000 - 0.4925 = \mathbf{19.1075}$$

$$\Delta H = d - d_0 = 19.6000 - 0.7350 = \mathbf{18.8650}$$

Y sucesivos

### Deformación porcentual del espécimen (e)

Se calcula con la siguiente ecuación:  $\delta\% = \left(1 - \frac{\Delta H}{d}\right) \times 100$

Así:

$$\delta\% = \left(1 - \frac{0}{19.6000}\right) \times 100 = 0$$

$$\delta\% = \left(1 - \frac{19.5675}{19.6000}\right) \times 100 = 0.1658$$

$$\delta\% = \left(1 - \frac{19.1075}{19.6000}\right) \times 100 = 2.5127$$

Y sucesivos

Las columnas **f** y **g** son utilizadas para calcular los cambios en las relaciones de vacíos, en caso que el Gráfico sea requerido en términos de **carga axial aplicada** vs. **relación de vacíos**. Para ello se introduce también el término de **altura equivalente de los sólidos (2Heq)**, que se calcula como sigue:

$$2Heq = \frac{\text{Volumen de solidos}}{\text{Area de la seccion}}$$

El volumen de los sólidos se calcula como:

$$V_s = \frac{w_s}{G_s \times \rho_w}$$

Donde:

$W_s$  = Peso seco de los sólidos del suelo, en kg

$G_s$  = Gravedad específica de los sólidos del suelo, y

$\rho_w$  = Densidad del agua, en g/cm<sup>3</sup>

Para este espécimen en particular, se tiene:

$W_s$  = 77.66 g

$G_s$  = 2.45, y

$\rho_w$  = 1.00 en g/cm<sup>3</sup>

Por tanto;

$$V_s = \frac{w_s}{G_s \times \rho_w} = \frac{77.66}{2.45 \times 1.00} = \mathbf{31.6979 \text{ cm}^3}$$

$$2Heq = \frac{31.6979 \text{ cm}^3}{32.09 \text{ cm}^2} = 0.9878 \text{ cm}$$

$$2Heq = \frac{31.6979 \text{ cm}^3}{32.09 \text{ cm}^2} = 9.8784 \text{ mm}$$

### **Deformación en el ciclo de carga (f)**

Se calcula como sigue:

$$2H - 2H_0 = (d - d_0) - 2Heq$$

$$2H - 2H_0 = (19.6000 - 0.0000) - 9.8784 = \mathbf{9.7216}$$

$$2H - 2H_0 = (19.6000 - 0.0325) - 9.8784 = \mathbf{9.6891}$$

$$2H - 2H_0 = (19.6000 - 0.4925) - 9.8784 = \mathbf{9.2291}$$

Y sucesivos



### **Deformación porcentual o relación de vacíos (g)**

Se calcula como sigue:

$$\frac{2H - 2H_0}{2H_0} = \frac{2H - 2H_0}{2Heq}$$

$$\frac{2H - 2H_0}{2Heq} = \frac{9.7216}{9.8784} = \mathbf{0.9841}$$

$$\frac{2H - 2H_0}{2Heq} = \frac{9.6891}{9.8784} = \mathbf{0.9808}$$

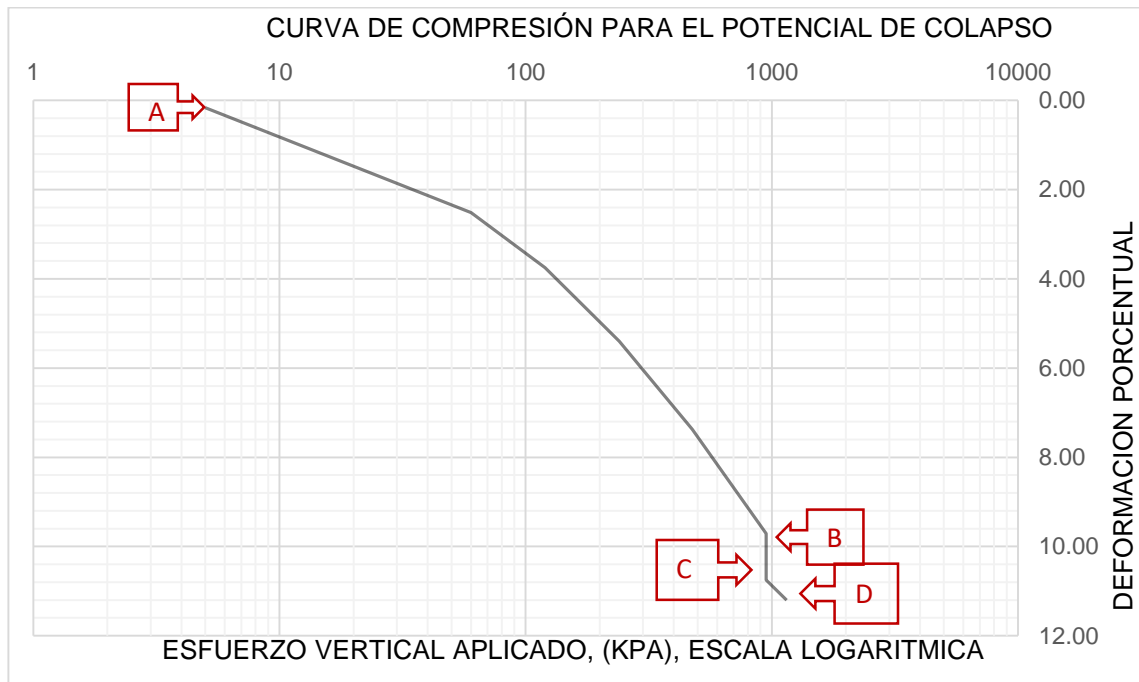
$$\frac{2H - 2H_0}{2Heq} = \frac{9.2291}{9.8784} = \mathbf{0.9097}$$

Y sucesivos

### **Grafica de esfuerzo aplicado, contra deformación porcentual del espécimen**

A continuación, se muestra un ejemplo donde se grafican los resultados de la deformación porcentual del espécimen en escala aritmética (correspondiente a la columna e), versus el esfuerzo aplicado en la escala logarítmica (Gráfico No. B6).

**Gráfico No B6: Curva de esfuerzo axial aplicado Vs deformación porcentual para un espécimen de Ignimbrita Alfa.**



Del Gráfico No 6:

Para determinar el potencial de colapso, se toman los valores de la deformación porcentual del espécimen en el punto B (deformación antes de la inundación) y el punto A (deformación después de haber alcanzado el colapso) correspondientes a un esfuerzo aplicado de 950 kPa. el potencial de colapso de calcula de la siguiente manera:

**Deformación en el punto B ( $\delta\%_i$ ) 9.71<sup>22</sup>**

**Deformación en el punto C ( $\delta\%_f$ ): 10.75**

Por tanto:

$$I_c = (\delta\%_f - \delta\%_i) = 10.75 - 9.71 = \mathbf{1.04\%}$$

<sup>22</sup> Las abscisas de la curva están calculadas como deformación porcentual.

El potencial también puede ser determinado por medio de la relación de vacíos, tal como se muestra a continuación:

**Relación de vacíos en el punto B: 0.79**

**Relación de vacíos en el punto C: 0.77**

**Relación de vacíos Inicial del espécimen: 0.98**

$$I_c = \left[ \frac{\Delta_e}{1 + e_o} \right] x 100 = \frac{0.79 - 0.77}{1 + 0.98} x 100 = 1.01\%$$

Por lo tanto, la clasificación según la Tabla No. 1 presentada en el manual de colapso es (0.1 a 2.0) **Ligero**.

# **ANEXO C**

**NORMA DE REFERENCIA PARA LA  
DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE, GRADO Y  
POTENCIAL DE COLAPSO**

## Método estándar para el cálculo del potencial de colapso de los suelos<sup>23</sup>.

Esta norma ha sido emitida bajo la designación D 5333; el número que sigue inmediatamente al de la designación indica el año de adopción original, o en el caso de revisión, el año de la última. El número entre paréntesis indica el año de re-aprobación. Una épsilon sobrescrita indica un cambio editorial desde la última revisión o re-aprobación.

### 1. Alcance

- 1.1 Este método cubre la determinación de la magnitud del colapso unidimensional que ocurre cuando suelos no saturados son inundados con fluidos.
- 1.2 Este método puede ser utilizado para determinar la magnitud de del potencial de colapso que ocurre para un esfuerzo vertical (axial) determinado y un índice para clasificar el potencial de colapso.
- 1.3 Este método especifica la técnica para preparación de especímenes, aparatos y procedimientos para cuantificar la cantidad de cambio de altura asociado con el colapso y procedimientos para reportar resultados de ensayo.
- 1.4 Los procedimientos presentados en este método de ensayo son aplicables para especímenes inalterados y remoldados.
- 1.5 Los valores están colocados en unidades del SI para ser considerados estándar. Las unidades puestas en libras-pie son para información únicamente.
- 1.6 *Esta norma no pretende abordar todas las medidas de seguridad, si las hubiere, relacionadas a su uso. Es responsabilidad del usuario de este método establecer prácticas apropiadas de seguridad y determinar la aplicabilidad de limitaciones regulatorias previo a su uso.*

### 2. Documentos de referencia:

- 2.1 Normas ASTM
  - D 653 Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids<sup>2</sup>
  - D 2216 Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock<sup>2</sup>
  - D 2435 Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils<sup>2</sup>
  - D 4829 Test Method for Expansion Index of Soils<sup>24</sup>.

### 3. Terminología

- 3.1 Referido a terminología D653 para definiciones estándar de términos. Términos adicionales, según se presenta:
- 3.2 *Definición de términos específicos de esta norma:*
  - 3.2.1 Colapso- Disminución en altura de un suelo confinado por humedecimiento, a una presión vertical aplicada constante. Un suelo colapsable debe resistir relativamente una amplia

aplicación de carga vertical, con pequeños asentamientos para un bajo contenido de humedad, sin embargo, este suelo exhibirá un asentamiento (puede ser grande) después de ser humedecido sin incremento de carga adicional. Aplicación de grandes esfuerzos verticales no necesariamente genera colapso.

- 3.2.2 *Índice de Colapso ( $I_c$ )*, porcentaje- magnitud relativa de colapso, determinada a 200 kPa (2 tsf) y calculada usando (Eq 1).
- 3.2.3 *Potencial de Colapso ( $I_c$ )*, porcentaje- magnitud relativa de colapso del suelo, determinado a cualquier nivel de esfuerzo, como se muestra:

- $d$  = lectura del dial, mm (in),
- $d_o$  = lectura del dial en el esfuerzo de asentamiento, mm (in),
- $h_o$  = altura inicial del espécimen, mm(in),
- $d_f$  = lectura del dial en el nivel de esfuerzo apropiado después del humedecimiento, mm (in),
- $d_i$  = lectura del dial en el nivel de esfuerzo apropiado previo al humedecimiento, mm (in),
- $(d_f-d_o)/h_o$  = tensión en el nivel apropiado de esfuerzo después del humedecimiento, y
- $(d_i-d_o)/h_o$  = tensión en el nivel apropiado de esfuerzo previo al humedecimiento.

$$I_c = \left[ \frac{d_f-d_o}{h_o} - \frac{d_i-d_o}{h_o} \right] 100 = \left[ \frac{d_f-d_i}{h_o} \right] 100 \quad (1)$$

Donde:

La ecuación 1 puede ser reescrita en términos de la relación de vacíos:

$$I_c = \left[ \frac{\Delta e}{1+e_o} \right] * 100 \quad (2)$$

Donde:

- $\Delta e$  = cambio en la relación de vacíos resultado del humedecimiento, mm (in), y
- $e_o$  = Relación de vacíos inicial

<sup>23</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-18 on Soil and Rock and is the direct responsibility of Subcommittee D18.05 on Structural Properties of Soils.

Current edition approved Nov. 15, 1992. Published January 1993.

<sup>24</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08.

O, ya que la prueba se lleva a cabo como un ensayo unidimensional:

$$I_c = \left[ \frac{\Delta h}{h_o} \right] * 100 \quad (3)$$

Donde:

$\Delta h$  = cambio en la altura del espécimen resultado del humedecimiento, mm (in), y

$e_o$  = altura inicial del espécimen, mm (in).

#### 4. Resumen del método de ensayo

4.1 El método de ensayo consiste en colocar un espécimen de suelo con contenido de humedad natural en un consolidómetro, aplicando un predeterminado esfuerzo vertical al espécimen e inundándolo para inducir el potencial de colapso del espécimen de suelo. El fluido debe ser agua destilada y desionizada cuando se evalúe el Índice de Colapso  $I_e$ . El fluido puede simular el agua de los poros del espécimen u otras condiciones de campo como sean necesarias cuando se evalúe el Potencial de Colapso  $I_c$ .

#### 5. Uso y significado

5.1 Suelos susceptibles al colapso pueden ser encontrados en Estados Unidos y en el mundo entero. Por lo general los suelos colapsables tienen bajos valores de peso unitario seco y contenido de humedad natural. Los trabajos de ingeniería fundados sobre suelos colapsables pueden verse afectados por repentinos y comúnmente grandes asentamientos inducidos cuando esos suelos se saturan después de la construcción. Predecir el potencial de colapso es importante para el diseño de muchas estructuras de ingeniería.

5.2 El potencial de colapso  $I_c$ , es utilizado para estimar los asentamientos que pueden ocurrir en un estrato de suelo en un sitio en particular,  $I_c$  es determinado con la Ecuación 1 utilizando un predeterminado esfuerzo vertical y la aplicación de fluidos a un espécimen de suelo tomado de un estrato de suelo. Los asentamientos de un estrato de suelo para un determinado esfuerzo vertical es obtenido al multiplicar  $I_c$  por  $H/100$ , donde  $H$  es el espesor del estrato de suelo.

5.2.1 Procedimientos para estimar el potencial de colapso de los suelos son inciertos puesto que no existe un solo criterio que pueda aplicarse a todos los suelos colapsables. Por ejemplo, algunos suelos pueden expandirse después que el fluido es añadido al espécimen hasta que suficiente esfuerzo vertical sea aplicado para contrarrestar la expansión. El colapso puede entonces ocurrir hasta que se aplique presión vertical adicional. Este método de ensayo puede utilizarse para determinar el potencial de colapso,  $I_c$ , de un suelo a una presión vertical en particular, o el índice de colapso,  $I_e$ , con una presión aplicada de 200 kPa. El potencial de colapso,  $I_c$ , para una presión vertical más pequeña puede ser estimada asumiendo que el suelo no se expande después de ser inundado después a menores presiones verticales aplicadas.

5.2.2 La magnitud de asentamiento depende de la extensión del frente húmedo y la disponibilidad de agua, que rara vez puede ser predicho previo al colapso.

5.3 El índice de colapso,  $I_e$ , se usa para medir el índice básico de propiedad del suelo.

5.3.1 el índice de colapso,  $I_e$ , es comparable al índice de expansión del suelo cuando este es medido con el método de ensayo D4829, y se usa para describir el grado de colapso que un suelo en particular exhibe a bajo determinadas características.

5.3.2 El índice de colapso,  $I_e$ , no pretende duplicar ninguna condición particular de campo, como carga, estructura de suelo en el sitio, o química del agua. El procedimiento de ensayo mantiene constantes las condiciones de ensayo para permitir una correlación de datos entre organizaciones y dirigir investigaciones de aspectos particulares del comportamiento del suelo.

5.3.3 El índice de colapso,  $I_e$ , es clasificado en la Tabla 1

TABLA 1 Clasificación del Índice de Colapso,  $I_e$

Grado de Colapso	Índice de colapso (%)
Ninguno	0
Leve	0.1 a 2.0
Moderado	2.1 a 6.0
Moderado a Severo	6.0 a 10.0
Severo	>10.0

#### 6. Equipo

6.1 El equipo debe ser conforme al Método de Ensayo D 2435.

6.2 Las piedras porosas deben ser secadas al aire para imposibilitar incrementos en el contenido de agua del espécimen por capilaridad.

#### 7. Preparación del espécimen

7.1 Los especímenes de prueba pueden ser remoldados o compactados o tomados de muestras inalteradas de suelo. La preparación de los especímenes de suelo inalterado debe ser según los lineamientos del Método de Ensayo D2435.

7.2 Use especímenes relativamente inalterados para determinar el potencial de colapso  $I_c$ . Dado que los suelos colapsables son susceptibles a métodos de muestreo en que se utilizan fluidos, las muestras deben ser extraídas utilizando métodos secos. Los métodos de muestreo en seco recomendables incluyen la barrena de doble tubo y muestras talladas a mano.

#### 8. Calibración

8.1 El montaje y calibración del consolidómetro es de acuerdo al Método de Ensayo D2435.

#### 9. Parámetros del suelo

9.1 Los parámetros como contenido natural de humedad, masa, volumen, gravedad específica, límite líquido y plástico, granulometría, deben ser determinados siguiendo los lineamientos generales del Método de Ensayo D2435. El

contenido natural y final de agua debe ser determinado de acuerdo al Método de Ensayo D 2216.

## 10. Procedimiento

10.1 Realizar la prueba de acuerdo con el Método de Ensayo D2435, excepto por:

- 10.1.1 Colocar el espécimen en el dispositivo de carga inmediatamente después de determinar la humedad inicial y altura del espécimen después de corte o compactación. Cerrar el anillo del espécimen, papel filtro, si lo hubiera, piedras porosas, tan pronto como sea posible con una membrana holgada de plástico, papel toalla húmedo o papel aluminio para minimizar la pérdida de humedad y volumen por evaporación. A continuación, aplique un esfuerzo de asentamiento (o fijación) de 5 kPa (0.05 tsf). Luego de cinco minutos de aplicación de la carga de asentamiento, aplique incrementos de carga a cada hora, con humedad natural, hasta que el esfuerzo vertical apropiado sea aplicado al suelo. Los incrementos de carga debieran ser 12, 25, 50, 100, 200, etc. KPa (0.12, 0.25, 0.5, 1, 2 tsf) Registre la deformación después que cada incremento de carga sea aplicado.
- Nota 1: la duración de los incrementos de carga es limitado antes de inundación se limita a una hora para prevenir la evaporación excesiva de humedad del espécimen que puede producir resultados erráticos.

10.2 La carga (o esfuerzo) aplicado al suelo previo a la inundación dependerá ya sea que el plan sea determinar el Índice de Colapso  $I_c$ , o, potencial de colapso  $I_c$ , según corresponda.

10.3 Inunde el espécimen con fluido una hora después que el esfuerzo vertical apropiado haya sido aplicado y haber registrado la deformación o lectura del dial, Registre la deformación contra tiempo en aproximadamente 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, minutos, y, 1, 2, 4, 8, y, 24 horas o según el Método de Ensayo D2435 después de la aplicación del fluido. Nota 2: En suelos de alta permeabilidad, el colapso puede ocurrir rápidamente y el tiempo dependerá de la dificultad de medir las deformaciones.

10.3.1 El agua debe ser agua destilada – desionizada para determinar el Índice de Colapso.

10.3.2 Utilice fluidos apropiados para diversas condiciones del sitio, o anticipando cambios de las características del agua subterránea para determinar el Potencial de Colapso. Estos fluidos deben ser descritos en el reporte.

10.4 Agregue el fluido para permitir que el espécimen se inunde únicamente desde el fondo, de manera que el aire no sea atrapado en el espécimen.

10.5 La duración de los incrementos de carga después de la inundación deberá ser durante la noche, o hasta que la consolidación primaria haya sido completada, según el Método de Ensayo D 2435.

10.6 Cargas verticales adicionales deberán ser aplicadas al espécimen se acuerdo al Método de Ensayo D2435 según sea necesario o hasta que la pendiente de la curva deformación vs esfuerzo sea obtenida. Registre la deformación vs tiempo según 10.3. Deje cada incremento de carga durante la noche o hasta que la consolidación primaria se haya completado.

## 11. Reporte

11.1 Reporte la siguiente información:

11.1.1 Identificación y descripción del espécimen de prueba, incluyendo si se trata de una muestra inalterada, remodelada, o preparada de alguna otra forma.

11.1.2 Contenido de agua inicial y final y peso unitario seco.

11.1.3 Dimensiones del espécimen

11.1.4 Descripción del consolidometro.

11.1.5 Carga vertical aplicada al momento de la inundación, y,

11.1.6 Porcentaje de compresión o deformación del espécimen ante cada esfuerzo vertical aplicado previo a la inundación.

11.2 Los datos deben ser graficados como deformación vs logaritmo de esfuerzo vertical aplicado. Porcentaje de vacíos puede ser usado en lugar de la deformación, si se conoce la gravedad específica:

11.2.1 la Figura 1 es una lustración de los datos obtenidos de la prueba de determinación del potencial de colapso.  $I_c$  se calcula para el esfuerzo vertical de 100kPa (1 tsf) por la ecuación 1:

$$I_c = (9.6 - 1.5) = 8.1$$

Donde el punto C Corresponde a 9.6% de deformación, y el punto B al 1.5% de deformación. El asentamiento potencial de un estrato de suelo de 3 m (10 ft) de espesor con dicho potencial de colapso es de  $8.1 * (3/100) = 0.24$  m (0.81 ft).

11.2.2 El potencial de colapso puede ser estimado aplicando un esfuerzo vertical inferior a 100 kPa (1 tsf), calculando la diferencia de deformaciones entre la curva de inundación (punteada) y la curva sin inundar. Por ejemplo, el potencial de colapso a 40 kPa (0.4 tsf) es:

$$I_c = (6.8 - 0.8) = 6.0$$

El asentamiento del estrato es de  $6.0 * (3/100) = 0.18$  (0.6 ft).

11.3 Cualquier desviación a los procedimientos descritos, incluyendo secuencias especiales de carga, procedimientos de preparación de especímenes, dimensiones especiales del espécimen, y liquido especial de inundación.

11.4 Cualesquiera, el índice de colapso  $I_c$ , o el potencial de colapso  $I_c$ , puede ser aplicado de acuerdo a las definiciones de la sección 3.

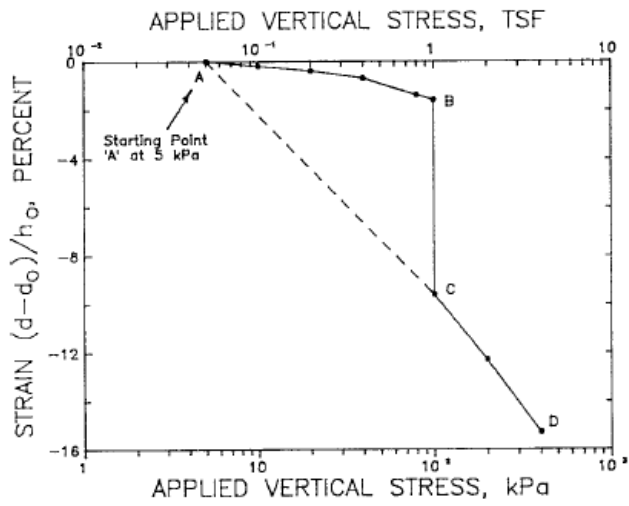
## 12. Precisión y Sesgo

12.1 Se están evaluando datos para determinar la precisión de este método de prueba. Además, el Subcomité 18.05 está buscando datos pertinentes de los usuarios del método de prueba.

12.2 No hay valores de referencia válidos para determinar la precisión de este método de ensayo, por lo tanto, el sesgo no puede ser determinado.

## 13. Palabras clave

Colapso, índice de colapso, potencial de colapso, compresibilidad, consolidación, suelo.



d: lectura del dial, mm (pulgada)

$d_0$ = lectura del dial a la carga de fijación, mm (pulgada)

$h_0$ = espesor inicial del espécimen, mm (pulgada)

Nota 1:  $(d-d_0)/h_0$  es multiplicado por 100 para obtener porcentaje

**Figura 1. Ejemplo de la curva de compresión de la prueba de potencial de colapso**