



**RECTOR**  
**JOSÉ MARÍA TOJEIRA, S.J.**

**SECRETARIO GENERAL**  
**RENÉ ALBERTO ZELAYA**

**DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**CELINA PÉREZ RIVERA**

**COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**WALTER MAURICIO SALAZAR**

**DIRECTOR DEL TRABAJO**  
**WALTER HERNÁNDEZ**

**LECTORA**  
**MARY PATRICE MENDEZ**



Es necesario agradecer a todas las personas que colaboraron para el desarrollo de este documento:

Al señor Walter Hernández por aportar sus conocimientos en geología, por dedicar tiempo en días no laborales para los viajes de campo realizados, por facilitarnos el transporte, por conseguir los instrumentos necesarios y por el gran interés manifestado en la realización de este trabajo.

A la ingeniera Paty por apoyarnos a toda hora incluyendo días feriados

A las personas del laboratorio de mecánica de suelos: Walter García, Tania Morales y Néstor España por brindar asesoría y colaboración, inclusive en sus tiempos libres

A la ingeniera Jacqueline Cativo por la asesoría, aportación de recursos didácticos, su entusiasmo y el apoyo moral brindado.

A Karina Ascencio por facilitarnos toda la documentación de la alcaldía de Santo Tomás.

A Denis López por colaborarnos en la extracción de los quesos todos los domingos.

A Franklin Argueta por sacarnos de apuros en los momentos más difíciles en la realización de este documento.

A todos nuestros demás compañeros por sus diversas colaboraciones, en especial a: Mario Lino, Karla Melgar, Héctor Henríquez, Denis Cornejo, Pablo Chávez, Mauricio Chicas, Ricardo Saguer, Sonia Magaña y Karen Palomo.

Al ingeniero Rafael González del ISCYC por la asesoría brindada.

Al Sr. Recinos de los laboratorios de química por facilitarnos materiales para las prácticas.

A todas las demás personas que nos colaboraron de alguna u otra manera en cualquier etapa de este trabajo.

A todos ustedes, mil gracias.

Mónica y Alejandro.



A Dios Todopoderoso por darme la oportunidad de poder escribir un libro, a mis padres por financiarme mis estudios, a mis hermanos (Eduardo Nacho Ali) por apoyarme constantemente. A mi familia por tenerme presente en sus oraciones.

A Mónica y su familia por darme aliento y ánimos en los momentos críticos del desarrollo de este trabajo.

A mis profesores por sus sabios consejos, especiales a la Ing. Cativo e Ing. Paty.

A todos mis compañeros de grupo por brindarme ayuda en los momentos que más los necesitaba, especiales a Franklin, Pablo, Denis, Hector, Karla, Ricardo y Sonia.

A la Representación del BID, por darme la oportunidad de trabajar con ellos y darme todo el tiempo que necesité para elaborar este trabajo, especiales a mis jefes (Sr. Cruz y Sr. Linares); a los demás pasantes (Rosa, Karen, Josué, Alejandro).por escuchar como eran los avances diarios.

A mis amigos de la Dolores y aledaños por hacer menos estresante este trabajo y por proporcionarme todas las herramientas computacionales que tenían a su alcance. A ellos les digo “VVE, VV”

Alejandro



Llegó por fin el día tan anhelado y debo rendir mis agradecimientos.

A Dios por haberme dado la oportunidad de tener acceso al estudio y proporcionarme el don de la perseverancia.

A “la Tita” (mi mamá) gracias por todo tu apoyo, eres un verdadero ejemplo de mujer valiente, ya que has sido madre y padre a la vez, hoy te digo que lo has realizado a entera satisfacción. Siempre me he sentido orgullosa de ti y este triunfo es ahora tuyo.

A mis abuelos Celia e Isabel por todo su amor, sus consejos, por ser mis segundos padres y rezar siempre por mí.

A mis tíos que han sido siempre los primeros que están motivándome y brindando todo su entusiasmo: Carlos, Heriberto, Elsy y Nena, ya por fin, aquí está el cartón.

A mis queridos primos: Erick, Paolo y Aldo que son la fuente de mi inspiración, gracias por sacrificar horas de juego en la realización de este trabajo.

A mis padrinos Argentina y Antonio gracias por su apoyo, por creer en mí y por extenderme la mano siempre que me he encontrado en apuros.

A Alejandro, gracias por las explicadas previas a los exámenes que tuvimos en la U, por escucharme, por soportar todas mis locuras, por levantarme el ánimo cuando sentía que no podía más, por tu paciencia y sobre todo por ser mi amigo.

A la niña Graciela, la abuelita de Alejandro gracias por su amabilidad y por darme ánimos.

A mis amigas de toda la vida: Alejandra, Arleth, Beatriz, Iris y Jessica que han estado conmigo siempre en las buenas y en las malas, ya que en medio de las tormentas siempre nace un sol resplandeciente en cada una de ustedes y lo comparten conmigo. Es un gran privilegio el haberlas encontrado en esta vida y poderlas llamar mis “cheras”.

A mis compañeros de carrera, quiero decirles que estar todo el día con ustedes es lo que más voy a extrañar de la U, en especial a: Karen, Kenny, Karla Melgar, Héctor, Denis, Jonatan, Félix, Franklin, Pablo, Eduardo. También, gracias a las personas que tuve la dicha de conocer de otras carreras en especial a: Ana Liszt, Metzi, Karina, Verónica, Mauricio Cristales y Adán.

A mis profesores, gracias por toda su paciencia, dedicación, esmero para nuestro aprendizaje y por no sólo brindarnos conocimientos académicos sino también éticos, en especial a Ing. Cativo, esposos Hasbún, Ing. Castellanos y al padre Cortina.

Mónica.





## **RESUMEN EJECUTIVO**

**CAPÍTULO 1.** Este trabajo comprende el diseño de dos proyectos ubicados en Santo Tomás: la estabilización de un talud en la colonia Brisas del Sur y el relleno de un botadero en la cabecera de la quebrada El Cacao para la posterior construcción de un parque. Además contempla la identificación de las unidades geológicas existentes en los lugares antes mencionados, con sus correspondientes parámetros geotécnicos.

**CAPÍTULO 2.** Se presentan conceptos vulcanológicos y se explican las distintas formaciones geológicas existentes en los dos lugares de estudio: La formación Cuscatlán del Plioceno-Pleistoceno Medio, que comprende las unidades piroclásticas más antiguas de la caldera de Ilopango, compuestas por múltiples ignimbritas masivas, compactas, color rosado, beige, blanco y depósitos de caída actualmente compactos. La formación San Salvador que está constituida por los productos efusivos y explosivos del volcán San Salvador y los originados por la Caldera de Ilopango, ocurridos desde el Pleistoceno Superior hasta el Holoceno; los depósitos de Tierra Blanca está formado por depósitos de caída y flujos piroclásticos, con una amplia distribución de espesores potentes en la cercanía del centro de emisión, en este caso la Caldera de Ilopango, que constituyen un ciclo de erupciones plinianas representadas por cuatro episodios del más antiguo al más joven: TB4, TB3 y Tierra Blanca Joven (TBJ). Estos episodios eruptivos están separados uno de otro por paleosuelos poco desarrollados que indican que hubo un corto espacio temporal sin actividad; TB4 el cual se caracteriza por tener mayor espesor que los otros depósitos, es de color blanco en la base pero hacia el techo cambia gradualmente a amarillento hasta formar el paleosuelo café; TB3 que muestra depósitos de flujos piroclásticos con deformaciones cuya matriz fina engloba fragmentos de pómez, el techo presenta un paleosuelo delgado de color café-amarillento; TBJ la cual está subdividido a su vez en las unidades A, B, C, D, E y F.

**CAPÍTULO 3.** Este capítulo comprende los conceptos y descripción de fenómenos que están relacionados con la problemática en estudio, tales como: compactación, cálculo de volumen de material, coeficiente de variabilidad volumétrica, consolidación, cohesión en

TBJ y exfoliación. Estos dos últimos fenómenos tienen una gran influencia en el comportamiento que presenta el talud de la col. Brisas del Sur como se verá en el análisis del diseño respectivo.

CAPÍTULO 4. En el capítulo 4, se presentan los conceptos concernientes a las prácticas de laboratorio realizadas. Las prácticas de laboratorio efectuadas son las siguientes: extracción de muestras inalteradas, ensayo triaxial, clasificación visual-manual, límites de consistencia de Atterberg, análisis granulométrico mediante el método del hidrómetro, gravedad específica y ensayo de penetración estándar (SPT). La mayor parte del tiempo disponible para éste trabajo se ha invertido en la obtención de los parámetros geotécnicos de las diferentes formaciones geológicas, ya que mientras mayor sea la confiabilidad de los resultados de laboratorio, menor será la incertidumbre de los resultados de los modelos utilizados.

CAPÍTULO 5. En el capítulo 5 se presentan los resultados de las prácticas de laboratorio así como los respectivos análisis en cuanto a su coherencia e incertidumbre.

CAPÍTULO 6. El capítulo 6 está enfocado en presentar aquellos métodos de estabilidad que se basan en un análisis de equilibrio límite. El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El factor de seguridad se puede plantear tanto en términos de equilibrio de fuerzas como en términos de equilibrio de momentos. Los métodos más conocidos de equilibrio de momentos son el ordinario de Fellinius y el de Bishop. El método más conocido para equilibrio de fuerzas es el de Janbu. Cuando se quiere hacer un análisis más riguroso, se puede realizar uno que satisfaga tanto equilibrio fuerzas como equilibrio de momentos, el caso presentado en éste capítulo es el propuesto por Morgenstern-Price.

CAPÍTULO 7. Para el diseño del drenaje, es importante explicar las labores de recolección de datos y sus análisis, lo cual incluye: reconocimiento del lugar de la obra,

información topográfica, establecer las características del área tributaria del río (cuenca), información hidrometeorológica y la evaluación de caudales. Se realiza también una descripción de los drenajes que contemplan el control del agua, tanto superficial como subterránea, ya que son muy efectivos y son generalmente más económicos que la construcción de grandes obras de contención, en cuanto tienden a evacuar la escorrentía, considerada como un elemento desestabilizante en los taludes.

**CAPÍTULO 8.** Se presenta un estudio hidrológico e hidráulico de la quebrada el Cacao en el que se muestra el cálculo del caudal y el área hidráulica para el drenaje subterráneo, además se presentan las dimensiones que debe tener el drenaje superficial para el adecuado desalojo de la escorrentía. Se muestra también un estudio geológico en el que se identifica en un mapa las formaciones de la quebrada El Cacao y un estudio geotécnico con los resultados de SPT obtenidos. Se incluyen además especificaciones técnicas para la ejecución del relleno que contienen: medidas técnicas para la remoción de la vegetación, medidas técnicas para la depositación del material de relleno, medidas técnicas para la conformación y estabilización de taludes a generarse (taludes ubicados en colonia 3 de Mayo, calle Alberto Masferrer y talud final que cierra el relleno) con los tipos de sistemas de protección, medidas técnicas para el drenaje subterráneo, medidas técnicas para la plantación y mantenimiento de los árboles plantados sobre el relleno.

También se explican los procedimientos necesarios para verificar la estabilidad del talud de la Colonia Brisas del Sur.

Se exponen los criterios empleados para la elección de datos de laboratorio necesarios para el análisis, así como los mecanismos de falla planteados, las condiciones del nivel piezométrico y la sollicitación dinámica. Se presentarán los análisis efectuados a las secciones actuales y las secciones propuestas. Finalmente se incorporan las secciones transversales de las canaletas diseñadas para el desalojo de la escorrentía superficial y las especificaciones técnicas.

De los análisis de estabilidad planteados con los modelos disponibles, se establece que los resultados obtenidos no constituyen las condiciones críticas, ya que las fallas generadas no representan las condiciones reales. El mecanismo de falla real está regido por el proceso de exfoliación, las condiciones de humedad y por el empuje de las raíces.

CAPÍTULO 9. Éste capítulo incluye las recomendaciones del trabajo de graduación.

CAPÍTULO 10. Éste capítulo incluye las conclusiones del trabajo de graduación.

## ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tablas .....	xii
Siglas .....	xii
Simbología.....	xv
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 ASPECTOS GEOLÓGICOS .....	7
2.1 Geología Estructural. ....	7
2.2 Geomorfología.....	8
2.3 Sismicidad. ....	8
2.4 Geología del Municipio.....	8
2.5 Correlación Estratigráfica.....	11
2.5.1 Descripción de las Formaciones Geológicas en el área del proyecto. ....	12
2.6 Estratigrafía de la TBJ.....	14
2.7 Tipos de erupciones .....	17
2.7.1 Erupciones plinianas .....	17
2.7.2 Erupciones vulcanianas .....	18
2.7.3 Erupciones estrombolianas. ....	19
2.7.4 Explosiones freáticas y freatomagmáticas.....	19
2.8 Erupciones explosivas y depósitos piroclásticos .....	20
2.8.1 Terminología descriptiva .....	20
2.8.2 Tipos de depósitos piroclásticos (subácueos y subaéreos).....	22
2.9 Formaciones geológicas en la quebrada El Cacao y col. Brisas del Sur.....	23
3 CONCEPTOS DE MECÁNICA DE SUELOS .....	29
3.1 Suelo.....	29
3.2 Compactación de suelos .....	29
3.3 Cálculo de volumen de material .....	30
3.4 Coeficiente de variabilidad volumétrica .....	30
3.5 Consolidación .....	30

3.6	Cohesión en TBJ.....	31
3.7	Exfoliación.....	34
3.8	Modelo conceptual de agua Sub-superficial.....	36
4	PRUEBAS DE LABORATORIO.....	41
4.1	Extracción de unidades inalteradas.....	41
4.2	Identificación del suelo y determinación del contenido de humedad. (ASTM D-2488-93).....	44
4.3	Método de ensayo estándar para el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de suelos. (ASTM D 4318).....	46
4.4	Método de ensayo estándar para gravedad específica de suelos. (ASTM D 854-98). .....	48
4.5	Análisis granulométrico por el método del hidrómetro. (ASTM D 442-63).....	50
4.6	Ensayo triaxial no consolidado no drenado, Prueba rápida (ASTM D-2850).....	52
4.7	Ensayo de penetración estándar (ASTM D 1586-94) .....	54
4.8	Resumen de resultados.....	55
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LABORATORIO.....	59
5.1	Ángulo de fricción.....	59
5.2	Cohesión.....	60
5.3	Gravedad Específica y Granulometría .....	65
	Formación .....	69
6	MÉTODOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES .....	71
6.1	Métodos de equilibrio límite y factor de seguridad .....	71
6.2	Formulación de los métodos del equilibrio límite.....	72
6.2.1	Estática, geometría de la falla y propiedades de los materiales .....	72
6.2.2	Método general del límite de equilibrio.....	78
6.2.3	Factor de seguridad para equilibrio de momentos.....	79
6.2.4	Factor de seguridad para equilibrio de fuerzas .....	80
6.2.5	Fuerza normal en la base de la dovela.....	80
6.2.6	Fuerzas que actúan en la interfase de las dovelas.....	82
6.3	Método utilizado por el programa Slope/w de Geo-Slope para el cálculo del factor de seguridad.....	85

6.3.1	Primera etapa .....	85
6.3.2	Segunda Etapa.....	85
6.3.3	Tercera Etapa.....	86
6.3.4	Cuarta Etapa.....	88
6.4	Comparación de los diversos métodos.....	90
6.5	Norma técnica para el diseño de estabilidad de taludes, MOP [1994] .....	93
6.5.1	Consideraciones Generales.....	93
6.5.2	Efecto Estático y Dinámico. ....	93
7	<b>ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS.</b> .....	<b>95</b>
7.1	Reconocimiento del lugar de la obra .....	95
7.2	Información topográfica. ....	95
7.3	Establecimiento de las características del área tributaria del río (cuenca).....	96
7.3.1	Área de drenaje. ....	96
7.3.2	Pendiente media de la cuenca .....	96
7.3.3	Pendiente media del cauce.....	96
7.3.4	Vegetación y condición de suelo.....	97
7.4	Información hidrometeorologica .....	97
7.5	Evaluación de los caudales.....	97
7.5.1	El método de la fórmula racional.....	98
7.6	Control de aguas superficiales y subterráneas.....	101
7.6.1	Drenaje superficial .....	101
7.6.2	Drenaje subterráneo.....	104
7.6.3	Colchones de drenaje.....	106
8	<b>DISEÑO. SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS</b> .....	<b>107</b>
8.1	Diseño del relleno .....	107
8.1.1	Estudio hidrológico e hidráulico de la quebrada el cacao .....	107
8.1.2	Estudio geológico.....	115
8.1.3	Estudio geotécnico .....	115
8.1.4	Especificaciones técnicas para la ejecución del relleno .....	116
8.2	Análisis de estabilidad de taludes .....	122
8.2.1	Introducción .....	122



8.2.2	Método y mecanismo de falla utilizado.....	123
8.2.3	Datos del laboratorio empleados en el análisis .....	125
8.2.4	Condiciones del nivel piezométrico .....	127
8.2.5	Análisis dinámico.....	127
8.2.6	Secciones transversales analizadas.....	127
8.2.7	Secciones transversales de las canaletas y graderías disipadoras. ....	134
8.2.8	Especificaciones Técnicas .....	138
8.2.9	Presupuesto General de la Construcción del Talud.....	153
9	CONCLUSIONES. ....	155
10	RECOMENDACIONES.....	159
11	BIBLIOGRAFIA .....	163

ANEXO A	Difracción de rayos X.
ANEXO B	Resultados de ensayo SPT
ANEXO C	Mapas Geológicos.
ANEXO D	Planos de Diseño.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Mapa de ubicación del proyecto.....	3
Figura 1. 2 Deslizamientos superficiales ocurridos en el talud de la col. Brisas del Sur el 3 de Julio de 2005 debido a las precipitaciones.....	4
Figura 1. 3 Panorama de la quebrada El Cacao. ....	5
Figura 1. 4 Condiciones de pobreza en la que viven los habitantes de la col. 3 de Mayo contiguo a la quebrada El Cacao.....	5
Figura 2. 1 Interacción de las placas de Coco, El Caribe y Norte América. ....	7
Figura 2. 2 Mapa Geológico de Santo Tomás. Tomado del Mapa Geológico de El Salvador. Escala 1:100000. ....	9
Figura 2. 3 Perfil estratigráfico de los depósitos de Tierra Blanca Joven. ....	16
Figura 2. 4 Partes principales de una columna eruptiva. ....	18
Figura 2. 5 Esquemas de geometría de relleno de la topografía de los distintos depósitos piroclásticos. ....	22
Figura 2. 6 Tierra Blanca Joven en la quebrada El Cacao.....	23
Figura 2. 7 Tierra Blanca Joven en el talud Brisas del Sur. ....	24
Figura 2. 8 TBJ, TB3 y TB4 (Fm. San Salvador). ....	24
Figura 2. 9 Unidad TB4 (Fm. San Salvador) y Fm. Cuscatlán. ....	25
Figura 2. 10 Uso del inclinómetro para la medición indirecta de espesores. ....	26
Figura 2. 11 Sonda eléctrica para la medición de la profundidad del nivel del agua subsuperficial. ....	26
Figura 2. 12 Maniobras efectuadas para la medición de espesores en las unidades. ....	27
Figura 3. 1 . Fragmentos piroclásticos de vidrio volcánico, tamaño arena fina, colocados en base de aceite y vistas a través del microscopio.....	32
Figura 3. 2 Vista en planta del modelo conceptual de flujo de agua supsuperficial. ....	38
Figura 3. 3 Perfil del modelo conceptual de flujo de aguas subsuperficiales controladas por el paleosuelo de TB3. ....	39
Figura 4. 1 Extracción de muestra inalterada en el talud de la col. Brisas del Sur. ....	43
Figura 4. 2 Proceso de calibración en el Ensayo del hidrómetro.....	52
Figura 4. 3 Elaboración de la probeta para el Ensayo Triaxial. ....	53

Figura 4. 4 Ensayo SPT en el talud de la col. Brisas del Sur.....	55
Figura 4. 5 Puntos de extracción de muestras inalteradas. ....	56
Figura 5. 1 Círculos de Mohr para TBJ (Unidad C), muestra 1.....	62
Figura 5. 2 Círculo de Mohr para TBJ (Unidad C), muestra 2 .....	63
Figura 5. 3 Círculos de Mohr para TB3, muestra 1.....	63
Figura 5. 4 Círculos de Mohr para TB3, muestra 2.....	64
Figura 5. 5 Círculos de Mohr para paleosuelo TB4 .....	64
Figura 5. 6 Círculos de Mohr para paleosuelo Cuscatlán.....	65
Figura 5. 7 Curva granulométrica de TBJ (Unidad C) muestra 1. ....	66
Figura 5. 8 Curva granulométrica de TB3 muestra 1. ....	66
Figura 5. 9 Curva granulométrica de TB3 muestra 2. ....	67
Figura 5. 10 Curva granulométrica de paleosuelo TB4.....	67
Figura 5. 11 Curva granulométrica de paleosuelo Cuscatlán. ....	68
Figura 5. 12 Curva granulométrica de formación Cuscatlán. ....	68
Figura 5. 13 Resultados de ensayos del hidrómetro. ....	70
Figura 6. 1 Fuerza actuando en una dovela cuando la superficie de falla es circular. ....	75
Figura 6. 2 Fuerzas actuando en una dovela cuando la superficie de falla es compuesta. ...	75
Figura 6. 3 Fuerzas actuando en una dovela cuando la superficie de falla está definida por segmentos de líneas recta.....	76
Figura 6. 4 Variación de la dirección de las fuerza de interfase con respecto al eje X. ....	83
Figura 6. 5 Variación de la dirección de la fuerza de interfase a lo largo de la superficie de falla. ....	84
Figura 6. 6 Distancia B definida por Janbu, Bjerrum and Kjaernsli. ....	86
Figura 6. 7 Factor de corrección $f_0$ del Método simplificado de Janbu .....	86
Figura 6. 8 Primera estimación de $\lambda$ utilizada en la Solución Rápida.....	87
Figura 6. 9 Procedimiento utilizado cuando $F_m > F_f$ para la estimación $\lambda_0$ .....	87
Figura 6. 10 Procedimiento utilizado cuando $F_m < F_f$ para la estimación $\lambda_0$ .....	88
Figura 6. 11 Variación del factor de seguridad respecto a $\lambda$ cuando la función es senoidal. .....	89
Figura 6. 12 Variación del factor de seguridad respecto a $\lambda$ cuando la función es constante. .....	89

Figura 6. 13 Factores de seguridad obtenidos en distintos métodos.....	90
Figura 6. 14 Mapa de zonificación sísmica. ....	94
Figura 7. 1 Sistemas de dren de zanja .....	105
Figura 7. 2 Diagrama de un colchón de drenaje colocado debajo de un terraplén .....	106
Figura 8. 1 Cuenca El Cacao.....	107
Figura 8. 2 Vegetación existente en la quebrada El Cacao.....	110
Figura 8. 3 Drenaje subterráneo.....	112
Figura 8. 4 Vista de fallas planas que ocurren paralelas a la cara del talud de la col. Brisas del Sur.....	124
Figura 8. 5 Modelo de la falla planteada por Hoek y Bray.....	125
Figura 8. 6. Secciones transversales analizadas.....	128
Figura 8. 7 Tipos de fallas planas propuestas en las diferentes secciones.....	129
Figura 8. 8 .Falla crítica bajo la condición de sismo.....	129
Figura 8. 9 Superficie de falla circular bajo la condición de sismo, sección actual.....	130
Figura 8. 10 Superficie de falla circular bajo la condición de sismo, sección de corte propuesta.....	132
Figura 8. 11 Superficie de falla plana bajo la condición de sismo, sección de corte propuesta.....	133
Figura 8. 12 Mecanismo de falla circular en cenizas volcánicas disparado por lluvias.....	133
Figura 8. 13 Canal propuesto para la berma. ....	134
Figura 8. 14 Canal propuesto para el tramo A-E. ....	135
Figura 8. 15 Canal propuesto para el tramo A-B. ....	135
Figura 8. 16 Canal propuesto para el tramo B-C. ....	136
Figura 8. 17 Canal propuesto para el tramo C-D. ....	136
Figura 8. 18 Canaleta de Coronamiento sección E-E' . ....	137
Figura 8. 19 Isométrico de graderías propuestas, sin escala.....	137

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Distribución geográfica de los miembros geológicos en Santo Tomás. ....	10
Tabla 2. 2 Estratigrafía de las formaciones geológicas del área de estudio .....	11
Tabla 4. 1 Identificación de suelos inorgánicos de grano fino a partir de ensayos manuales. .....	46
Tabla 4. 2 Tabla Resumen de Resultados de Laboratorio. ....	57
Tabla 4. 3 Tabla Resumen de Resultados de Laboratorio. ....	58
Tabla 5. 1 Ángulos de fricción (grados) del talud Brisas del Sur, Santo Tomás. ....	59
Tabla 5. 2. Datos de cohesión (kg/cm <sup>2</sup> ) del talud Brisas del Sur, Santo Tomás. ....	60
Tabla 5. 3 Resumen de resultados del hidrómetro. ....	69
Tabla 6. 1 Ecuaciones disponibles para resolver el factor de seguridad .....	77
Tabla 6. 2 Variables desconocidas para resolver el factor de seguridad .....	78
Tabla 6. 3 Condiciones de equilibrio estático que se satisfacen en los diversos métodos ..	91
Tabla 6. 4. Métodos basados en equilibrio límite .....	92
Tabla 6. 5 Factores de seguridad recomendados por el Reglamento de Diseño. ....	93
Tabla 8. 1 Parámetros de Cuenca El Cacao .....	108
Tabla 8. 2 Determinación de la pendiente promedio de Cuenca El Cacao.....	108
Tabla 8. 3 Tabla de intensidad-duración-frecuencia, estación Ilopango. ....	109
Tabla 8. 4 Períodos de retorno mínimo para elementos de drenaje. [Monsalve, 1999] ....	110
Tabla 8. 5 Cálculo de caudal de la cuenca El Cacao. ....	111
Tabla 8. 6 Cálculo del área hidráulica para el drenaje subterráneo.....	112
Tabla 8. 7 Dimensiones de los canales. ....	114
Tabla 8. 8 Cálculo de volumen del relleno (m <sup>3</sup> ).....	116
Tabla 8. 9 Especies recomendadas para revegetación en taludes .....	121
Tabla 8. 10 Resumen de resultados de pruebas triaxiales.....	126
Tabla 8. 11 Factores de Seguridad de las secciones.....	131
Tabla 8. 12 Tolerancias en las Mediciones para la Construcción y el Estacado.....	144
Tabla 8. 13 . Presupuesto General de la Construcción del Talud.....	153

## **SIGLAS**

AMSS	Área Metropolitana de San Salvador
CAD	Diseño asistido por computadora
COSUDE	Agencia Suiza de Cooperación para el Desarrollo.
FODES	Fondo de Desarrollo de El Salvador.
GLE	Método del Límite de Equilibrio Generalizado
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería.
MARN	Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales
MOP	Ministerio de Obras Públicas.
S.G.	Suma Global (Método de Pago de Servicios).
SNET	Servicio Nacional de Estudios Territoriales
SPT	Prueba de Penetración Estándar (Estándar Penetration Test)
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
UCA	Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”

## **ABREVIATURAS**

Col.	Colonia
Ec.	Ecuación
Fm.	Formación

## SIMBOLOGÍA

a	Es la distancia perpendicular medida desde la resultante de las fuerzas debidas a fluidos al centro de rotación o centro de momentos. Los subíndices L y R se refieren a los lados izquierdo y derecho del talud, respectivamente.
A	Es la resultante de las fuerzas debidas al agua. Los subíndices L y R se refieren a los lados izquierdo y derecho del talud, respectivamente (Capítulo 6). También área hidráulica (Capítulo 7).
b	Base
c	Cohesión
C	Coefficiente de escorrentía
$C_u$	Coefficiente de uniformidad.
$C_c$	Coefficiente de curvatura.
$c'$	Cohesión efectiva.
D	Carga externa puntual. También diámetro de una esfera, (cm).
$D_{10}$	Diámetro de grano correspondiente al 10 % más fino en peso o masa.
$D_{30}$	Diámetro de grano correspondiente al 30 % más fino en peso o masa.
$D_{60}$	Diámetro de grano correspondiente al 60 % más fino en peso o masa.
d	Distancia perpendicular medida desde el eje longitudinal de una carga puntual al eje de rotación o centro de momentos (Capítulo 6). También diferencia de nivel (Capítulo 7).
E	Fuerza normal que actúa entre cada dovela. Los subíndices L y R se refieren a los lados izquierdo y derecho de la dovela, respectivamente.
e	Distancia vertical medida desde el centroide de cada dovela al centro de rotación o centro de momentos.
f	Es la distancia perpendicular medida desde el eje longitudinal de la fuerza normal al centro de rotación o centro de momentos. Se asume que aquellas distancias f, ubicadas al lado derecho del eje de rotación de una pendiente negativa (taludes inclinados hacia la izquierda), son negativas y las distancias f ubicadas al lado izquierdo, son positivas. Para pendientes positivas, la convención de signos es la contraria.



F	Factor de seguridad.
$f(x)$	Función que representa la dirección relativa de la resultante de las fuerzas de interfase.
$F_f$	Factor de seguridad del equilibrio de fuerzas (Capítulo 6). También fuerzas debidas a la filtración (Capítulo 6).
$F_g$	Fuerzas gravitacionales.
$F_m$	Factor de seguridad del equilibrio de momentos.
$f_o$	Factor de corrección empírico del método de Janbu.
$F_s$	Fuerzas sísmicas.
g	Aceleración de la gravedad.
$G_s$	Gravedad específica.
h	Distancia vertical medida desde el centro de la base de cada dovela a la superficie del terreno.
$H_{máx}$	Altura máxima
$H_{med}$	Altura media
$H_{mín}$	Altura mínima
I	Intensidad de precipitación
$k_h$	Coefficiente sísmico horizontal.
kW	Fuerza sísmica aplicada en el centroide de cada dovela.
L	Longitud
$L_c$	Longitud de Cuenca
$M_a$	Masa del picnómetro lleno con agua a 20 °C.
$M_b$	Masa del picnómetro lleno con agua y suelo a 20 °C.
$M_o$	Masa de la muestra de suelo secado al horno.
N	Fuerza normal actuando en la base de una dovela.
n	Coefficiente de rugosidad
P	Perímetro
$P_m$	Perímetro mojado
$P_{rem}$	Precipitación media
Q	Caudal

R	Es el radio de giro para una superficie de falla circular o el brazo de momentos asociados con la fuerza cortante, $S_m$ para cualquier forma de superficie de falla (Capítulo 6). También Radio hidráulico (Capítulo 7).
S	Fuerza cortante que actúa en la base de cada dovela (Capítulo 6). También esfuerzo cortante (Capítulo 4).
s	Pendiente
Tc	Tiempo de concentración
u	Presión de poros.
V	Velocidad de caída de la esfera, (cm/s).
W	El peso total de una dovela de ancho b y de altura h.
X	Fuerza cortante vertical entre cada dovela. Los subíndices L y R se refieren a los lados izquierdo y derecho de la dovela, respectivamente.
x	Distancia horizontal que existe entre el eje longitudinal de la dovela al centro de rotación o centro de momentos.
z	Pendiente de talud
$^{14}\text{C}$	Carbono 14
$\alpha$	Es el ángulo entre la tangente al centro de la base de cada dovela y la horizontal. La convención de signos es la siguiente: es positivo cuando el ángulo de la pendiente se ubica en la misma dirección que la geometría de la pendiente. Es negativo cuando la geometría es la contraria.
$\beta$	Longitud de la base de cada dovela.
$\phi$	Ángulo de fricción interna
$\gamma_f$	Peso específico del fluido (generalmente agua), varía con la temperatura, (g/cm <sup>3</sup> ).
$\gamma_s$	Peso específico de los sólidos de un suelo.
$\gamma_s$	Peso específico de la esfera, (g/cm <sup>3</sup> ).
$\gamma_w$	Peso específico del agua.
$\lambda$	Relación de fuerza cortante y fuerza normal en la interfase de dovelas (Capítulo 6). También porcentaje de la fuerza normal relacionada con la fuerza cortante que actúa en la interfase de dovelas (Capítulo 6).
v	Viscosidad absoluta o dinámica del fluido, varía con la temperatura, (g/cm.s)

$\rho_s$	Densidad de los sólidos de un suelo.
$\rho_w$	Densidad del agua.
$\sigma_n$	Esfuerzo normal promedio en la base de cada dovela.
$\sigma_n$	Esfuerzo normal total.
$\omega$	Es el ángulo de la carga puntual con respecto a la horizontal. Este ángulo es medido en sentido contrario a las agujas del reloj.

# 1 INTRODUCCIÓN

El municipio de Santo Tomás, del departamento de San Salvador (Figura 1.1), se caracteriza por tener un relieve muy accidentado, debido a una gran cobertura de depósitos piroclásticos del Pleistoceno y Reciente, caracterizados por estar poco consolidados y que proceden de la Caldera de Ilopango. Entre esos depósitos se encuentran los más jóvenes conocidos por Tierra Blanca Joven (TBJ), de 430 años D.C., los cuales se distinguen por ser fácilmente erosionables durante la época de lluvias. Esos taludes frecuentemente producen desprendimientos ante la acción de las lluvias intensas o prolongadas o ante un sismo de importante magnitud, lo cual fue evidente durante los terremotos de enero y febrero de 2001. Tales derrumbes cierran el paso vehicular en varias partes del municipio, impidiendo la salida y entrada de vehículos a las distintas colonias y llevando serios problemas de comunicación a las comunidades allí asentadas.

La Agencia Suiza de Cooperación para el Desarrollo COSUDE, en el año 2003 llevó a cabo un estudio para la identificación de amenazas por derrumbes y deslizamientos en dicho municipio, en el cual se identificaron cuatro zonas con alto riesgo por movimientos de masa. También Geólogos del Mundo efectuó en el año 2004 una Caracterización de amenazas y mapas de peligrosidad. Una de las zonas de alto riesgo identificadas por inestabilidad de taludes en el estudio presentado por COSUDE es la Colonia Brisas del Sur; ésta ha sido seleccionada conjuntamente entre el personal de la Alcaldía de Santo Tomás y del SNET para llevar a cabo el estudio de suelos, el análisis de estabilidad y el diseño respectivo para el talud, el cual posee una altura máxima de 21m. Ver Figura 1.2.

Por otra parte, debido a que el municipio no cuenta con un parque recreativo para la población, la municipalidad buscó como solución rellenar la cabecera de la quebrada El Cacao y autorizarlo como botadero legal para la posterior construcción del parque. La quebrada El Cacao está ubicada contiguo a la Colonia 3 de Mayo y la calle Alberto Masferrer que conduce hacia la alcaldía del municipio. Ver Figura 1.3.

Para realizar esta investigación fue necesario realizar reuniones de discusión continua con las comunidades para explicarles el contenido de este proyecto y el beneficio social del mismo. Como producto de estas reuniones, las comunidades firmaron ante la Alcaldía un acta compromiso en la que se comprometieron a facilitar que estos trabajos se ejecuten de la mejor manera, lo cual se cumplió, ya que en el transcurso de este trabajo brindaron amablemente toda la información que les fue solicitada.

Para tal propósito, la alcaldía proporcionó los planos topográficos tanto del talud como de la quebrada en escala de detalle 1:1000 y 1:250 respectivamente, los cuales sirvieron de base para la elaboración de los proyectos. El SNET por su parte se encargó de la asesoría, transporte y logística para los trabajos de campo, mientras que la UCA facultó la asesoría y el laboratorio de suelos para la realización de los ensayos necesarios para la ejecución del estudio.

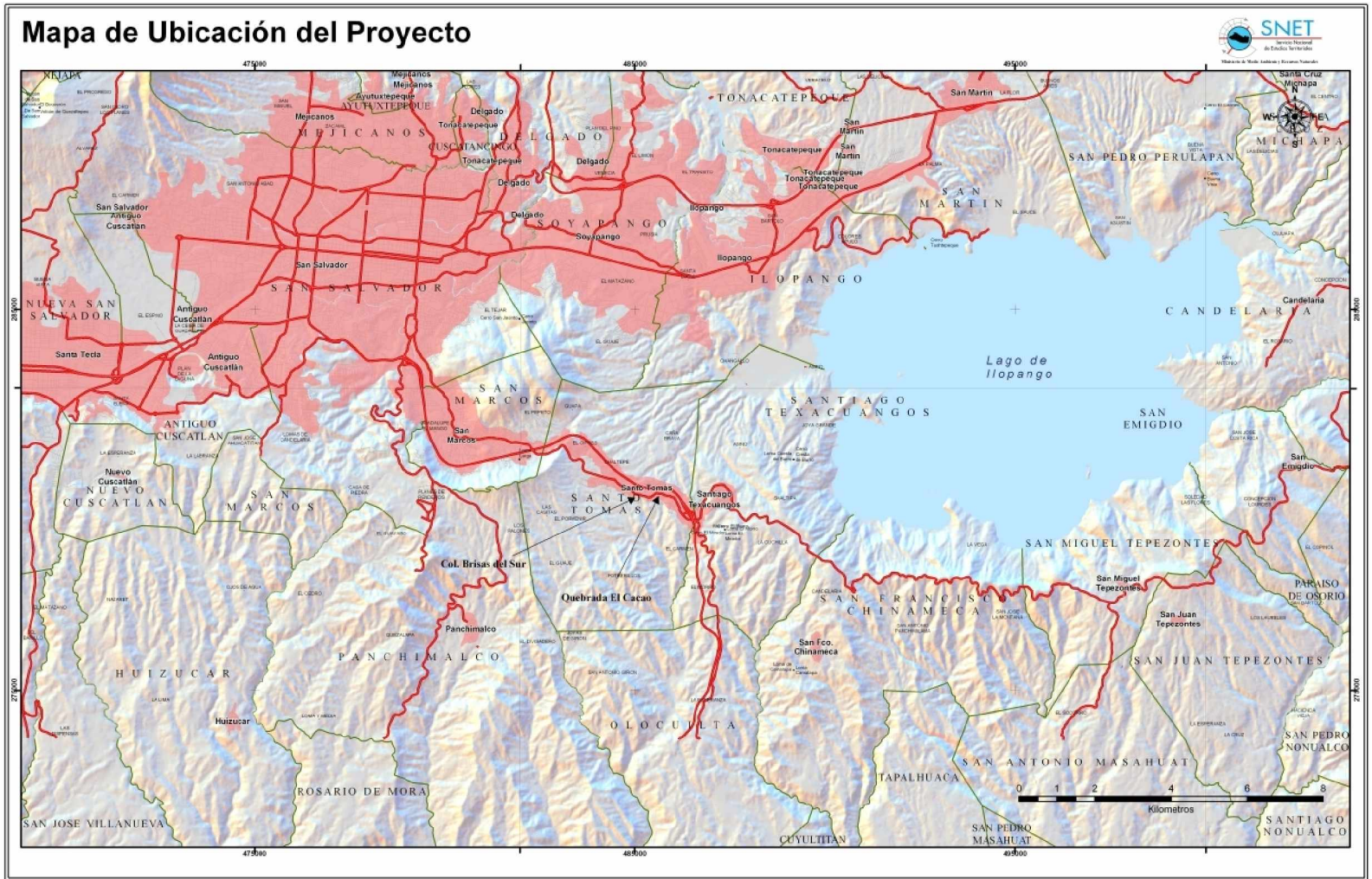


Figura 1. 1 Mapa de ubicación del proyecto. [SNET, 2005]





Figura 1. 2 Deslizamientos superficiales ocurridos en el talud de la col. Brisas del Sur el 3 de Julio de 2005 debido a las precipitaciones.



Figura 1. 3 Panorama de la quebrada El Cacao.



Figura 1. 4 Condiciones de pobreza en la que viven los habitantes de la col. 3 de Mayo contiguo a la quebrada El Cacao.

Los objetivos del estudio son los siguientes:

- Identificar las diferentes miembros de la Formación San Salvador: Tierra Blanca Joven (TBJ), TB3, TB4 y de la Formación Cuscatlán que están presentes en el talud y la quebrada, así como también, establecer los mecanismos de deposición



involucrados en las unidades que componen ambos proyectos, y determinar sus propiedades geotécnicas.

- Diseño y conformación del talud ubicado en la Colonia Brisas del Sur considerando los aspectos de drenaje y protección vegetal, de manera que propicie la movilización de los habitantes de la colonia y sus alrededores de una forma segura. Realizar además el cálculo y presupuesto del volumen de tierra a remover del talud.
- Diseño del relleno adecuado de un botadero para la construcción de un parque sobre la Quebrada El Cacao de la Colonia 3 de Mayo, que brinde un espacio físico recreativo para contribuir al desarrollo psico-social de los habitantes de la zona. Ver Figura 1.4.

Las limitantes del trabajo fueron las siguientes:

- La profundidad del perfil estratigráfico dependió del tipo de equipo de penetración estándar con que cuenta la UCA (hasta 6 metros) y de la accesibilidad para movilizar el equipo.
- La extracción de las muestras inalteradas en el talud dependió del tipo de suelo, de las dificultades de invierno porque se incrementa el contenido de humedad y hay más susceptibilidad al deslizamiento, los problemas de accesibilidad y de los espesores de las unidades presentes.
- La obtención de los parámetros geotécnicos de las unidades geológicas dependió si éstos presentaban una granulometría apta para analizarla con las pruebas de laboratorio triaxial o caja de corte que son con las que cuenta el laboratorio de mecánica de suelos de la UCA.

## 2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

### 2.1 Geología Estructural.

El municipio de Santo Tomás, se encuentra interceptado por una familia de fallas paralelas con dirección noroeste desplazándose hacia el sureste, también fallas transversales corriendo de norte a sur, dispuestas todas ellas principalmente, en la parte sur del municipio. El sistema estructural de la zona corresponde a la posición geográfica en la que se ubica el país y específicamente el Istmo Centroamericano, es decir, zona de confluencia entre placas tectónicas de gran actividad, siendo estas: Cocos del lado del Pacífico, y Caribe en el Atlántico (ver Figura 2.1); sumado a lo anterior, se deduce el hecho de que América Central es atravesada por el Cinturón de Fuego del Pacífico, o zona de menor espesor de la corteza continental, por tanto, es una área de intensa actividad volcánica.

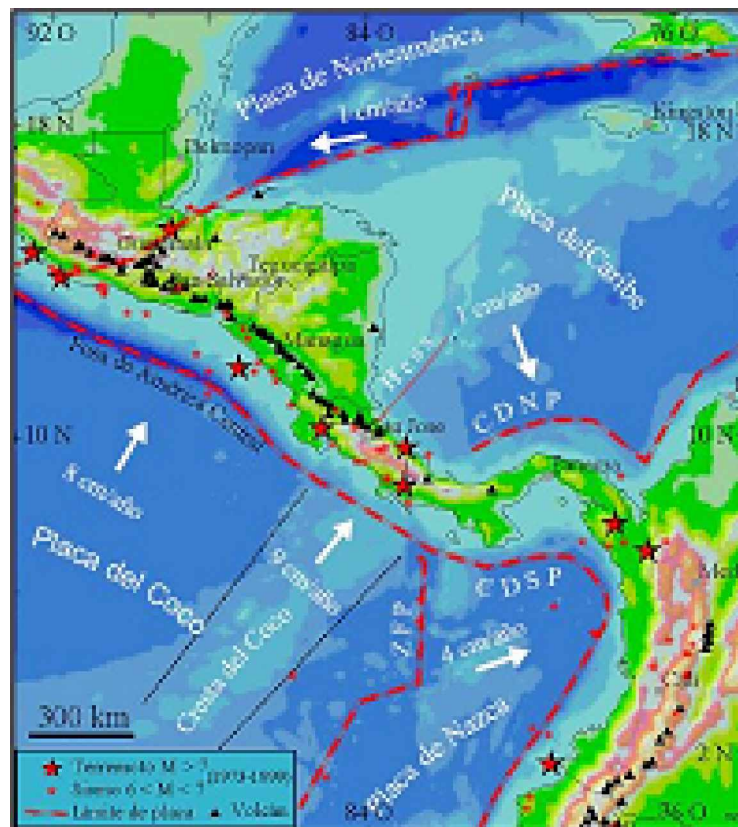


Figura 2. 1 Interacción de las placas de Coco, El Caribe y Norte América. [http:www.ineter.gob.ni]

## **2.2 Geomorfología.**

Los suelos constituyentes del Municipio de Santo Tomás, son fases onduladas a montañosas accidentadas, especialmente al oeste, sierra del sur, siendo su parte media semi-plana. Se estima que más del 50 % del terreno es accidentado. El cerro de mayor importancia es: El Amate, ubicado a 2 Km. al sur de la villa, con elevación de 820 msnm; las lomas San Luis, La Finquita, El Pino, Potrerillos, Gumala, El Pital, El Amate, El Campanario, El Mangón, El Retiro, Caña Brava y El Tablón. La Mayoría de las montañas del municipio se encuentran cubiertas de vegetación arbórea, solamente existen algunos sectores donde todavía se pueden observar pinares y robles; sin embargo, la tala indiscriminada de áreas vegetativas, ha provocando un cambio climático en la zona.

## **2.3 Sismicidad.**

Según la historia sísmica los eventos asociados al sistema de fallas San Salvador Ilopango son los más destructivos; considerando la recurrencia y aunque las magnitudes son moderadas, dada su escasa profundidad, resultan ser destructivos. Como ejemplos de estos eventos se pueden citar los terremotos de 1965, 1986 y 2001, los cuales dañaron severamente la capital y las poblaciones circunvecinas, incluyendo Santo Tomás. Probablemente los terremotos más destructivos para esta zona se deben a las fallas activas del sistema estructural San Vicente, principalmente a las fallas del sistema con orientación E-O; a las cuales se les atribuye el terremoto del 13 de febrero de 2001 y sus replicas. Otros temblores que han causado daños en la región se deben a la zona de interacción de placas tectónicas (placa de Cocos en las costas del Océano Pacífico, y la placa del Caribe en el Océano Atlántico), tal como el del 13 de enero de 2001

## **2.4 Geología del Municipio.**

Las unidades geológicas predominantes identificadas para el municipio de Santo Tomás, se deducen de acuerdo al Mapa Geológico, Hoja San Salvador escala 1:100,000 (ver mapa de figura 2.2). Así, los materiales geológicos en la zona de estudio se consideran

pertencientes a las épocas del Plioceno y Mioceno del periodo Terciario. La Tabla 2.1 muestra el porcentaje de área que ocupan respecto a la distribución espacial cada uno de los miembros geológicos.

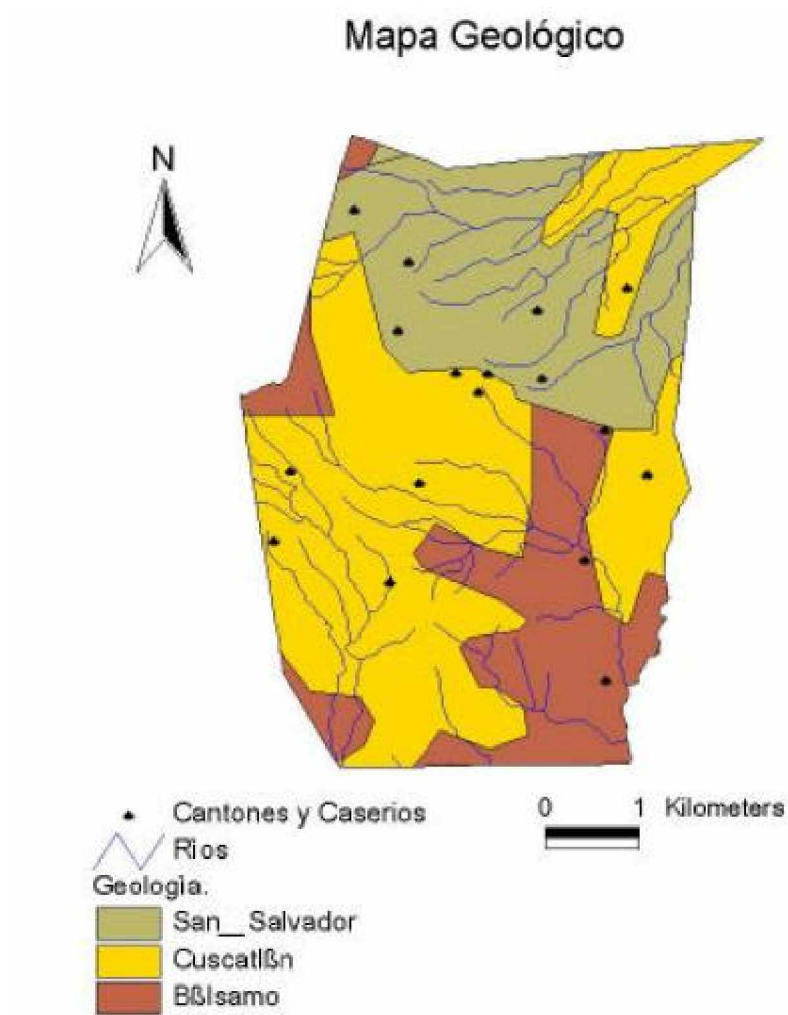


Figura 2. 2 Mapa Geológico de Santo Tomás. Tomado del Mapa Geológico de El Salvador. Escala 1:100000 [COSUDE, 2003].

- Formación Bálsamo

*b1. Epiclastitas volcánicas y piroclásticas*; localmente efusivas básicas a intermedias intercaladas. Dispuestas principalmente al sureste, así como pequeñas zonas al oeste y suroeste del municipio, con una área equivalente a 5.58 Km<sup>2</sup>.

*b3. Efusivas básicas intermedias.* Dispuestas al oriente, con dirección de norte a sur del municipio. Dispuesta al noroeste del municipio, es en realidad una área pequeña correspondiente a 0.10 Km<sup>2</sup>.

- Formación Cuscatlán

*c1. Piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas.* Estas recubren principalmente la zona sur del municipio de Santo Tomás. El miembro c1, abarca la mayor parte del municipio de Santo Tomás, igual a 13.05 Km<sup>2</sup> de superficie.

- Formación San Salvador

*s3. Piroclastitas ácidas, y epiclastitas volcánicas (tobas color café).* En el municipio este miembro aflora en la parte noroeste del municipio, como una pequeña cuchilla de terreno con 0.04 Km<sup>2</sup>. Este miembro se refiere al conjunto TB4, TB3 y TB2.

*s4. “Tierra Blanca Joven”,* constituidos especialmente por piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas, localmente efusivas ácidas. Localizadas principalmente en la parte central del municipio, siendo la villa del mismo dispuesta sobre este tipo de suelo. Localizado al norte del municipio de Santo Tomás, ocupa el segundo lugar en distribución geográfica con 7.11 Km<sup>2</sup> de superficie.

Tabla 2. 1 Distribución geográfica de los miembros geológicos en Santo Tomás. [COSUDE, 2003]

MIEMBRO GEOLÓGICO	AREA (%)
b1	21.56
b3	0.39
c1	50.42
s3	0.15
s4	27.47

De lo anterior se concluye que los principales tipos de rocas y suelos presentes en el municipio se encuentran: Aglomerados volcánicos; materiales piroclásticos; sedimentos

volcánicos-clásticos y corrientes de lava intercaladas. Además, es importante señalar que en la zona se desarrollen prácticas de conservación del suelo por medio de vegetación definida por una cubierta arbórea densa, ya que las formaciones Bálsamo y Cuscatlán son impermeables, pero capaces de almacenar agua durante el periodo húmedo y liberarla en la época seca, alimentado con ello ríos y acuíferos subterráneos.

## 2.5 Correlación Estratigráfica.

La estratigrafía de las áreas volcánicas es bastante compleja debido a la presencia de varios edificios volcánicos cuyos productos se traslapan, además, con características químicas similares o procesos eruptivos semejantes. La dificultad se incrementa cuando una misma unidad es llamada de manera diferente por los autores y para facilitar la comprensión de los términos empleados se ha elaborado la Tabla 2.2 que resume las distintas denominaciones que se le dan a los depósitos de la Fm. San Salvador y Cuscatlán.

Tabla 2. 2 Estratigrafía de las formaciones geológicas del área de estudio. [Walter Hernández, 2004]

ESTRATIGRAFIA			
Webber et al. (1978)	Hart (1981), Hart y McIntyre (1983), Vallance y Houghton (2003)	Consortio Salvador (1988) Geotérmica Italiana (1992)	
<b>FORMACIÓN SAN SALVADOR</b>	<b>FORMACIÓN SAN SALVADOR</b>	<b>FORMACIÓN SAN SALVADOR</b>	
<b>Q1</b> Aluviones	Aluviones	<b>Q</b>	Aluviones
<b>s4</b> Tierra Blanca	<b>TBJ</b> Tierra Blanca Joven (V. Ilopango)	<b>TBJ</b>	Tierra Blanca Joven
<b>s3a</b> Tierra Blanca	<b>TB2</b> Pómez de caída (V. Ilopango) <b>TB3</b> Pómez de caída (V. Ilopango) <b>G1</b> Pómez de caída gris (V.S.S.) <b>TB4</b> Pómez de caída (V. Ilopango)	<b>TB2</b> <b>TB3</b> <b>G1</b> <b>Ts</b> <b>TB4</b>	Tobas superiores
<b>s3b</b> Efusivas ácidas		<b>D</b>	Domos y flujos de lavas ácidas
<b>FORMACION CUSCATLAN</b>			<b>FORMACION CUSCATLAN</b>
<b>c1</b> Piroclastitas ácidas		<b>Ti</b>	Tobas inferiores
<b>c2</b> Efusivas ácidas		<b>Ma</b>	Domos ácidas
<b>c3</b> Efusivas básicas		<b>Mb</b>	Lavas básicas

Walter Hernández, 2004

### **2.5.1 Descripción de las Formaciones Geológicas en el área del proyecto.**

Las formaciones geológicas presentes en el área de estudio se describirán de la más antigua a la más reciente:

- **Formación Cuscatlán.**

La formación Cuscatlán del Plioceno-Pleistoceno Medio, comprende las unidades piroclásticas más antiguas de la caldera de Ilopango, compuestas por múltiples ignimbritas masivas, compactas, color rosado, beige y blanco y depósitos de caída actualmente compactos. Esta secuencia de composición ácida pertenece a las Tobas Inferiores (Ti). Los domos ácidos (Ma) y lavas básicas (Mb) están ausentes en las áreas del proyecto. (Ver mapa geológico en el Anexo C).

▫ Tobas Inferiores (Ti) o piroclastitas ácidas (c1). Las Tobas Inferiores están compuestas por varias ignimbritas y tobas de caída que afloran ampliamente alrededor de la caldera de Ilopango. Al sur, las ignimbritas forman estrechas mesetas separadas por cañones formados por efectos erosivos y se extienden al oriente hasta la ciudad de Cojutepeque. Al oeste contornan las laderas septentrionales del Volcán de San Salvador hasta alcanzar Quezaltepeque, pero sus depósitos están cubiertos por los depósitos de Tierra Blanca Joven (TBJ). Las Tobas Inferiores corresponden al Miembro c1 de la Formación Cuscatlán y en los actuales cortes del talud se observan depósitos de caídas e ignimbritas separados por paleosuelos bien desarrollados.

- **Formación San Salvador.**

Esta formación está constituida por los productos efusivos y explosivos del volcán San Salvador y por la Caldera de Ilopango, ocurridos desde el Pleistoceno Superior hasta el Holoceno. La última erupción efusiva del Ilopango corresponde al emplazamiento de lavas de composición riolítica que dio origen a las islas Quemadas en 1880 [Goodyear, W., 1880].

§ Tobas Superiores (Ts). [Consortio Salvador, 1988] se refirió a los piroclastos ácidos compuestos por tres depósitos de pómez de caída, como Tobas Superiores (Ts), los cuales corresponden a la Unidad s3 de la Tierra Blanca. Estos depósitos de pómez representan tres épocas eruptivas (TB4, TB3 y TB2) separados en el tiempo por inactividades, en los que se formaron paleosuelos en cada uno de estos depósitos. La capa de pómez TB4, es la más antigua y la de mayor volumen y es también la que tiene la mayor cobertura espacial. Entre el TB4 y el TB3 yace un depósito de pómez gris de composición dacítica (G1) del volcán San Salvador [Rose et al, 1999], cuyo espesor se adelgaza y desaparece hacia Santo Tomás.

- a. Pómez TB4. Constituye el depósito más antiguo de este ciclo aún sin datar. Está constituido por una capa de pómez producto de una erupción pliniana de importante magnitud, ya que los espesores de este pómez de caída alcanzan hasta 5 m a 12 km al noroeste del Ilopango y 6.5 m en la colonia Brisas de Sur, Santo Tomás a 3 km al suroeste del borde del lago Ilopango. Este depósito se caracteriza por un lapilli de pómez con gradación normal y por tener mayor espesor que los otros depósitos. Es de color blanco en la base pero hacia el techo cambia gradualmente a amarillento hasta formar el paleosuelo café. La base de esta unidad la constituye un depósito de caída de 25 cm de espesor y el techo por otra ceniza fina de caída de casi el metro de espesor. La edad de este depósito es no menos que 40,000 años y su volumen es superior a 20 km<sup>3</sup>. (Ver mapa geológico en Anexo C).
  
- b. Pómez TB3 Consiste en una cinerita de granulometría fina con pómez blanco con presencia de lapilli acricionario que señalan fenómenos freatomagmáticos originados por la interacción entre un magma fragmentado y las aguas de un antiguo lago. También muestra depósitos de flujos piroclásticos con deformaciones cuya matriz fina engloba fragmentos de pómez. El techo de TB3 presenta un paleosuelo delgado de color café-amarillento. El volumen estimado de este depósito es de 1-5 km<sup>3</sup> y su edad es desconocida. El espesor de TB3 es de 4.60 m en la col. Brisas del Sur. (Ver mapa geológico en Anexo C).



§ Tierra Blanca Joven (TBJ). Los depósitos de caídas de cenizas inconsolidados y los flujos piroclásticos de composición riolítica, no soldados de la TBJ, son el producto de una erupción pliniana cuya datación más reciente de  $^{14}\text{C}$ , ha determinado que dicha erupción ocurrió 430 años D.C. [Dull, A. et al., 2001]. Estos depósitos constituyen el cierre del ciclo eruptivo de los depósitos de Tierra Blanca, que se inició con TB4 y finalizó con TBJ. Los depósitos piroclásticos de TBJ están constituidos fundamentalmente por fragmentos de vidrio volcánico que forman las cenizas de tamaño arena fina y limo (muy abundante), fragmentos de pómez y líticos (tamaño grava, arena y bloques), polvo volcánico (arcilla no plástica) y en menor cantidad cristales (tamaño arenas y limos). Esta unidad está compuesta por los depósitos de caída, oleadas piroclásticas y flujos piroclásticos de la última erupción explosiva de la caldera de Ilopango, que tienen amplia distribución en toda el área. El espesor TBJ es de 7m en el talud de la col. Brisas del Sur. (Ver mapa geológico en Anexo C).

§ Aluviones (Q). Los aluviones están formados principalmente por la acumulación de los sedimentos en el cauce de la quebrada El Cacao, que provienen de la erosión de las cenizas de TBJ. (Ver mapa geológico en Anexo C).

## **2.6 Estratigrafía de la TBJ**

La estratigrafía de los depósitos de TBJ fue inicialmente realizada por [Hart y Steen-McIntyre, 1983], dividiéndola en dos grandes unidades T1 y T2, las cuales eran separadas por la unidad “surge basal” que correspondía a la base de la Unidad T2. En 1998, Vallance y Houghton, hacen una revisión de campo de estas unidades y las subdividen en 6 unidades, de las cuales el “surge basal” corresponde a la “capa guía” (Unidad E). [Hernández, 2004] identificó las Ignimbritas Alfa, Beta y Gris, que se incluyen en el presente perfil estratigráfico. La secuencia completa de los depósitos de TBJ, es la que se muestra en la Figura 2.3 y la descripción de las unidades se presenta de la base hacia el techo:

Unidad A: es un depósito fino, granular y localmente disperso de color café. Está compuesto por pómez y abundantes líticos, ambos con tamaño arena hasta grava. El

espesor es muy delgado y a veces está ausente por erosión a partir del flujo piroclástico de la Unidad C y normalmente se encuentra cementado por óxidos de hierro. En un punto de muestreo tiene un espesor de 0.04 m, mientras que en el borde caldérico norte, alcanza hasta 0.37 m de espesor [Hart y Steen-McIntyre, 1983].

Unidad B: es un depósito de caída de pómez pliniano frecuentemente conteniendo dos partes discretas: cenizas gruesas basales y lapilli de caída en el techo. Las isopacas circulares para espesores inferiores a 1 cm, significan que fue erupcionado bajo condiciones de velocidad de viento escaso [Vallance y Houghton, 1998]. Este depósito de espesor centimétrico suele presentar un color amarillento por causa de la pigmentación y cementación de óxidos de hierro por contacto con el paleosuelo subyacente, a veces esta unidad está ausente debido a la erosión producida por la ignimbrita (Unidad C) y cuando está presente sirve de guía importante para identificar la base de la TBJ (Figura 2.3).

Unidad C: es un depósito compuesto por dos flujos piroclásticos; el basal de color gris (Ignimbrita Gris), rico en líticos andesíticos, masivo, de poco desplazamiento, con espesor de casi 10 m y de cohesión similar al sobreyacente. Este último de amplio desplazamiento es el más importante, de color amarillento (Ignimbrita Amarilla), rico en líticos hidrotermalizados y es el que más frecuente se encuentra en la secuencia. Presenta una ligera estratificación evidenciada por los fragmentos de pómez. En las depresiones muestra las mayores acumulaciones, alcanzando espesores en estos sitios de hasta 9 m.

Unidad D: es un depósito que se caracteriza por ser rico en cenizas de granos finos, presenta marcas de ondas gigantes de oleadas piroclásticas densas, estas estructuras y los depósitos de caída finos de la coignimbrita, le dan un aspecto estratificado. Este depósito en las facies intermedia y distal es bastante inconsolidado con ligeras variaciones entre un horizonte y otro. El techo está compuesto por cenizas con abundante lapilli acrecional. Es pobre en líticos. El máximo espesor medido es de 8.72 m y en la colonia Brisas del Sur constituye el techo de la secuencia.

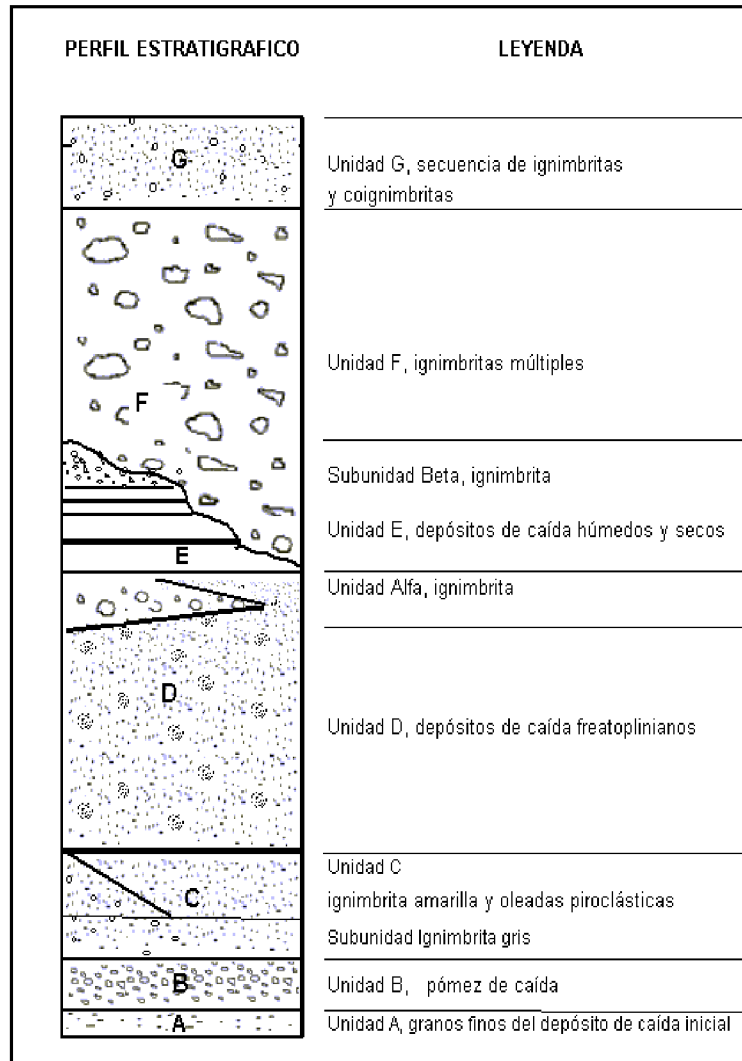


Figura 2. 3 Perfil estratigráfico de los depósitos de Tierra Blanca Joven. [Walter Hernández, 2004]

Unidad E: Está constituida por productos freatomagmáticos caracterizados por depósitos de caída finamente bandeados: depósitos secos y húmedos alternados. Los depósitos secos son color claro, están compuestos por cenizas gruesas con lapilli fino pumítico y líticos andesíticos (gravas y arenas), inconsolidados, bastante deleznable. Los depósitos húmedos están constituidos por cenizas muy finas, color café claro y café oscuro cuando están húmedos, se caracterizan por estar bastante consolidados y son ricos en fragmentos vítricos y en cristales [Hart y McIntire, 1983]. Estos depósitos están medianamente distribuidos pero a veces están ausentes debida a la erosión producida por la ignimbrita sobreyacente (Unidad F).

Unidad F: está compuesta por varios flujos piroclásticos masivos, no soldados, de color claro a beige claro. Presentan matriz de cenizas gruesas con abundantes fragmentos de pómez y líticos. Con frecuencia muestran evidencias de erosión y estructuras de carga que producen en la unidad subyacente. Esta unidad es la de mayor volumen y entre los flujos fue el que mayor desplazamiento alcanzó (35 Km).

Las unidades ignimbrita Alfa, ignimbrita Beta y G no están presentes en la col. Brisas de Sur ni en la quebrada El Cacao.

## **2.7 Tipos de erupciones**

### **2.7.1 Erupciones plinianas**

Son las erupciones más violentas liberando gran cantidad de energía en pocos segundos. Ocurren en general como respuesta a despresurización violenta de una cámara dacítica a riolítica o en magmas alcalinos muy evolucionados. Este tipo de erupciones se caracterizan por el desarrollo de una columna eruptiva vertical (Figura 2.4), que se forma a partir del conducto de emisión, la estabilidad y forma de la cual depende del tamaño de la boca eruptiva, de la relación de la descarga de la erupción (caudal), del volumen de gas implicado y de la diferencia de presión entre la columna y la atmósfera. Esta columna se compone de fragmentos sólidos y gas y puede superar los 30 km de altura (por encima de la boca eruptiva). Morfológicamente, esta columna se diferencia en 3 zonas: zona de chorro, zona de convección y zona de difusión horizontal.

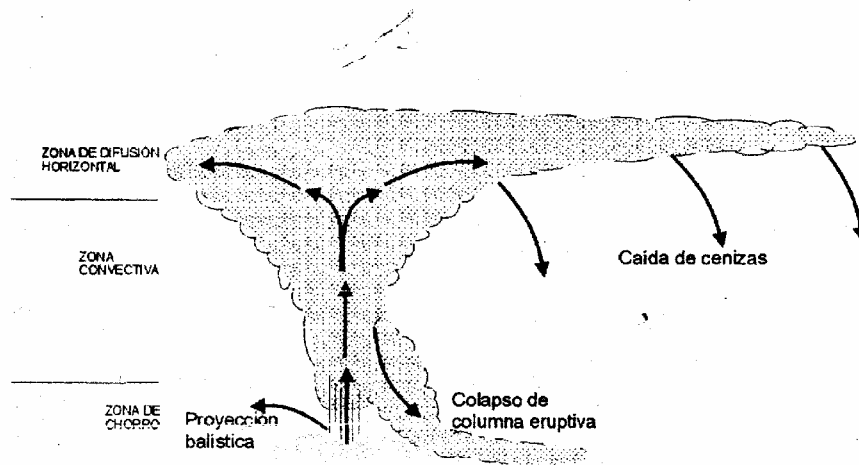


Figura 2. 4 Partes principales de una columna eruptiva. [Modificado de Sparks, 1986]

La zona de chorro se caracteriza porque la velocidad de los fragmentos supera la velocidad del sonido; los de mayor diámetro son eyectados balísticamente fuera de la columna en ascenso. Cuando la mezcla de sólidos (piroclastos) y gas entran en régimen convectivo disipando su temperatura a la atmósfera, se define la zona de convección; el aire atrapado durante la erupción, se calienta y aumenta de volumen disminuyendo paulatinamente la densidad del conjunto piroclasto/gas. La zona de difusión horizontal se define a partir del techo de la zona anterior donde las temperaturas y densidades de la columna y de la atmósfera tienden a igualarse. Los piroclastos que han alcanzado a ascender hasta aquí son dominados y dispersados por la acción del viento. Si la columna eruptiva alcanza una altura considerable, los piroclastos en suspensión pueden ser dispersados a escala continental. Por otra parte, si alguno de los factores que controlan la estabilidad de la columna disminuye aunque sea momentáneamente, la columna colapsa sobre si misma dando lugar a la formación de flujos piroclásticos.

### 2.7.2 Erupciones vulcanianas

Este tipo de erupciones es más frecuente a partir de la erupción de magmas andesíticos a dacíticos. Generalmente las erupciones vulcanianas evolucionan a erupciones plinianas si se dan las condiciones necesarias. A diferencia de estas últimas, la mayor cantidad de

fragmentos no corresponde a piroclastos sino a roca de caja fragmentada por la explosión inicial. Si el magma alcanza la presión magmática necesaria para romper la roca de caja lo hará violentamente, rompiendo el tapón que lo contenía. Generalmente, las columnas eruptivas vulcanianas son de baja altura, dada la alta densidad que le infieren la cantidad de fragmentos en suspensión.

### **2.7.3 Erupciones estrombolianas.**

Al igual que las erupciones vulcanianas, están representadas por explosiones separadas por cortos períodos de tiempo (segundos a horas), pero dado que son características de los magmas basálticos (menos viscosos y ricos en volátiles que los magmas ácidos) la energía liberada es mucho menor y las erupciones son más calmas. Al aproximarse a la superficie del magma una o más burbujas de gas, se libera de la tensión superficial que contiene su periferia envuelta en líquido, eyectando porciones de ese magma hacia los bordes de la columna eruptiva y/o la ladera del volcán a manera de bombas, lapilli escoriáceo y ceniza de muy baja dispersión. No obstante se han referido a columnas eruptivas estrombolianas de centenares a miles de metros, las cuales en realidad son límites con erupciones plinianas.

### **2.7.4 Explosiones freáticas y freatomagmáticas**

Cualquier tipo de magma, al interactuar con agua produce la denominada actividad hidrovulcánica o hidromagmática y una serie de productos eruptivos. El agua puede provenir del mar, de acuíferos, de ríos, de sistemas hidrotermales, de campos geotérmicos, nieve, glaciares o suelos congelados. Si la combinación se produce aún dentro del conducto y la cantidad de agua disponible es suficiente y ocurre por encima del nivel de fragmentación, la energía liberada es máxima y la erupción de las más violentas conocidas. La fragmentación ocurre como combinación del enfriamiento relativo del magma.

## 2.8 Erupciones explosivas y depósitos piroclásticos

### 2.8.1 Terminología descriptiva

El término “piroclástico” alude al origen de los fragmentos a partir de una erupción volcánica explosiva, mientras que el término “autoclástico” se refiere a la fragmentación no- explosiva común en lavas o cuerpos subvolcánicos. Los procesos “epiclásticos” se refieren a todo proceso de removilización o retrabajo del depósito original (piroclástico o autoclástico) por agentes superficiales.

Existe una nomenclatura para los fragmentos que componen un depósito piroclástico de acuerdo a su origen, según [Universidad Nacional de Salta, 2003]:

- Esencial (o juveniles): están derivados directamente del magma al eructar y consiste en partículas densas o expandidas de líquido enfriado y/o cristales representando las muestras de un magma eructando.
- Las pómez o fragmentos pumíceos son los productos vesiculados más comunes en erupciones explosivas a partir de magmas ácidos a intermedios en composición. Las pómez en general tienen densidades menores que  $1 \text{ gr/cm}^3$  y flotan en el agua.
- El término fragmento vítreo (“glass shard”) se refiere a un fragmento vítreo producido en las paredes de burbujas de pómez, que pueden quedar aislados al destruir el fragmento pumíceo, durante o después de la erupción.
- Fragmentos líticos hacen referencia a los fragmentos “densos” dentro del material piroclástico. Los líticos en general son angulares, pero pueden ser redondeados por abrasión en el conducto, durante la erupción.

- La ceniza volcánica (volcanic ash) se refiere a toda partícula de menos de 4 mm, de diámetro y compuesta por material vítreo, cristalino o lítico (juvenil, cognato o accesorio) en cualquier proporción.
- Tefra, es el nombre genérico para incluir depósitos inconsolidados de materiales piroclásticos.
- Toba es el agregado consolidado compuesto por material piroclástico.
- El lapilli se refiere a todo fragmento volcánico entre 2 mm y 64 mm de diámetro. Las partículas tamaño lapilli pueden ser juveniles, cognatos o accidentales. Si el depósito está compuesto por más del 75 % de lapilli, se denomina lapillita. El término lapilli acrecional o lapillo chalazolítico se refiere a caso especial de partículas tamaño lapilli formado por un agregado concéntrico de capas de ceniza volcánica. Su origen es a partir de gotas de agua cayendo a través de una nube o columna eruptiva, o bien por atracción electrostática. Una variedad de estos últimos son los lapillis acorazados. Este término se utiliza para designar partículas de tamaños lapilli que se forman cuando la ceniza caliente envuelve plásticamente algún fragmento compuesto por cristales, líticos o pómez durante una erupción hidrovulcánica.
- El término brecha piroclástica, se refiere a un agregado consolidado de bloques conteniendo menos del 25 % de fragmentos tamaño ceniza o lapilli.
- Brecha volcánica se aplica a todas las rocas volcanoclásticas compuestas predominantemente por partículas volcánicas más grandes que 2 mm.
- Bomba se refiere a aquellos fragmentos exclusivamente juveniles, que han sido arrojados desde la boca eruptiva en condiciones parcialmente fundidas, y las cuales han sido parcialmente solidificadas durante el vuelo.



- Ignimbrita son todas las rocas formadas a partir de un material caliente finamente fragmentado que se desplaza lateralmente a la superficie. Los depósitos ignimbriticos corresponden al colapso gravitatorio continuo de una columna eruptiva pliniana.

### 2.8.2 Tipos de depósitos piroclásticos (subácueos y subaéreos)

Los depósitos piroclásticos se forman directamente por fragmentación del magma y rocas por actividad volcánica explosiva. Se los puede agrupar en tres tipos de acuerdo a su modo de transporte y deposición (Figura 2.5):

- Depósitos piroclásticos de caída o de proyección aérea.
- Depósitos de flujos diluidos, oleadas piroclásticas.
- Depósitos de flujos piroclásticos

Los depósitos de caída reflejan un espesor constante respetando las formas previas. Los flujos piroclásticos colmatan los valles y peneplanizan la vieja topografía. Los flujos piroclásticos diluidos o surges, tienden a colmatar los valles y a superar contra pendiente.

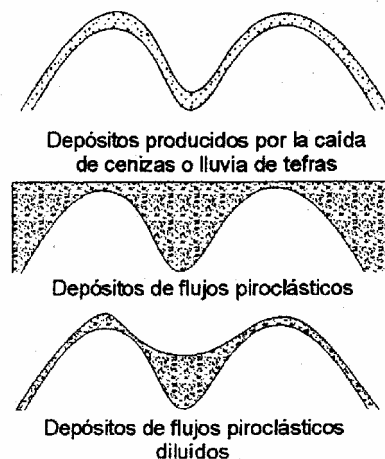


Figura 2.5 Esquemas de geometría de relleno de la topografía de los distintos depósitos piroclásticos. [modificado de Wright, et al., 1980]

## 2.9 Formaciones geológicas en la quebrada El Cacao y col. Brisas del Sur.

En la quebrada El Cacao se comprobó la existencia de Tierra Blanca Joven (TBJ), en la cual se identificaron las unidades A a la F. Además fueron encontradas las unidades TB3 y TB4 pertenecientes a la Formación San Salvador (ver Figura 2.6). También se encontraba presente la Formación Cuscatlán. Para mayor información ver el Anexo C en el que se muestra el mapa geológico correspondiente a la quebrada El Cacao.



Figura 2. 6 Tierra Blanca Joven en la quebrada El Cacao.

En el talud de la colonia Brisas del Sur, se verificó que además de la existencia de Tierra Blanca Joven (TBJ), TB3 y TB4, pertenecientes a la Formación San Salvador también aflora la Formación Cuscatlán (ver Figuras 2.7 a 2.9). En la parte superior de TBJ se identificaron las unidades A a la D. Para una mejor ilustración de cómo están distribuidas dichas formaciones en el talud remitirse al Anexo C en el que se muestra su mapa geológico correspondiente.



Figura 2. 7 Tierra Blanca Joven en el talud Brisas del Sur.



Figura 2. 8 TBJ, TB3 y TB4 (Fm. San Salvador).





Figura 2. 9 Unidad TB4 (Fm. San Salvador) y Fm. Cuscatlán.

Para la realización de los mapas geológicos en la col. Brisas del Sur y en la quebrada, fue necesario el uso de instrumentos especializados, los cuales fueron facilitados por el SNET, entre éstos se encuentran inclinómetro y brújula que sirvieron para las medidas de espesores de cada depósito piroclástico y la sonda eléctrica para medida de la profundidad del nivel del agua subsuperficial. Ver Figuras 2.10 a 2.11.



Figura 2. 10 Uso del inclinómetro para la medición indirecta de espesores.



Figura 2. 11 Sonda eléctrica para la medición de la profundidad del nivel del agua subsuperficial.



Para la medición de los espesores en las unidades del talud fue necesario remover previamente la vegetación y la capa superficial del talud, para observar los contactos entre cada capa definidos por la presencia de paleosuelos. Para lo cual se contó con el uso de equipo de seguridad como arnés y lazos de resistencia adecuada, ya que en algunos sitios las alturas son hasta de 21 metros. Este equipo fue proporcionado por la UCA. Ver Figura 2.12.



Figura 2. 12 Maniobras efectuadas para la medición de espesores en las unidades.



### **3 CONCEPTOS DE MECÁNICA DE SUELOS**

#### **3.1 Suelo**

Un suelo es un material constituido esencialmente por granos sólidos que puede contener además, agua y aire.

#### **3.2 Compactación de suelos**

Es la acción de aplicar durante la construcción del relleno, la energía necesaria para producir una disminución apreciable del volumen de huecos del material empleado y por tanto del volumen total del mismo. Durante este proceso son mejoradas diferentes características del suelo, con un aumento simultáneo del valor de la densidad del mismo.

En general, durante la construcción de una estructura, el suelo natural es perturbado por operaciones de desmonte, excavación o aplanado. Durante el transcurso de estos trabajos el aire penetra dentro del suelo, aumentando el volumen del mismo con la consecuente reducción de la densidad. El suelo, en función de sub-base o relleno, no sólo deberá ser colocado en capas horizontales, sino que también deberá ser compactado (apisonado) mecánicamente. En general, tanto los suelos finos como también los suelos de partículas de mayor tamaño, alcanzan una mayor densidad seca a la que tenía su estado natural.

Gracias a este proceso de compactación, es decir, al mayor grado de densidad se dan las siguientes ventajas: mayor capacidad de carga, mayor estabilidad que evita los asentamientos de suelo, disminución de la contracción del suelo, disminución de la permeabilidad, disminución del asentamiento.



### 3.3 Cálculo de volumen de material

La capacidad volumétrica se puede determinar por medio del método del volumen a partir de las áreas extremas, éste consiste en que a partir de la nivelación por franjas de un terreno, puede calcularse el volumen entre dos secciones transversales consecutivas, multiplicando el promedio de las áreas de las secciones por la distancia que las separa:

$$V = \frac{(A1 + A2) * d}{2} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

A1 y A2 : Áreas de las secciones transversales (m<sup>2</sup>)

d : Distancia entre las secciones A1 y A2 (m).

Los volúmenes de terraplén se incrementan por el factor de variabilidad volumétrica.

### 3.4 Coeficiente de variabilidad volumétrica

El volumen de cierto material excavado no es suficiente para lograr un volumen igual de relleno, requiriéndose de mayor cantidad de material.

La definición del coeficiente de variabilidad volumétrica es: “es la relación entre el peso volumétrico de un material en estado natural y el peso volumétrico que ese mismo material tiene al formar parte del terraplén.

### 3.5 Consolidación

Es la disminución del volumen de huecos entre las partículas conseguida en el transcurso de un plazo relativamente largo y debido a pérdida de agua intersticial, por efecto de cargas de servicio móviles o fijas, por agentes atmosféricos, etc.

### **3.6 Cohesión en TBJ.**

Del análisis de las partículas de la distribución granulométricas, se dice que los productos piroclásticos de TBJ son no cohesivos y en este caso,  $c=0$ , ya que están compuestos predominantemente por limos arenosos (MS), arenas limosas (SM) y limos (ML). Estos suelos no poseen plasticidad, no tienen finos plásticos y por tanto la cohesión es nula. Esa aseveración es correcta cuando se refiere a depósitos sedimentarios con esas características granulométricas, pero cuando se trata de suelos volcánicos, hay otros elementos que influyen para que las partículas de los suelos se mantengan unidas.

Después del estudio de varias unidades de la TBJ, se ha encontrado que existen ciertas propiedades como la microfábrica, la succión y la cementación que están operando de manera conjunta en suelos volcánicos. Cada una de esas propiedades individualmente tiene su propia influencia en esos depósitos, dependiendo del proceso eruptivo involucrado, es decir, en un tipo de suelo opera mejor una propiedad que otra.

#### **a) Microfábrica**

Las partículas de TBJ constituidas principalmente por vidrio volcánico, poseen formas muy particulares llamadas trizas o esquirlas vítreas (glass shard), cuyas formas son angulares, alargadas, muy irregulares y arqueadas (Véase figura 3.1A), las formas geométricas provienen únicamente de los cristales que son escasos. Estas partículas cuando se entremezclan con fragmentos de variados tamaños pómez vesicular (Figura 3.1B), cenizas tamaño arena, limo y arcilla y hasta partículas coloidales de sílice, todas se entrelazan y se amarran entre sí manteniéndose unidas, constituyendo lo que se denomina microfábrica. Esa variedad de formas y tamaños de partículas vítreas hacen del conjunto algo complejo y es una característica muy importante, sobretodo, en los suelos que componen las ignimbritas de la TBJ [Hernández, 2004].

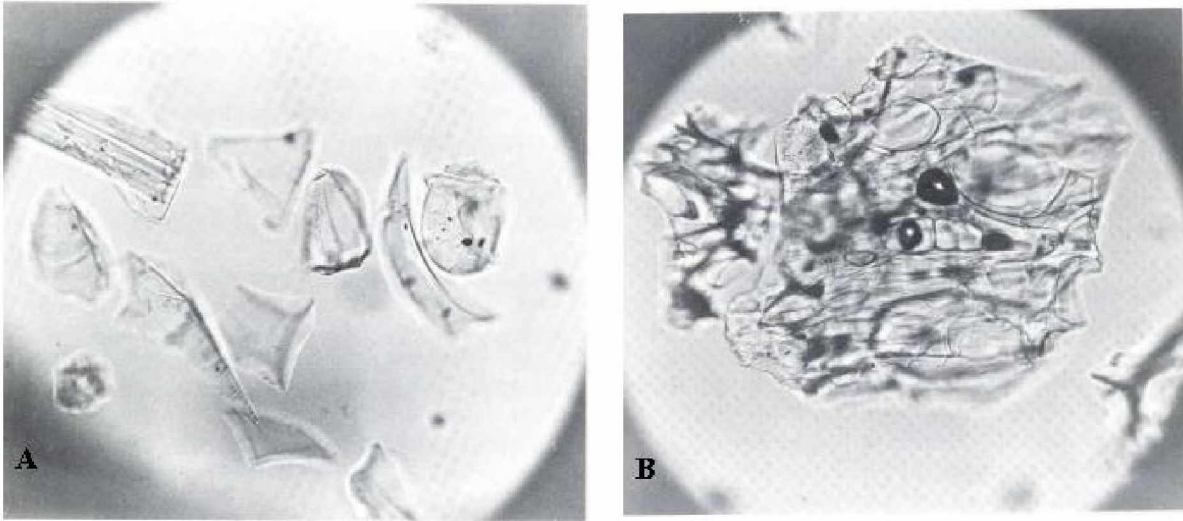


Figura 3. 1 . Fragmentos piroclásticos de vidrio volcánico, tamaño arena fina, colocados en base de aceite y vistas a través del microscopio. A) Trizas de vidrio alargadas, curvadas y plaquitas con puntas. B) Fragmento de pómez vesicular. [Hart, W. y Steen-McInty,1983]

### **b) Succión**

La microfábrica produce cierta cohesión la que es aún mejorada por la humedad natural en los tipos de suelos parcialmente saturados. [Bommer et al. 1998] y [Rolo et al. 2003], estudiaron las propiedades mecánicas, la succión y han llevado a cabo mediciones para conocer la fuerza que opera en la succión, en las unidades superiores de la TBJ. El agua se encuentra formando meniscos entre los fragmentos piroclásticos produciendo fuerzas capilares que mantienen unidas las partículas tan finas como los limos, arcillas y gruesas como las gravas y bloques de pómez.

La succión es una fuerza activa que participa en el mantenimiento de los taludes verticales estables, mientras no lleguen al punto de saturación, de lo contrario, la succión desaparece por pérdida de los meniscos, los taludes entran en inestabilidad y el derrumbe puede ocurrir por el aumento de peso por el agua. Este mismo comportamiento se esperaría en el caso de la pérdida de agua por desecación, por pérdida de los meniscos [Bommer, et al. 1998].

### c) Cementación

Durante la fase eruptiva el volátil  $\text{SO}_2$  en la zona de difusión reacciona con OH catalizado por la energía solar, para dar lugar al ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Otro gas importante es el ácido clorídrico (HCl) que reacciona con  $\text{H}_2\text{O}$  para formar un ácido diluido. Ambos ácidos entran en contacto con los depósitos piroclásticos, a los cuales atacan e intercambian iones principalmente con los minerales (piroxenos, anfíboles, plagioclasas y magnetita). De ese intercambio iónico surgen los primeros compuestos que posteriormente precipitan formando minerales sulfatados que cristalizan entre los poros de los suelos volcánicos, produciendo cementación de los mismos. Los ácidos también reaccionan con las partículas de vidrio volcánico más finas como las arcillas y los coloides, para formar minerales silicatados, que también producen sellado de los poros donde estos se forman, dando más firmeza a los suelos al mejorar sus propiedades físicas y mecánicas [Hernández, 2004]. La TBJ en la quebrada El Cacao y en la col. Brisas del Sur no presentan cementación.

Los minerales se encuentran en los intersticios de las partículas de los depósitos. El mecanismo de formación de esa mineralización, ocurre cuando al calentarse por acción solar la porción más externa de la superficie del talud, el agua intersticial se evapora y dicho vapor en el trayecto hacia la cara del talud arrastra consigo iones, cationes desde los depósitos piroclásticos. Los cristales gradualmente se van formando conforme van recibiendo sus componentes químicos depositados como precipitados y las reacciones químicas para la formación de los cristales tienen lugar a la temperatura ambiente y presión atmosférica. Por eso, esa mineralización es estable en esas condiciones y forma costras de algunos milímetros de espesor.

Como resultado de la cementación parcial, se observan dos tipos de cambios en las unidades: cambios físicos y cambios mineralógicos. Los cambios físicos conllevan a cambios en la porosidad, relación de vacíos y densidad de las rocas, debido a la cristalización de los minerales que reducen la porosidad y a su vez aumentan la densidad del suelo, consecuentemente, aumentan tanto la dureza de los suelos que los contienen como la estabilidad de los taludes al aumentar la cohesión. Los cambios mineralógicos

ocurren por la interacción de minerales primarios con el agua rica en soluciones sulfatadas y silicatadas, donde ocurre el intercambio de iones y cationes. Esta cementación en general es mayor en dirección al borde de la caldera y disminuye en la medida que se aleja de este. [Hernández, 2004].

El análisis de Difracción de Rayos X, sirve para la determinación de la composición mineralógica, cuyas composiciones derivan del tipo de cementante dentro de la formación. En el Anexo A se presentan los tipos de minerales secundarios obtenidos en dos muestras de TB3, sus composiciones químicas y los porcentajes correspondientes.

### **3.7 Exfoliación.**

La naturaleza isótropa de los depósitos de flujos piroclásticos permite que el intemperismo físico opere en estos materiales cuando en taludes incide la acción solar, produciendo contracciones y expansiones diariamente, que llegan a generar discontinuidades paralelas a la cara del talud. Con el establecimiento de las discontinuidades esos materiales se vuelven inestables y varios procesos operan a la vez en ellos para desestabilizarlos [Hernández, 2004], las que se describen a continuación:

- Cambios diarios de temperatura: En El Salvador los cambios de temperatura que experimenta el ciclo diurno, causan efectos térmicos en los depósitos de flujos piroclásticos expuestos a la actividad solar, calentándolos en grados diferentes, dependiendo de la intensidad de la radiación solar, cuya actividad se puede medir por la temperatura ambiente. Estos cambios de temperatura tienen un efecto de contracción y expansión en la cara del talud y en su cabecera llegan a producir un debilitamiento de la sección más externa del talud, de la que derivan la formación de fisuras y grietas. Los cambios bruscos de temperatura también se suman a este proceso de generación de discontinuidades, que ocurren cuando el suelo caliente es enfriado súbitamente por las lluvias repentinas diurnas.

- **Lluvias:** El agua dentro de las grietas produce un aumento de la presión de poro. A su vez, el agua produce erosión diferencial por impacto de las gotas de lluvias y el lavado de las aristas de las grietas por parte de las corrientes de agua, produciendo ensanchamientos de las grietas. Este proceso repetitivo a lo largo de varios años contribuye para que la grieta se abra, facilitando la circulación del agua, la penetración y desarrollo de raíces. En estas condiciones y ante la presencia de una lluvia torrencial, la sección formada por la discontinuidad se cae al aumentar el esfuerzo cortante por el aumento de peso del agua intersticial, venciendo así las fuerzas resistentes. Los derrumbes de los taludes ocurren más frecuentemente en los meses de agosto y septiembre, que es cuando ya hay una significativa acumulación de agua en el suelo
- **Actividad vegetal:** Las raíces se desarrollan más fácilmente penetrando a lo largo de las fisuras y grietas de los taludes. Cuando las raíces se tornan más gruesas producen una presión lateral en el interior de esas discontinuidades, siendo la porción más débil y más externa del talud la que separa de la porción más fija, permitiendo que la discontinuidad quede más abierta y facilitando la infiltración del agua meteórica.
- **Actividad sísmica:** Las ondas generadas por los sismos al propagarse desde sus fuentes generadoras pueden ser amplificadas o atenuadas, lo cual dependerá de las características de los materiales que se encuentren en su trayectoria de propagación. 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; teniéndose como resultado vibraciones del suelo más fuertes, lo que eventualmente llega a acentuar la abertura de las discontinuidades. Cuando un sismo es muy fuerte puede producir desprendimientos de la porción más externa de la cara del talud y una cara nueva aparecerá para repetir este proceso.

### **3.8 Modelo conceptual de agua Sub-superficial.**

En el proceso de estabilización de taludes, es importante definir el movimiento de las aguas subterráneas ya que el contenido de agua influye en todas las propiedades geomecánicas de los diferentes tipos de suelos que se están analizando.

Cuando se realiza el análisis de estabilidad de taludes por medio de esfuerzos efectivos, se requerirá conocer con bastante certeza los niveles freáticos ya que de este dependerá el planteamiento de las presiones de poro.

En el talud de la Colonia Brisas del Sur, se pueden observar varios afloramientos de agua que tienen actividad tanto en invierno como en la época de estiaje. Los principales se definen a continuación:

- El primero se encuentra ubicado entre la calle que conduce hacia el cantón El Porvenir y la calle Laura.
- El segundo aflora sobre la calle Las Mercedes.
- El tercero se ubica sobre la intersección de la calle Las Mercedes y la calle que conduce hacia el cantón El Porvenir.

Los nacimientos se presentan cuando el agua que se infiltra en el suelo llega a un estrato impermeable y conducida por la gravedad aflora en el nivel más bajo. Los estratos impermeables corresponden a los paleosuelos de TB3 y TB4.

El hecho de que nazca agua en verano en algunos afloramientos depende del área de recogimiento que presente. En la Figura 3.2 se muestra que el paleosuelo de TB3 presenta un parteaguas subterráneo en la parte más al norte del talud. Debido a que el primer afloramiento presenta un área de recogimiento mayor que los demás, éste tiene un caudal variable pero siempre activo durante todo el año. El segundo y tercer nacimiento funcionan únicamente en invierno debido a que su área de recogimiento es muy pequeña.

En la Figura 3.2 se muestra la vista en planta del modelo conceptual de flujo de agua subsuperficial. En la Figura 3.3 se muestra un corte transversal que abarca los puntos en los cuales se hicieron los ensayos de penetración estándar y el modelo conceptual del flujo de aguas subterráneas. En dicha figura se observa que cerca de los 25 m del corte, se ubica el parteaguas subterráneo generado por el estrato impermeable del paleosuelo de TB3. También se observa que cercano al segundo punto de penetración, los estratos tienden a adelgazarse debido a procesos de erosión en TB4, TB3 y TBJ. En dicho punto se midió el nivel freático a 3.7 m con una sonda eléctrica proporcionada por el SNET. En dicho ensayo se confirma que cuando los espesores de las formaciones geológicas TBJ y TB3 son delgados, existirá infiltración hasta el paleosuelo de TB4. Cercano a los 130 m del corte se ubica el nacimiento de agua de la calle Laura y calle hacia el cantón El Porvenir.



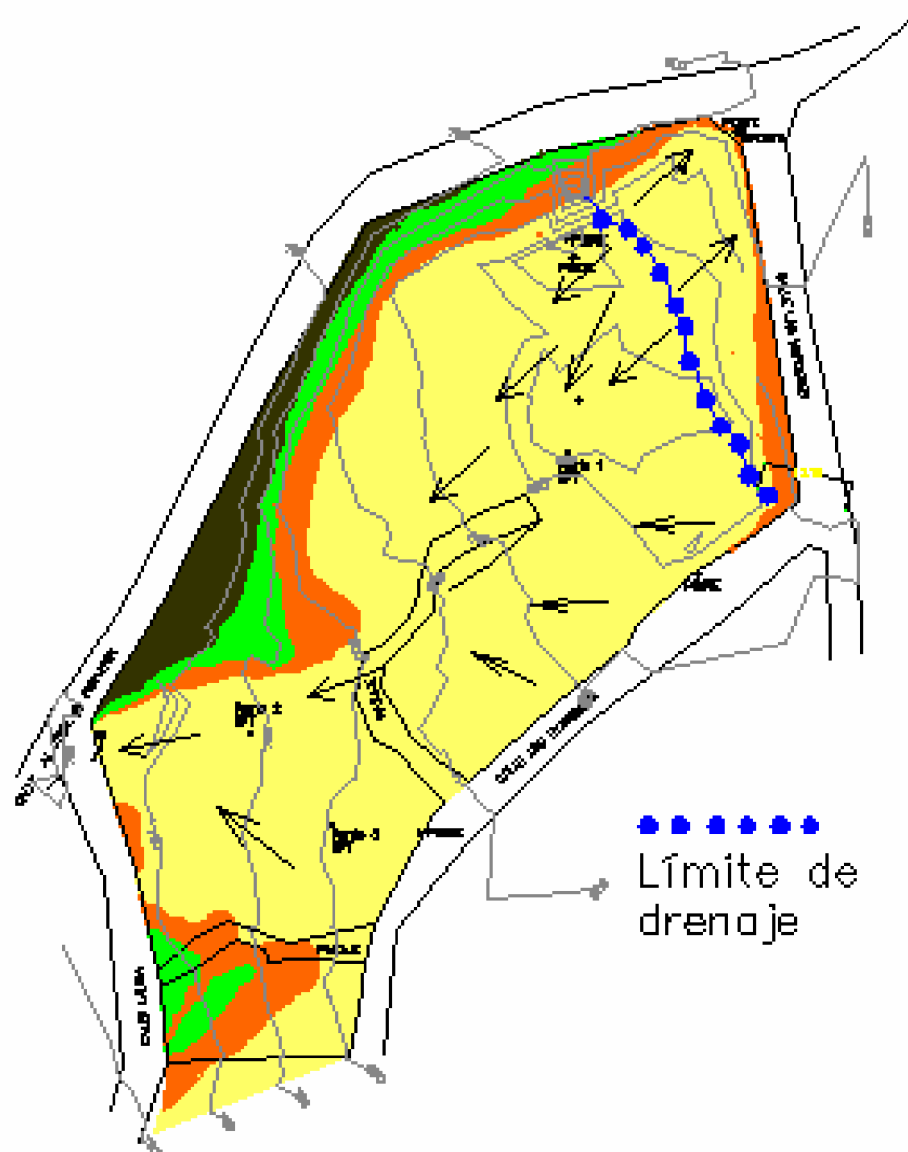


Figura 3. 2 Vista en planta del modelo conceptual de flujo de agua subsuperficial.

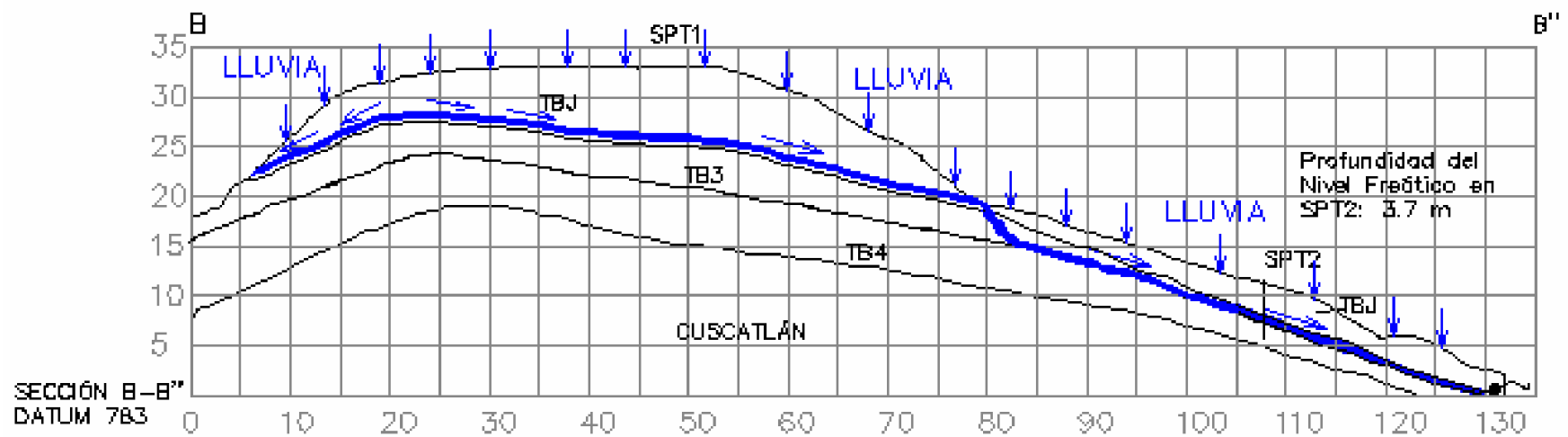


Figura 3. 3 Perfil del modelo conceptual de flujo de aguas subsuperficiales controladas por el paleosuelo de TB3.



## **4 PRUEBAS DE LABORATORIO.**

Se realizaron las siguientes pruebas de laboratorio para cada proyecto:

Talud de la colonia Brisas del Sur:

- Extracción de unidades inalteradas.
- Clasificación visual-manual.
- Contenidos de humedad.
- Granulometría: método de las mallas y método del hidrómetro.
- Límites de consistencia de Atterberg.
- Clasificación SUCS
- Gravedad específica.
- Ensayo triaxial no consolidado no drenado.
- SPT.
- Difracción de Rayos X.

Relleno de la quebrada El Cacao:

- SPT.
- Clasificación visual-manual.
- Contenidos de humedad.

### **4.1 Extracción de unidades inalteradas.**

Es un proceso laborioso que se desarrolló de la siguiente manera:

- Recorrido por diversos taludes para reconocimiento

Se realizó una exploración de los taludes hechos en los cortes de carreteras en Apopa, Comalapa, también en la zona cercana al colegio Externado San José, Santiago

Texacuangos y por supuesto Santo Tomás con el geólogo Walter Hernández para conocer y estar familiarizados con las diferentes unidades geológicas.

- Raspado y limpieza de taludes

Debido a la basura y vegetación en los taludes es difícil identificar las diferentes unidades geológicas por lo que se debieron limpiar previamente para observación de los contactos litológicos, texturas, estructuras y determinar las propiedades físicas como: color, dureza y espesor.

- Identificación de unidades

Se realizó la identificación de unidades en el talud y la quebrada como ha sido explicado en el capítulo de aspectos geológicos.

- Selección para hacer las extracciones

La selección se fundamentó principalmente en que la muestra presentara una granulometría apta para ser analizada por medio de una prueba triaxial o caja de corte, que cumpliera con las dimensiones previamente establecidas para la extracción de una muestra inalterada, que no existieran raíces que dificultaran la elaboración de las probetas y una buena accesibilidad al lugar.

- Extracciones

Se ejecutó la extracción de 7 muestras de suelo inalteradas, correspondientes a las siguientes unidades:

- a. Formación San Salvador: 2 extracciones de TBJ (Unidad C), 2 extracciones de TB3 y 1 extracción de TB4.

b. Formación Cuscatlán:2 extracciones.

El período del muestreo se realizó en los meses de Mayo y Junio, coincidiendo con el inicio de la estación lluviosa en el país. Las muestras obtenidas tenían la forma de cubos de 20 cm por lado en promedio y fueron extraídos del talud a partir de una profundidad horizontal aproximada de 10 cm. Ver Figura 4.1.



Figura 4. 1 Extracción de muestra inalterada en el talud de la col. Brisas del Sur.

- Preparación de las muestras

Las muestras una vez extraídas se marcaron para identificar la posición vertical natural de las mismas, se cubrieron con una manta impregnada de parafina para evitar la pérdida de humedad y se colocaron en recipientes con zacate y esponja en el fondo para amortiguar los golpes por saltos durante el transporte y evitar daños en las mismas.

- Transporte de las muestras

Las muestras fueron cuidadosamente transportadas al laboratorio de mecánica suelos de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, para la determinación de sus propiedades, las cuales son apegadas a las normas de la ASTM (American Society for Testing and Materials).

Los análisis de Difracción de Rayos X (DRX) para la determinación de la presencia de arcillas y cementantes en la unidad TB3, se realizaron en el Laboratorio de Petrografía de la empresa LaGeo SA de CV. (Ver anexo A).

#### **4.2 Identificación del suelo y determinación del contenido de humedad. (ASTM D-2488-93).**

Para la identificación de un suelo, no se debe tomar la decisión basada en una sola prueba, sino que deben realizarse todos los ensayos necesarios y luego clasificar el suelo. Hay una serie de procedimientos que pueden ayudar a la identificación y clasificación de un suelo, estas son: la inspección visual, sacudimiento, resistencia en seco, plasticidad, color, olor, etc.

Estos procedimientos son descritos a continuación:

- c. La inspección visual se hace con materiales constituidos por partículas gruesas, se identifican en el campo sobre una base prácticamente visual. Se extiende la muestra en una bandeja y se observa el grado de angulosidad o redondez de las partículas, así como el tamaño de cada una de ellas. En el caso de las formaciones de TBJ, TB3, TB4 y Cuscatlán no se realizó esta parte del ensayo porque son predominantemente finos.
- d. El sacudimiento es hecho en suelos finos, el procedimiento ocasiona la reducción de la relación de vacíos del material al fluir el agua a la superficie. Se prepara una

pequeña porción de suelo húmedo y se agita horizontalmente sobre la palma de la mano, se repite el proceso para varias porciones con diferentes contenidos de humedad. Se observa si el agua sale a la superficie de la muestra, dándole una apariencia brillante, luego se pellizca la muestra hasta que pierda la humedad, esto se observa al cambiar la superficie brillante por una mate.

- e. La resistencia en seco de una muestra de suelos previamente secada, al romperse bajo presiones ejercidas por los dedos, es un índice de la adherencia de las partículas (cohesión).

El procedimiento se realiza con una porción de suelo húmedo, se le agrega agua al suelo, de modo que pueda moldearse una bolita de 3 ó 4 cm de diámetro. Una vez hecha la bolita, se coloca en una cápsula y se deja secar al aire. Luego que la muestra esté seca se trata de desmenuzar con los dedos.

- f. La plasticidad determina la capacidad que tiene un suelo para ser moldeado, con un adecuado contenido de humedad. El procedimiento consiste en preparar una porción húmeda de suelo, sin partículas gruesas. Luego se rola con la palma de la mano sobre un vidrio, hasta formar un cilindro de diámetro de 1/8 de pulgada. Se repite varias veces el procedimiento para la misma muestra de suelo.
- g. El color suele ser un dato útil para diferenciar los estratos e identificar el tipo de suelo. El olor es característico de los suelos orgánicos y es particularmente intenso si el suelo se encuentra húmedo.

La Tabla 4.1 es una guía para la clasificación del suelo en base a los parámetros obtenidos en los procedimientos anteriores.



Tabla 4. 1 Identificación de suelos inorgánicos de grano fino a partir de ensayos manuales.

Símbolo del suelo	Resistencia en seco	Dilatancia	Tenacidad
ML	Ninguna a Baja	Lenta a rápida	Baja o si el cilindro no puede formarse
CL	Media a alta	Ninguna a lenta	Media
MH	Baja a media	Ninguna a lenta	Baja a media
CH	Alta a muy alta	Ninguna	Alta

Al llevar a cabo la toma de muestras de un suelo, para su debida identificación, se tiene que tomar en cuenta que el suelo cuenta con una humedad natural, la cual varía de acuerdo a la profundidad. La determinación del contenido de humedad es un ensayo fácil de realizar y suele expresarse como porcentaje:

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

$W_w$ : Peso del agua en la masa de suelo, se obtiene restando al peso de la muestra húmeda, el peso seco (obtenido al secar la muestra en un horno).

$W_s$ : Peso del suelo seco.

#### **4.3 Método de ensayo estándar para el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de suelos. (ASTM D 4318).**

Un suelo de grano fino puede existir en diversos estados; el estado depende de la cantidad de agua en el sistema de suelo. Cuando se agrega agua a un suelo seco, cada partícula se cubre con una película de agua adsorbida. Si se continúa agregando agua, aumenta el espesor de la película de agua sobre cada partícula. El aumento en el espesor de las películas de agua permite que las partículas se deslicen unas con otras con mayor facilidad.

Por tanto, el comportamiento del suelo está relacionado con la cantidad de agua en el sistema. A. Atterberg definió las fronteras de cuatro estados en términos de “límites” de la siguiente manera:

- a. Límite líquido: la frontera entre los estados líquido y plástico;
- b. Límite plástico: la frontera entre los estados plástico y semi-sólido;
- c. Límite de contracción: la frontera entre los estados semi-sólido y sólido.

Posteriormente estos límites fueron definidos con mayor precisión por A. Casagrande como los contenidos de humedad que ocurren bajo las siguientes condiciones:

- a. Límite líquido: el contenido de humedad al cual el suelo tiene una resistencia al corte tan pequeña que fluye hasta cerrar una ranura de ancho estándar al golpear la muestra de una manera específica.
- b. Límite plástico: el contenido de humedad al cual el suelo comienza a desmenuzarse cuando se enrolla en cilindros de un tamaño especificado.
- c. Límite de contracción: el contenido de humedad que es justamente suficiente para llenar los poros cuando el suelo se encuentra en el mínimo volumen que alcanzará al secarse.

Para obtener el límite líquido, se deben colocar muestras de suelo a diferentes contenidos de humedad en la copa de Casagrande. Se hace una incisión al suelo con un dispositivo graduado. La copa se hace girar y se cuenta el número de golpes necesarios para cerrar la ranura. El límite líquido será el contenido de humedad en el cual la ranura se cierra cuando se hayan efectuado 25 golpes.

El límite plástico es el contenido de humedad en el cual un cilindro de suelo de 1/8 de pulgada de diámetro, se desmenuza en porciones entre 1/8 y 3/8 de pulgada de largo.

#### 4.4 Método de ensayo estándar para gravedad específica de suelos. (ASTM D 854-98).

La gravedad específica de los sólidos,  $G_s$ , es la relación entre la densidad o el peso específico de los sólidos de un suelo y la densidad o el peso específico del agua. La expresión correspondiente es:

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\rho_s g}{\rho_w g} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

$G_s$  : Gravedad específica.

$\rho_s$  : densidad de los sólidos de un suelo.

$\gamma_s$ : peso específico de los sólidos de un suelo.

$\rho_w$ : densidad del agua.

$\gamma_w$ : peso específico del agua.

$g$ : aceleración de la gravedad.

La gravedad específica es una cantidad adimensional, se usa en el cálculo de las relaciones de fase de suelos, esto es, los volúmenes relativos de los sólidos con respecto al agua y al aire en un determinado volumen de suelo.

El término partículas sólidas se entiende típicamente como las partículas minerales naturales que no son fácilmente solubles en agua. Por lo tanto, la gravedad específica de materiales que contienen materia extraña (como cemento, cal, y similares), materia soluble en agua (como cloruro de sodio), y suelos que contengan materia con gravedad específica menor a uno, típicamente requieren un tratamiento especial o una definición cualificada de su gravedad específica.

Este método de ensayo cubre la determinación por medio de un picnómetro de la gravedad específica de suelos que pasan la malla No. 4 (4.75 mm), cuando el suelo contiene

partículas mayores que la malla No. 4. El procedimiento para el cálculo de la gravedad específica es el siguiente:

- a. Se mide la masa de un picnómetro limpio y seco.
- b. Después, se mide la masa del picnómetro lleno con agua a 20 °C.
- c. Posteriormente, se vierte una muestra de suelo en el picnómetro y se mezcla con agua.
- d. Luego, se coloca el picnómetro en baño María y se agita hasta que queda completamente desaireado.
- e. Cuando se encuentre desaireado, se enfrían el picnómetro con la muestra hasta que alcancen 20 °C.
- f. Al alcanzar dicha temperatura, se pesa el contenido del picnómetro con su contenido.
- g. Para finalizar, se deja secar el suelo al horno y posteriormente se pesa.

La gravedad específica se obtiene con la siguiente fórmula:

$$G_s = \frac{M_o}{[M_o + (M_a - M_b)]} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

$G_s$  : Gravedad específica.

$M_o$  : Masa de la muestra de suelo secado al horno.

$M_a$  : Masa del picnómetro lleno con agua a 20 °C.

$M_b$  : Masa del picnómetro lleno con agua y suelo a 20 °C.

#### 4.5 Análisis granulométrico por el método del hidrómetro. (ASTM D 442-63).

El análisis granulométrico por sedimentación (método del hidrómetro), es utilizado para obtener un estimado de la distribución granulométrica de suelos cuyos tamaños de partículas se encuentran desde la malla No. 200 (0.075 mm) hasta alrededor de 1µm.

Los resultados se presentan en un gráfico semilogarítmico de porcentaje de material más fino contra el diámetro de los granos y puede combinarse con los datos obtenidos en el análisis mecánico del material retenido (análisis combinado), o sea mayor que el tamiz N° 200.

El método del hidrómetro se basa en el hecho de que la velocidad de sedimentación de partículas en líquido es función de su tamaño, por lo cual se utiliza la relación entre la velocidad de caída de esferas en un fluido, el diámetro de la esfera, el peso específico tanto de la esfera como del fluido, y la viscosidad del fluido, la forma de esta relación es la ecuación conocida como la Ley de Stokes

$$V = \frac{2}{g} * \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\nu} * \left[ \frac{D}{2} \right]^2 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Donde:

V : Velocidad de caída de la esfera, (cm/s).

$\gamma_s$  : Peso específico de la esfera, (g/cm<sup>3</sup>).

$\gamma_f$  : Peso específico del fluido (generalmente agua), varía con la temperatura, (g/cm<sup>3</sup>).

$\nu$  : Viscosidad absoluta o dinámica del fluido, varía con la temperatura, (g/cm.s)

D : Diámetro de la esfera, (cm).

Al aplicar la ley de Stokes, se obtiene el diámetro equivalente de la partícula, que es el diámetro de una esfera de la misma Gs (gravedad específica) que el suelo, que se sedimenta

con la misma velocidad que la partícula real. Al resolver la ecuación anterior para D, usando el peso específico del agua, se obtiene:

$$D = \sqrt{\frac{1800vV}{\gamma_s - \gamma_w}} \quad (\text{mm}) \quad (\text{Ec.4.5})$$

El rango de los diámetros D de partículas de suelo para los cuales esta ecuación es válida, es aproximadamente:  $0.0002 \text{ mm} \leq D \leq 0.2 \text{ mm}$ , pues los granos mayores causan excesiva turbulencia en el fluido y los granos muy pequeños están sujetos a movimiento de tipo Browniano y no se sedimentan. El análisis con tamices puede llegar a tamaños de partículas de 0.075 mm, que están dentro del campo de aplicabilidad de la Ley de Stokes, lo cual permite obtener datos ininterrumpidamente.

Todas las partículas de un mismo diámetro D están uniformemente distribuidas en toda la suspensión, al principio de la prueba; todas estas partículas se sedimentan a la misma velocidad. Al pasar un tiempo t, todas las partículas de un mismo diámetro habrán recorrido la distancia = Vt. Dentro de esa altura medida desde la superficie de la suspensión, no habrá partículas del diámetro correspondiente a esa velocidad, mientras que de ese nivel hacia abajo, las partículas de ese tamaño estarán en la concentración original, pues al bajar con la misma velocidad, tales partículas habrán conservado sus posiciones relativas. Las partículas de tamaño mayor que D, correspondientes a la velocidad antes mencionada, habrán descendido a una profundidad mayor, pues se sedimentan a mayor velocidad, por lo que, a la profundidad H sólo habrá partículas de diámetro equivalente igual o menor que D, a la concentración original. Por tanto, el peso específico relativo de la suspensión a la profundidad H y en el tiempo t, es una medida de la cantidad de partículas de igual o menor tamaño que D contenidas en la muestra de suelo.

Al medir el peso específico relativo de una suspensión de suelo, a una misma profundidad, en distintos tiempos, puede obtenerse cualquier número de puntos para la curva granulométrica; igualmente, pueden obtenerse esos puntos midiendo, al mismo tiempo, el peso específico relativo de la suspensión a diferentes profundidades. La distribución de los

pesos específicos relativos representa, en forma implícita, la distribución granulométrica. También puede determinarse esa distribución, midiendo los pesos específicos relativos a diferentes tiempos y a distintas profundidades y este es el procedimiento en que se basa la prueba del hidrómetro, pues en la práctica el bulbo alcanza niveles más bajos en cada lectura, ya que la concentración de la suspensión a una cierta profundidad disminuye con el tiempo.

El análisis del hidrómetro (Figura 4.2), se complementa con el análisis de las mallas. Los resultados se presentan en un gráfico semilogarítmico de porcentaje de material más fino contra el diámetro de los granos.



Figura 4. 2 Proceso de calibración en el Ensayo del hidrómetro.

#### **4.6 Ensayo triaxial no consolidado no drenado, Prueba rápida (ASTM D-2850).**

El ensayo triaxial es usado para determinar la resistencia al cortante, la rigidez y características de deformación de las muestras. Los parámetros de resistencia al cortante obtenidos por medio de este ensayo son: el ángulo de fricción y la cohesión.

- Ángulo de fricción: Este ángulo es análogo al ángulo de fricción entre dos cuerpos que se deslizan, en cuyo caso este ángulo se conoce como ángulo de fricción

dinámica y  $\tan\phi$  es el coeficiente de fricción. Este depende de varios factores como el tamaño de los granos, la forma de los granos, la distribución de tamaños y la densidad.

- **Cohesión:** Es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física éste término se utiliza para representar la tensión. En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero y a estos suelos se les denomina suelos no cohesivos.

Para la realización del ensayo se forma un espécimen cilíndrico de aproximadamente 5 cm de diámetro y de 10 cm de altura, se le coloca una membrana y se monta en la máquina de ensayo triaxial. Ver Figura 4.3. No se permite ninguna etapa de consolidación de la muestra. Posteriormente se cierra la válvula de drenaje para todas las fases del ensayo y antes que la muestra tenga posibilidades de consolidarse. Después se aplica al espécimen una presión hidrostática y de inmediato, se hace fallar al suelo con la aplicación rápida de la carga axial. Luego se efectúan los cálculos para obtener la cohesión y el ángulo de fricción.



Figura 4. 3 Elaboración de la probeta para el Ensayo Triaxial.



#### **4.7 Ensayo de penetración estándar (ASTM D 1586-94)**

El método de penetración estándar es un procedimiento exploratorio preliminar que rinde buenos resultados en la práctica y proporciona información útil en torno al subsuelo y no sólo en lo referente a la descripción, sino a parámetros importantes del suelo. La utilización de este procedimiento para el desarrollo del presente trabajo, consiste en levantar la estratigrafía de las formaciones geológicas presentes, además de la respectiva clasificación SUCS. Por otra parte, se utiliza para determinar la variación del contenido de humedad con la profundidad.

El equipo necesario para aplicar el procedimiento consta de un muestreador especial (muestreador o penetrómetro estándar). El penetrómetro es de media caña, lo cual facilita la extracción de muestras penetradas en su interior. Se enrosca al extremo de la tubería de perforación y el ensayo consiste en hacerlo penetrar a golpes dados por un martinete hueco de 63.5 kg (140 lb), que cae desde 0:76 m (30 pulgadas), se cuenta el número de golpes necesarios para lograr una penetración de 30 cm (1 pie).

El martinete es guiado por la misma tubería de perforación, luego se eleva por un cable que pasa por la polea del trípode y se deja caer desde la altura requerida contra un ensanchamiento de la misma tubería de perforación. En cada avance de 50 cm debe retirarse el penetrómetro, removiendo al suelo de su interior, el cual constituye la muestra.

El muestreador se hace descender hasta tocar el fondo y, seguidamente, a golpes se hace que el penetrómetro entre 20 cm dentro del suelo. Desde este momento deben contarse los golpes necesarios para lograr la penetración de los siguientes 30 cm. Al retirar el penetrómetro, el suelo que haya entrado en su interior constituye la muestra que puede obtenerse con este procedimiento. Este ensayo de campo, es complementado con la clasificación visual-manual y la determinación del contenido de humedad en el laboratorio.

La Figura 4.4 muestra el equipo montado en campo.



Figura 4. 4 Ensayo SPT en el talud de la col. Brisas del Sur.

#### **4.8 Resumen de resultados.**

Las tablas 4.2 y 4.3 muestran el resumen de los parámetros geotécnicos obtenidos de las diferentes capas geológicas existentes en el talud de la col. Brisas del Sur, Santo Tomás. En algunos casos no fue posible obtener los resultados de los respectivos ensayos de laboratorio por las características que presentaba el suelo.

En la primera muestra de la Fm. Cuscatlán, no fue posible realizar los ensayos triaxial y caja de corte, por la textura gruesa presentada por la muestra con diámetro de pómez de hasta 5 cm, por lo que se realizó otra extracción del paleosuelo que se localiza en la parte superior de dicha formación. El paleosuelo se encuentra en el techo de cada depósito piroclástico y se forman por los procesos de intemperismo, indican épocas eruptivas separadas en el tiempo por inactividades, debido a ésto presentan una textura menos gruesa que en el resto de la formación y se pudo observar que tienen mayor susceptibilidad al

deslizamiento. Para los suelos sin ninguna o poca cohesión no fue posible realizar el ensayo de límites de Atterberg.

Los intervalos de tiempo en que se realizaron las extracciones y pruebas de laboratorio fueron los siguientes:

- TBJ (Unidad C), muestra 1: 2-8 Mayo 2005
- Formación Cuscatlán: 9-15 Mayo 2005
- Paleosuelo TB4: 16-22 Mayo 2005
- TB3 (Muestra 1, porción inferior del paleosuelo TB3): 30 de Mayo al 5 de Junio 2005
- TB3 (Muestra 2): 6 -12 Junio 2005
- Paleosuelo Cuscatlán: 13-19 Junio 2005
- SPT: 4-10 Julio 2005.

Los puntos de extracción de las muestras inalteradas se muestran en la figura 4.5.

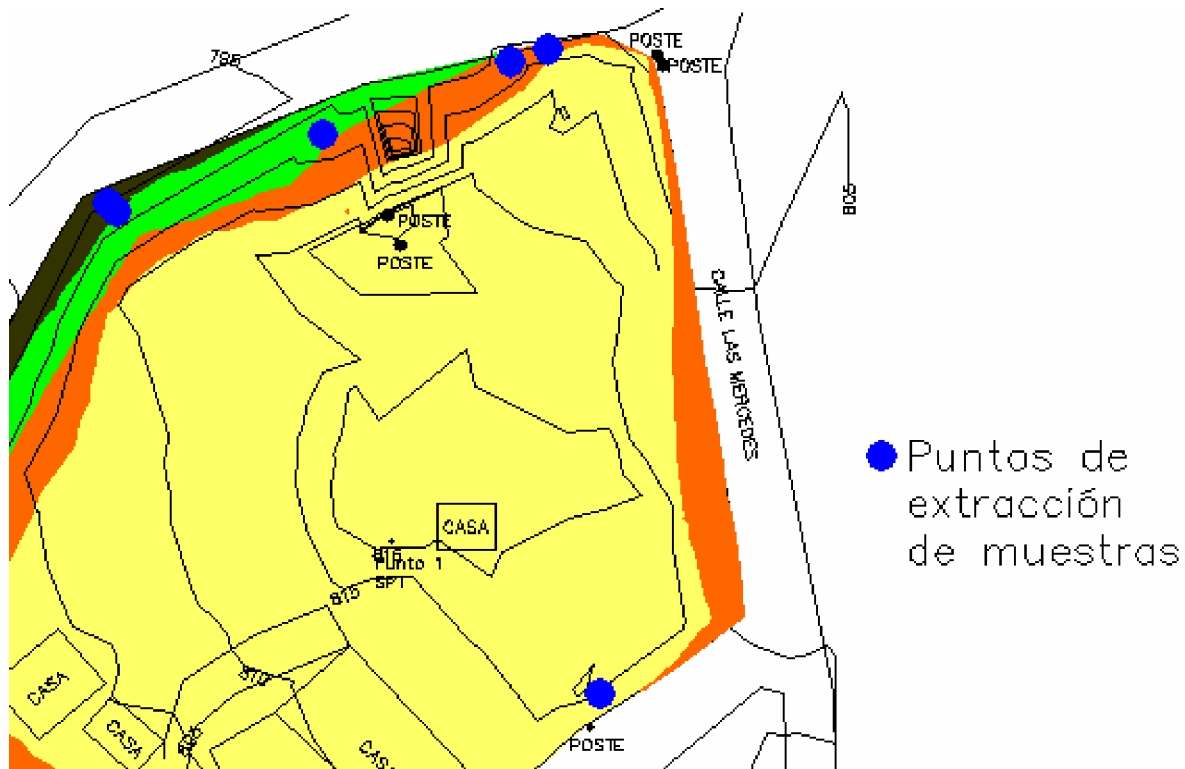


Figura 4. 5 Puntos de extracción de muestras inalteradas.

Tabla 4. 2 Tabla Resumen de Resultados de Laboratorio.

Muestra	Contenido de Humedad (%)	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción (grados)	Gravedad Específica	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)	Peso Volumétrico g/cm <sup>3</sup>	
								Probetas	Promedio
Unidad C (TBJ) Muestra 1	8.49	0.34	23.11	2.35				1.29 1.30 1.40	1.33
Unidad C (TBJ) Muestra 2	11.49	0.3156	33.77	2.35				1.48 1.40 1.44	1.44
Parte inferior del Paleosuelo TB3	30.53	0.05	42.79	2.7				1.56 1.59 1.51	1.55
Unidad TB3	37.69	0.0391	42.36	2.29				1.47 1.52 1.46	1.48
Paleosuelo TB4	29.85	0.7533	40	2.82	55.75	41.29	14.46	1.42 1.42 1.43	1.42
Paleosuelo Cuscatlán	27.17	0.5955	28.36	3.15	37.2	27.01	10.19	1.42 1.81 1.72	1.65
Formación Cuscatlán	30.4			2.78	55.75	40.72	15.03		

Tabla 4. 3 Tabla Resumen de Resultados de Laboratorio.

Muestra	% Finos	% arenas	% gravas	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	Clasificación SUCS	Observación	Coordenadas		
									X	Y	Z
TBJ (Unidad C) Muestra 1	47.86	52.14	0		0.0048	0.14	ML	Limo de baja plasticidad con arenas; color café claro	485106.34	279375.46	814.30
TB3 Muestra 1	59	40.91	0.09		0.0019	0.018	ML	Limo de baja plasticidad con mayor presencia de finos que de arenas, color café oscuro.	485104.95	279431.98	804.60
TB3 Muestra 2	91.09	6.82	2.09		0.0018	0.0085	ML	Limo de baja plasticidad con abundancia de finos, color café claro.	485101.83	279431.07	803.85
Paleosuelo TB4	81.36	18.27	0.36			0.0023	MH	Limo de alta plasticidad con abundancia de finos; color café oscuro con pómez.	485085.53	279424.48	802.45
Paleosuelo Cuscatlán	72.18	27.82	0		0.00045	0.015	ML	Limo de alta plasticidad con abundancia de finos, color café oscuro.	485067.57	279417.71	786.25
Formación Cuscatlán	46.45	34.1	19.45		0.0015	2.5	SM-MH	Arena limosa- limo de alta plasticidad, con presencia de pómez tamaño grava, color amarillento.	485066.11	279419.72	785.50

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LABORATORIO.

En el país se cuenta con muy pocos registros para realizar caracterizaciones geotécnicas relacionadas con la geología y los datos geotécnicos existentes no se sabe a que unidad geológica pertenecen. Por esta razón no se pudo realizar una comparación.

### 5.1 Ángulo de fricción.

La tabla 5.1 resume los ángulos de fricción obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Tabla 5. 1 Ángulos de fricción (grados) del talud Brisas del Sur, Santo Tomás.

Muestra	Ángulo de Fricción (Grados)
TBJ (Unidad C) muestra 1	23.11
TBJ (Unidad C) muestra 2	33.77
TB3 muestra 1	42.79
TB3 muestra 2	42.36
TB4 (Paleosuelo)	40
Fm. Cuscatlán (Paleosuelo)	28.36

El ángulo de rozamiento juega un papel importante en la estabilidad de laderas, y depende principalmente de la textura del suelo (tamaño, fábrica, forma y la distribución de los granos).

Los factores que influyen en la obtención de un mayor o menor ángulo de fricción pueden deberse a:

- Si el suelo posee una buena distribución granulométrica, se aumenta el contacto entre sus granos, esta propiedad incide en que el suelo se caracterice por tener ángulos de fricción interna medios y altos.
- Un valor menor de ángulo de fricción se obtendría si el porcentaje de granos finos es mayor que el de granos gruesos. En el caso presente, TBJ debería poseer el mayor ángulo de fricción debido a que es el que tiene mayor número de gruesos (ver Figura 5.13); sin embargo no ocurrió de esa manera, debido a que esta

extracción corresponde al punto más cercano a la superficie (menos de 2 metros), donde existen mayores concentraciones de humedad.

- Es posible que aumente el valor del ángulo de fricción, cuando hay menor lubricación de partículas debido a su menor contenido de agua, ya que las extracciones se realizaron a inicios de invierno. En otras palabras, a medida que se incrementa el contenido de humedad, se disminuye el ángulo de fricción.
- Es inaceptable el valor obtenido de ángulo de fricción en la muestra 2 de TBJ ya que al tener mayor contenido de humedad que la muestra 1, se debería de esperar un ángulo de fricción menor, sin embargo ocurrió lo contrario y podría deberse a la hipótesis que la muestra 2 tuviera una mejor distribución granulométrica que la muestra 1, pues se observaba que dentro de la misma unidad el tamaño de granos de las partículas era variable debido a los mecanismos de deposición, lo anterior no se pudo comprobar, ya que no se contaba con la distribución granulométrica de la muestra 2.

## 5.2 Cohesión.

La Tabla 5.2 muestra los parámetros de cohesión obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Tabla 5. 2. Datos de cohesión (kg/cm<sup>2</sup>) del talud Brisas del Sur, Santo Tomás.

Muestra	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )
TBJ (Unidad C) muestra 1	0.34
TBJ (Unidad C) muestra 2	0.32
TB3 muestra 1	0.05
TB3 muestra 2	0.04
TB4 (Paleosuelo)	0.75
Fm. Cuscatlán (Paleosuelo)	0.60

Las unidades TBJ y TB3 cuyas muestras corresponden a depósitos de caída, carecen de cohesión, mientras que los valores obtenidos para TB4 y la Fm. Cuscatlán que corresponden a paleosuelos, evidencian una cohesión mayor que las anteriores aunque no

deja de ser escasa. Los valores de cohesión obtenidos en las muestras son pequeños para suelos jóvenes como TBJ y para TB3; el valor bajo de TB3 es coherente con la ausencia del proceso de desvitrificación, lo cual se demuestra en el análisis de difracción de rayos X. (Ver Anexo A). Los valores de cohesión mayores para paleosuelos más viejos como TB4 y la Fm. Cuscatlán se debe al proceso de meteorización que ha producido algún porcentaje de arcilla.

La cohesión aparente en los suelos analizados no puede atribuirse a agentes cementantes como carbonato de calcio y sulfato de calcio, ya que en el primero no hay reacción al ácido clorhídrico. Además, la difracción de rayos X tampoco indican la presencia de éstos en TB3. (Ver Anexo A). [Guzmán Urbina y Melara 1996: p.18] atribuyen esta propiedad a la trabazón mecánica de los granos debido a la angulosidad de las partículas de pómez presentes en las cenizas volcánicas. [Bommer et al. 1998] y [Rolo et al. 2003], se refieren a la succión como la responsable de la cohesión existente en TBJ; también se puede atribuir a la combinación de la microfábrica y la succión [Hernández, 2004]. Lo anterior puede ser valedero también para TB3.

En los resultados de Santo Tomás surgen varios aspectos importantes que pueden incidir en que se tenga mayor cohesión:

- Cercanía con la fuente de emisión (Caldera de Ilopango) debido al mayor confinamiento, pues los espesores de las unidades superiores son mayores, produciendo mayor compactación de la porción superior (paleosuelo).
- Meteorización de las Unidades.
- El suelo que presenta mayor cohesión es el paleosuelo de TB4, esta cohesión se refleja también en la resistencia en seco presentada en el ensayo de clasificación visual-manual.

Por otra parte, hay aspectos que hacen disminuir el valor de la cohesión:



- El menor contenido de humedad a inicios de invierno probablemente haga decrecer las fuerzas capilares, por consiguiente la succión.
- Si la curva de las distribuciones granulométricas indican que hay una tendencia a mostrar más finos, entonces se debería obtener una cohesión mayor. Esta situación se evidencia con los resultados obtenidos en el paleosuelo de TB4, ya que es la que posee el mayor contenido de finos y presenta mayor cohesión, sin embargo, el resto del depósito está compuesto por pómez.

Los círculos de Mohr obtenidos de los ensayos triaxiales se presentan de la Figura 5.1 a 5.6

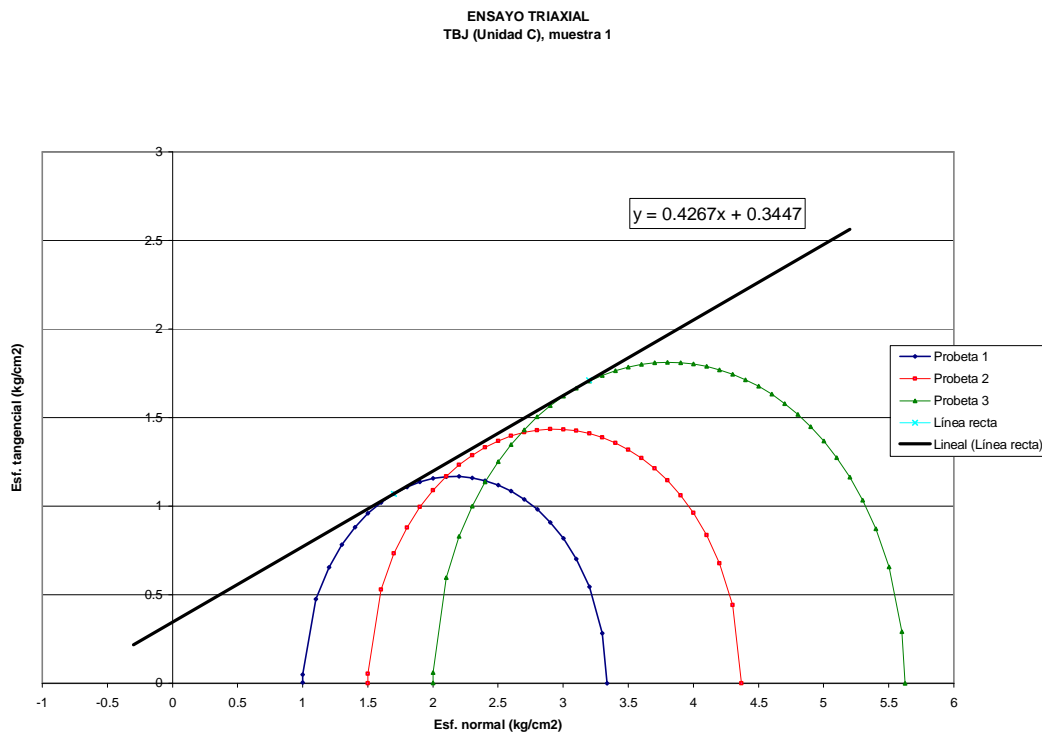


Figura 5. 1 Círculos de Mohr para TBJ (Unidad C), muestra 1

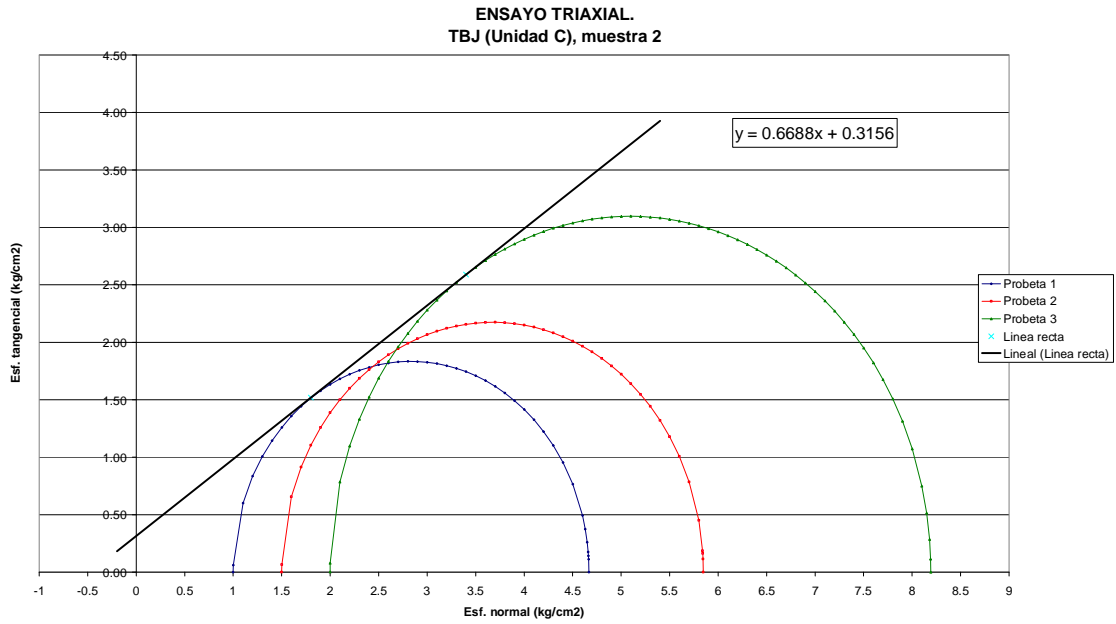


Figura 5. 2 Círculo de Mohr para TBJ (Unidad C), muestra 2

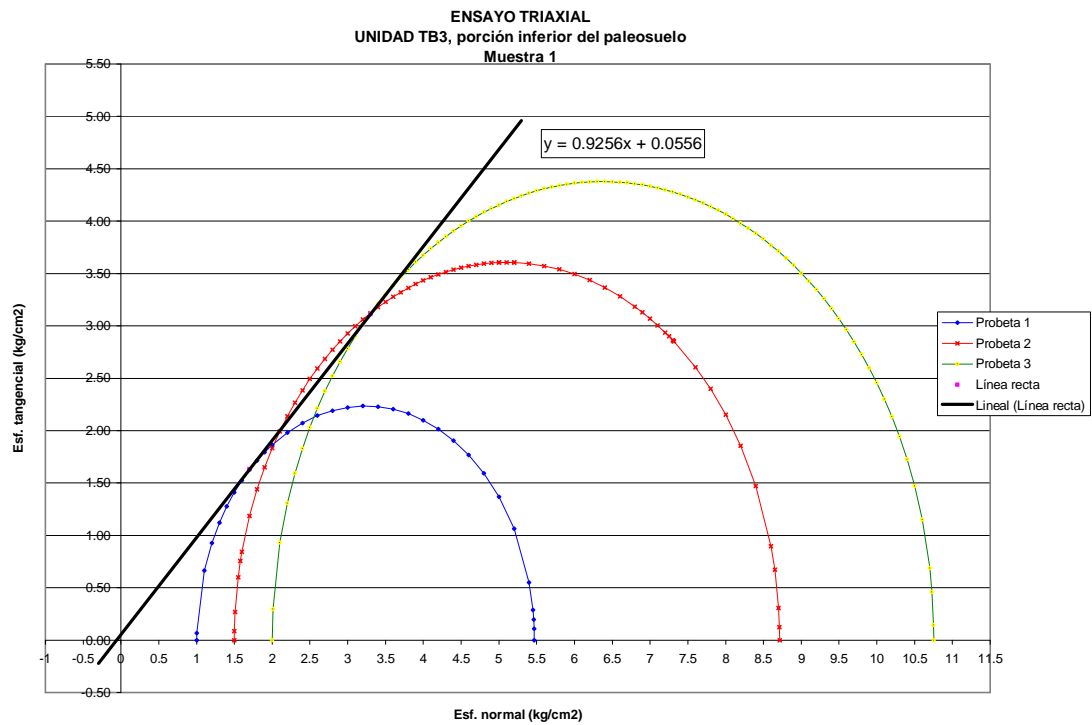


Figura 5. 3 Círculos de Mohr para TB3, muestra 1

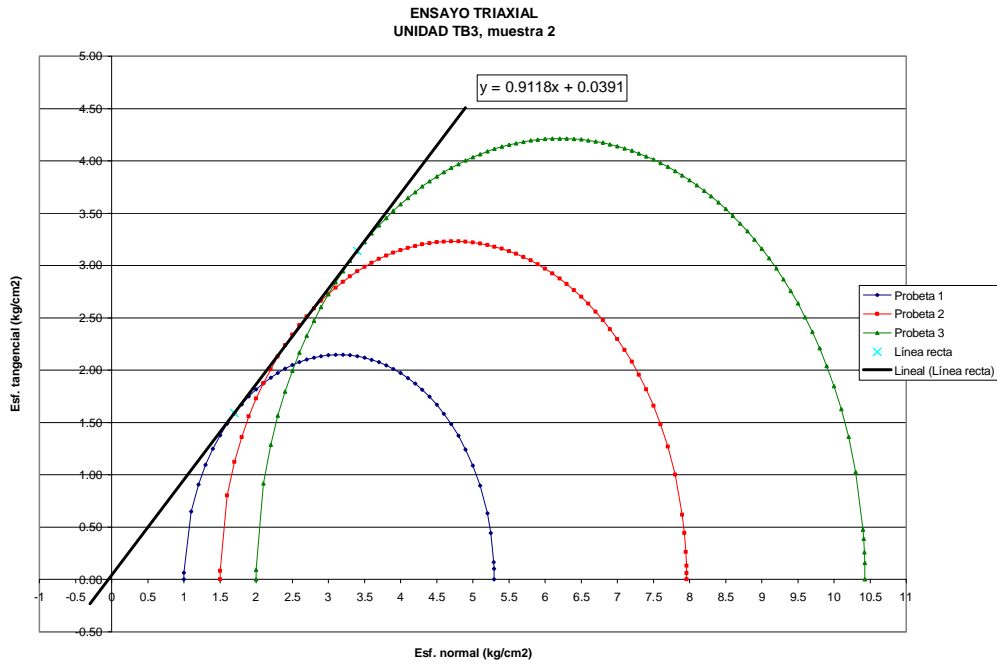


Figura 5. 4 Círculos de Mohr para TB3, muestra 2

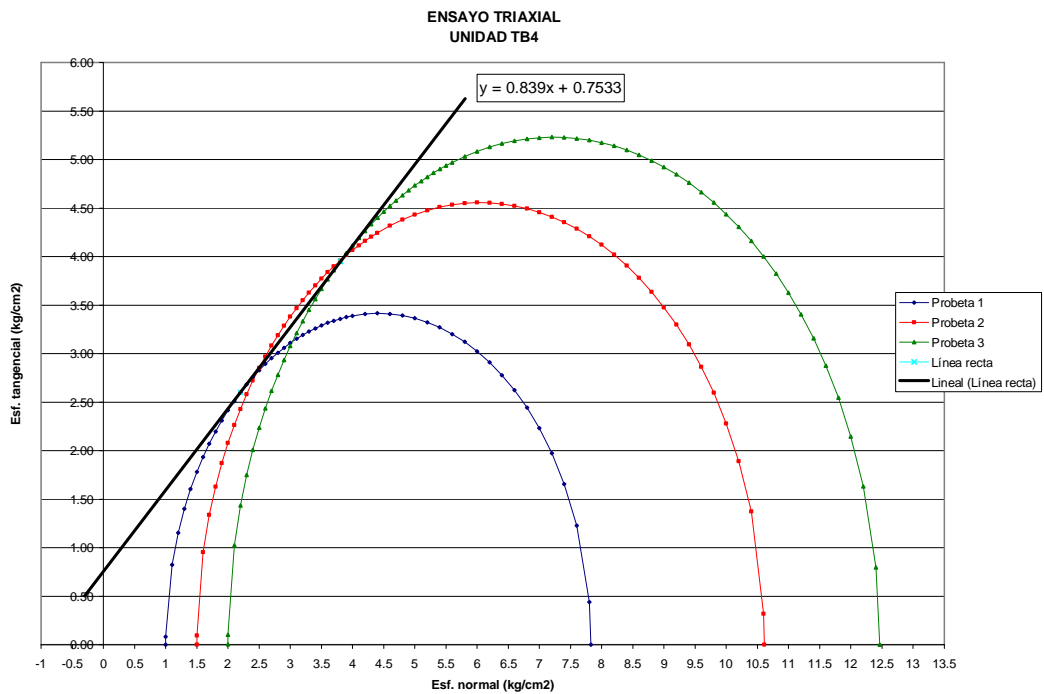


Figura 5. 5 Círculos de Mohr para paleosuelo TB4

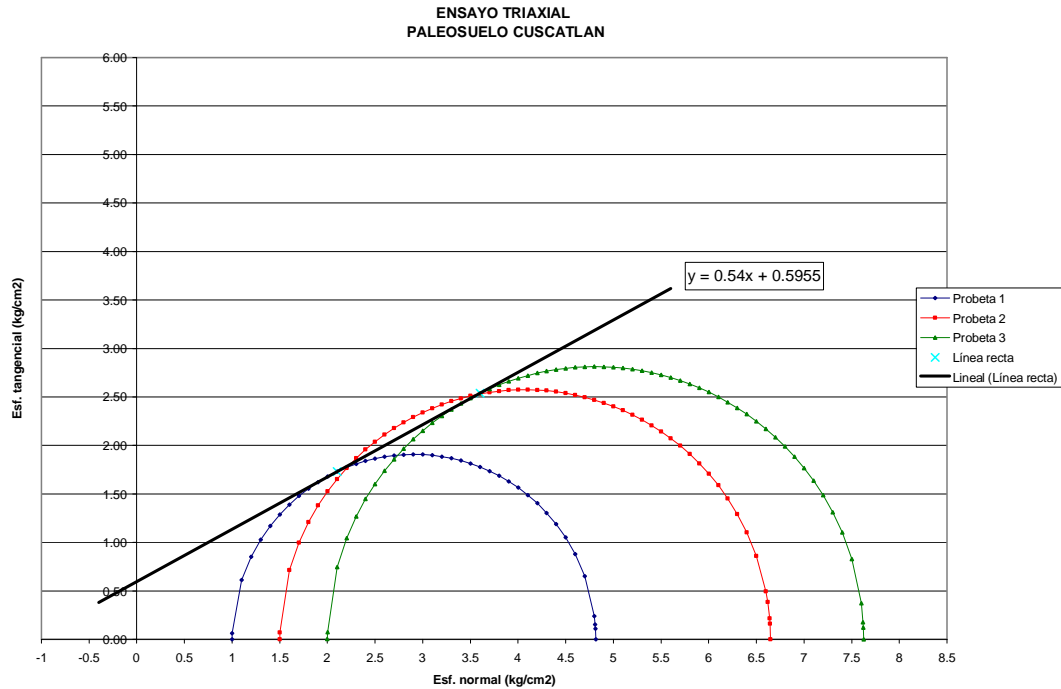


Figura 5. 6 Círculos de Mohr para paleosuelo Cuscatlán

### 5.3 Gravedad Específica y Granulometría

Una característica importante para la identificación de la formación TB3 es la presencia de lapilli acrecional. En los ensayos efectuados a esta formación (exceptuando triaxial) se trituró el lapilli, dando como resultado un incremento de la cantidad de finos que modifica la distribución granulométrica.

Las curvas granulométricas de las diferentes extracciones se presentan de la Figura 5.7 a la 5.12. Los coeficientes de curvatura y uniformidad no se pudieron obtener ya que no fue posible obtener el  $D_{10}$  (diámetro de grano correspondiente al 10% mas fino en peso) por la misma naturaleza fina del material.

### TBJ (Unidad C) muestra 1

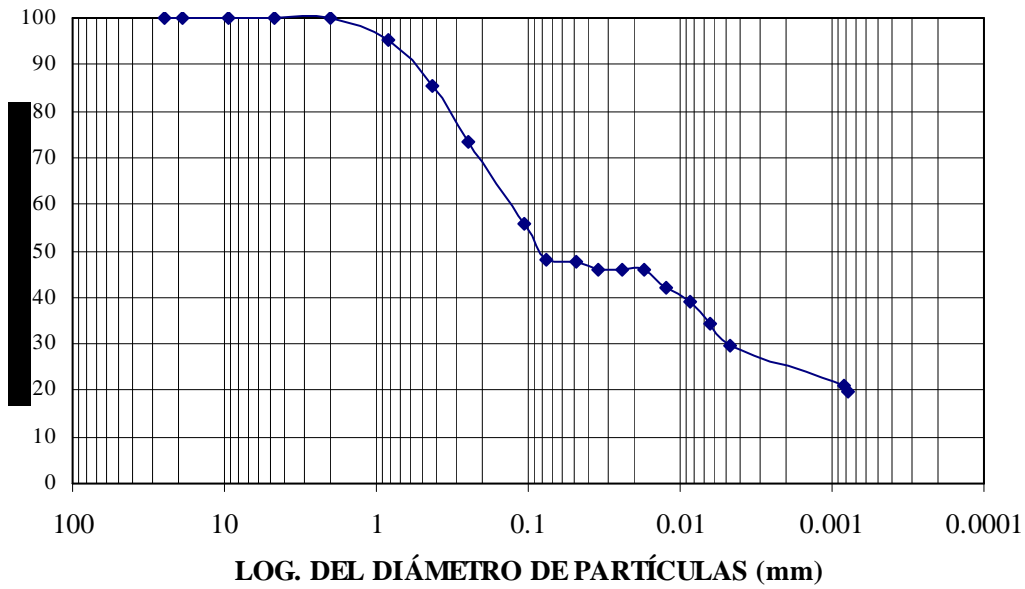


Figura 5. 7 Curva granulométrica de TBJ (Unidad C) muestra 1.

### TB3 muestra 1

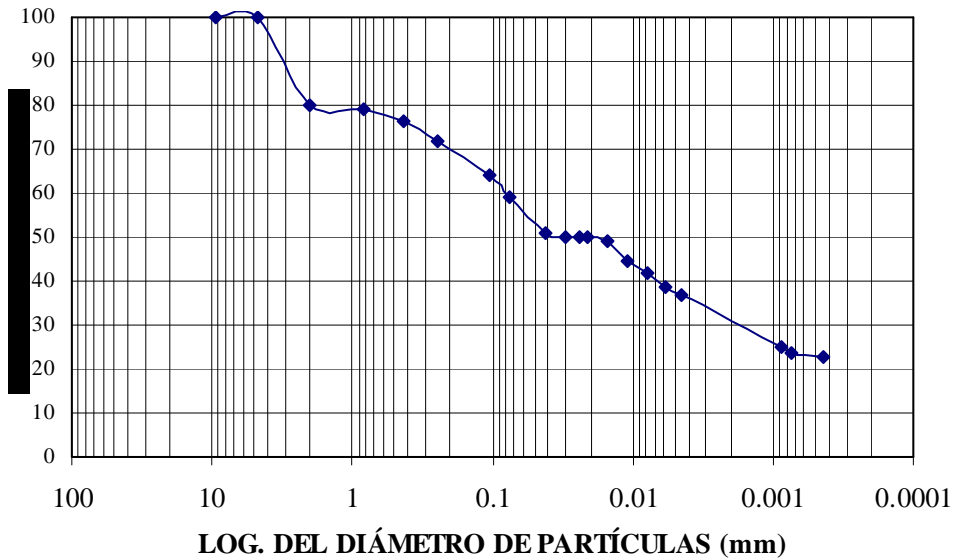


Figura 5. 8 Curva granulométrica de TB3 muestra 1.

### TB3 muestra 2

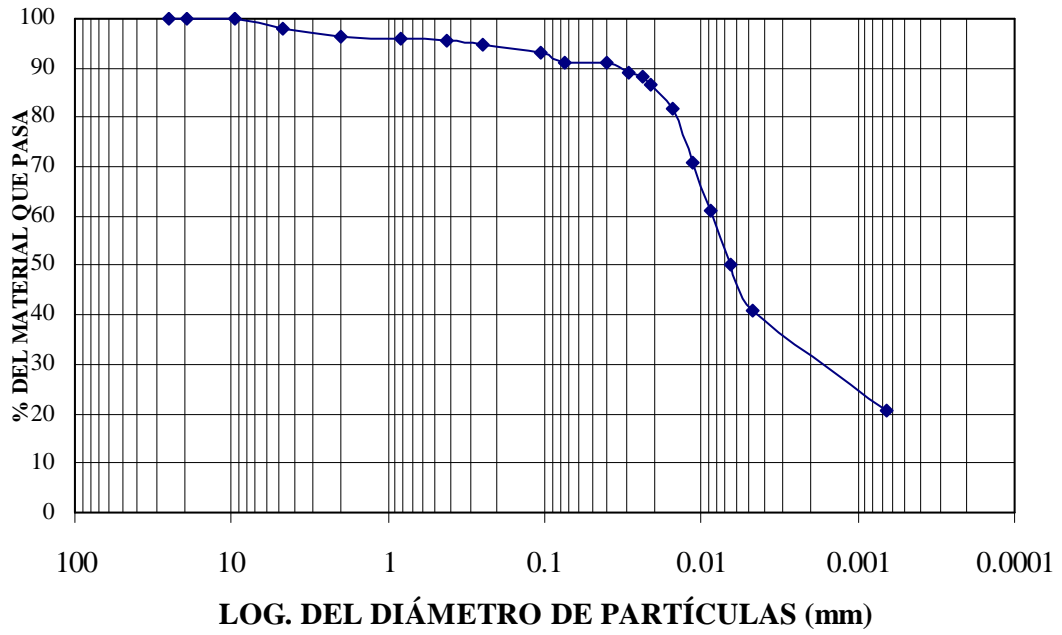


Figura 5. 9 Curva granulométrica de TB3 muestra 2.

### PALEOSUELO TB4

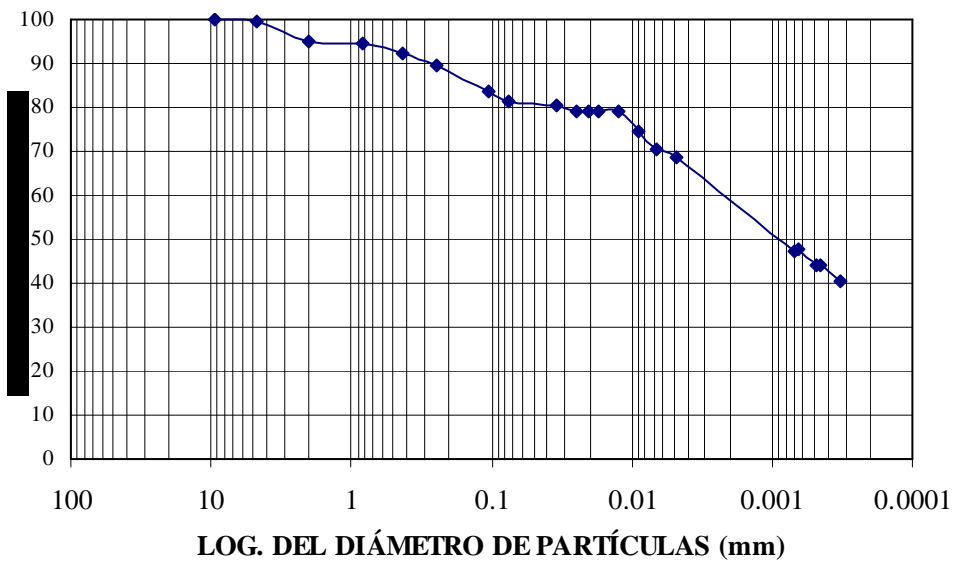


Figura 5. 10 Curva granulométrica de paleosuelo TB4.

### PALEOSUELO CUSCATLAN

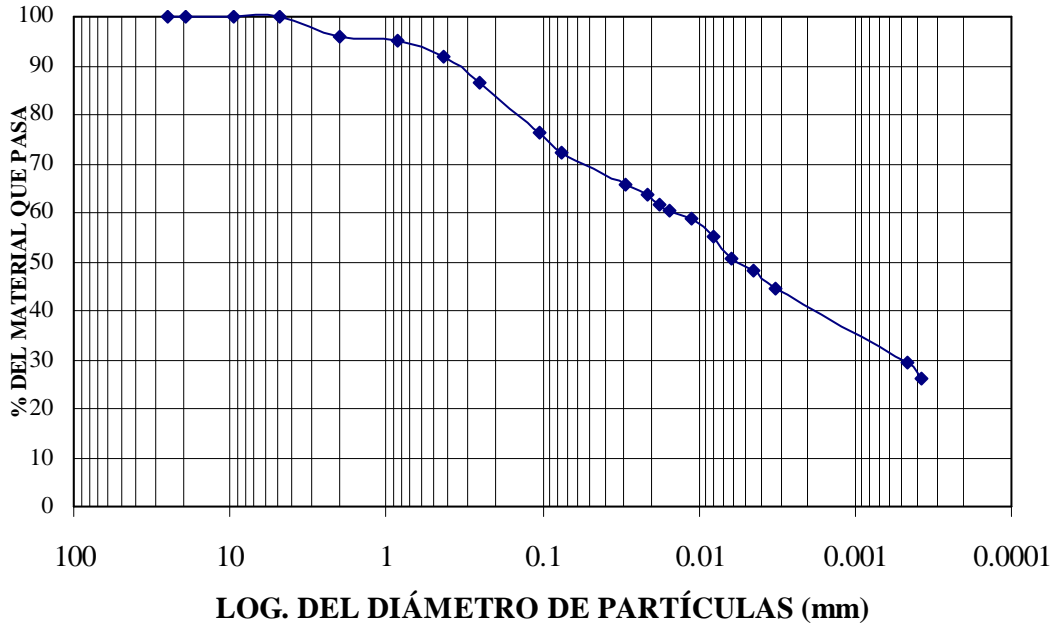


Figura 5. 11 Curva granulométrica de paleosuelo Cuscatlán.

### FORMACIÓN CUSCATLÁN

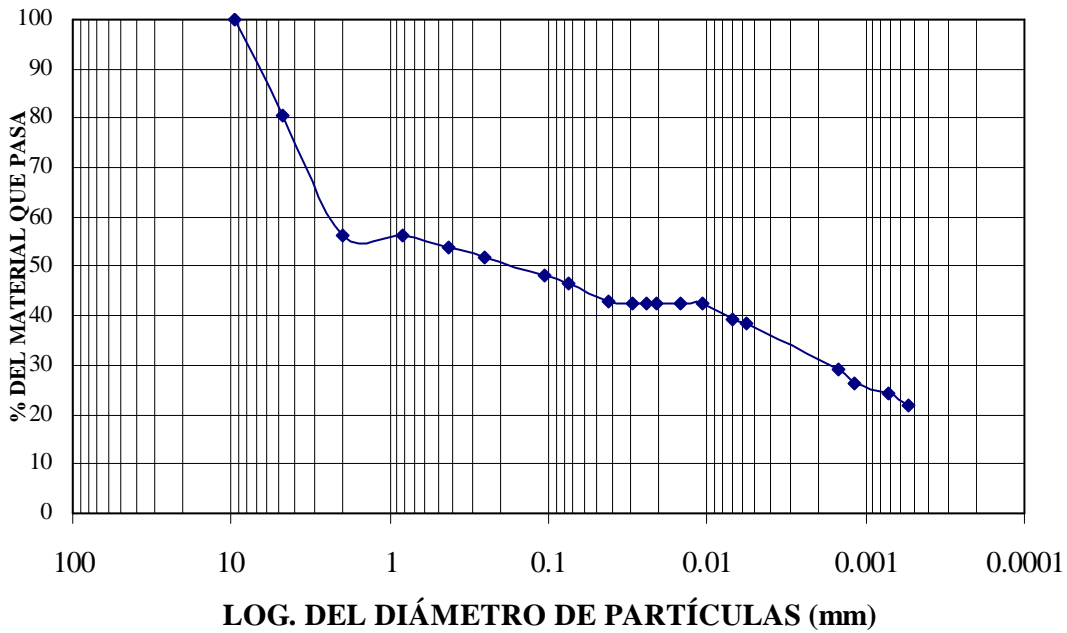


Figura 5. 12 Curva granulométrica de formación Cuscatlán.

Una de las limitantes para validar los resultados de gravedad específica es que sólo se realizó un ensayo, debido a que en el laboratorio no se tenía la disponibilidad suficiente de picnómetros porque los demás estaban averiados y presentaban riesgos en su manipulación.

Los paleosuelos de las formaciones geológicas tienen las partículas más finas y presentan una mayor gravedad específica que los respectivos cuerpos de dichas formaciones. Este fenómeno se puede explicar con la relación de este parámetro con la densidad de los suelos: la presencia mayoritaria de finos conlleva una disminución de los espacios entre partículas, por lo tanto, un incremento de la densidad.

La Tabla 5.3 presenta el porcentaje de finos menor que cierto diámetro respecto a la muestra total proveniente del ensayo del hidrómetro y el respectivo tiempo de deposición:

Tabla 5. 3 Resumen de resultados del hidrómetro.

Formación	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	% menor que el diámetro en cuestión	Tiempo(min)
Paleosuelo TB4	0.3	40.43	18668
TB3(Muestra 1)	0.4	22.67	11437
Paleosuelo Cuscatlán	0.4	26.1	11555
Formación Cuscatlán	0.5	21.78	7164
TB3(Muestra 2)	0.6	20.5	7295
Unidad C	0.7	19.31	6087

Como se puede observar, tanto en la Tabla 5.3 como en la Figura 5.13, el paleosuelo de la formación TB4 es el que tiene mayor contenido de partículas finas menores que  $0.3 \mu\text{m}$ ; ya que fue el ensayo que se dejó más tiempo y aún poseía partículas en suspensión.



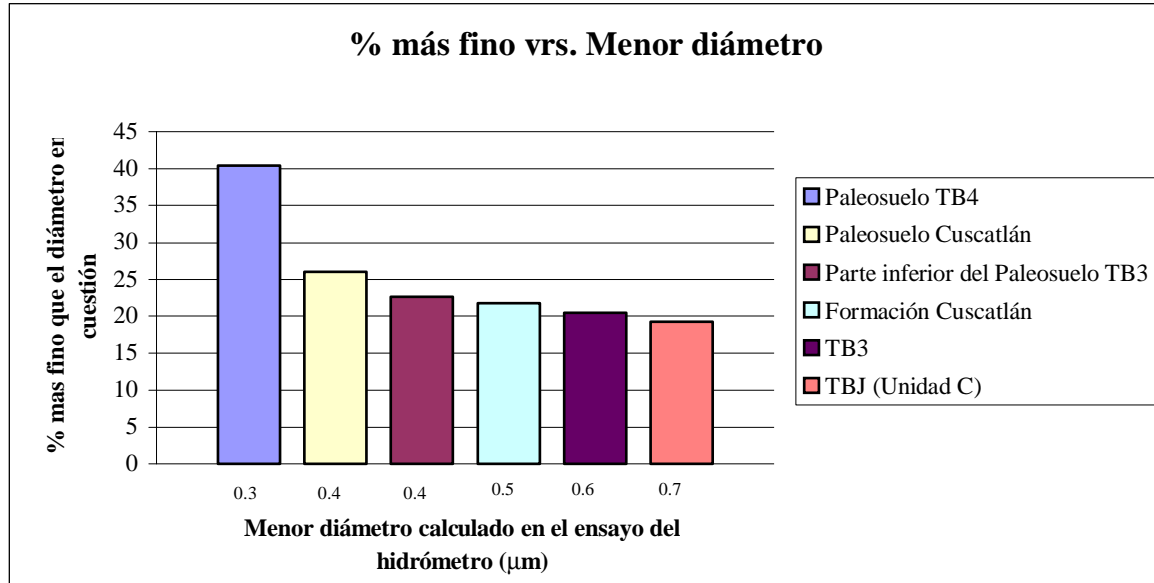


Figura 5. 13 Resultados de ensayos del hidrómetro.

La diferencia de pesos volumétricos en el Paleosuelo Cuscatlán puede deberse a las altas variaciones de humedad encontradas en la misma muestra.

No se realizó ensayo de límites de consistencia de Atterberg en aquellas unidades que no se podía conformar el cilindro de 1/8 de pulgada del límite plástico.

## 6 MÉTODOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

### 6.1 Métodos de equilibrio límite y factor de seguridad

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no requiere sobre la relación esfuerzo-deformación. El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX y existe Software muy fácil de utilizar. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de ellos posee cierto grado de precisión.

El Factor de Seguridad es empleado por los Ingenieros para conocer cual es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al cortante}}$$

En superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$FS = \frac{\text{Momento Resistente}}{\text{Momento Actuante}}$$

Existen, además, otros sistemas de plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud y método probabilístico. La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie. Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad.

Otro criterio es el de dividir la masa a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos.

$$F.S. = \frac{\Sigma \text{Resistencias al corte}}{\Sigma \text{Esfuerzos al cortante}}$$

## **6.2 Formulación de los métodos del equilibrio límite.**

### **6.2.1 Estática, geometría de la falla y propiedades de los materiales**

La formulación de los métodos de equilibrio límite asume lo siguiente:

- a) El factor de seguridad de la componente cohesiva y el de la componente friccionante, es el mismo.
- b) El factor de seguridad es el mismo para todas las dovelas.

Cada una de las variables relacionadas con el mecanismo se definen como sigue a continuación:

W : El peso total de una dovela de ancho b y de altura h.

N : Fuerza normal actuando en la base de una dovela.

S : Fuerza cortante que actúa en la base de cada dovela.

E : Fuerza normal que actúa entre cada dovela. Los subíndices L y R se refieren a los lados izquierdo y derecho de la dovela, respectivamente.

X : Fuerza cortante vertical entre cada dovela. Los subíndices L y R se refieren a los lados izquierdo y derecho de la dovela, respectivamente.

D : Carga externa puntual.

kW : Fuerza sísmica aplicada en el centroide de cada dovela.

R : Es el radio de giro para una superficie de falla circular o el brazo de momentos asociados con la fuerza cortante,  $S_m$  para cualquier forma de superficie de falla.

f : Es la distancia perpendicular medida desde el eje longitudinal de la fuerza normal al centro de rotación o centro de momentos. Se asume que aquellas distancias f, ubicadas al lado derecho del eje de rotación de una pendiente negativa (taludes inclinados hacia la izquierda), son negativas y las distancias f ubicadas al lado izquierdo, son positivas. Para pendientes positivas, la convención de signos es la contraria.

x : Distancia horizontal que existe entre el eje longitudinal de la dovela al centro de rotación o centro de momentos.

e : Distancia vertical medida desde el centroide de cada dovela al centro de rotación o centro de momentos.

d : Distancia perpendicular medida desde el eje longitudinal de una carga puntual al eje de rotación o centro de momentos.

h : Distancia vertical medida desde el centro de la base de cada dovela a la superficie del terreno.

a : Es la distancia perpendicular medida desde la resultante de las fuerzas debidas a fluidos al centro de rotación o centro de momentos. Los subíndices L y R se refieren a los lados izquierdo y derecho del talud, respectivamente.

A : Es la resultante de las fuerzas debidas al agua. Los subíndices L y R se refieren a los lados izquierdo y derecho del talud, respectivamente.

$\omega$  : Es el ángulo de la carga puntual con respecto a la horizontal. Este ángulo es medido en sentido contrario a las agujas del reloj.

$\alpha$  : Es el ángulo entre la tangente al centro de la base de cada dovela y la horizontal. La convención de signos es la siguiente: es positivo cuando el ángulo de la pendiente se ubica

en la misma dirección que la geometría de la pendiente. Es negativo cuando la geometría es la contraria.

$\sigma_n$  : Esfuerzo normal promedio en la base de cada dovela.

F : Factor de seguridad.

$\beta$  : Longitud de la base de cada dovela.

$\lambda$  : Relación de fuerza cortante y fuerza normal en la interfase de dovelas.  $F_f$  = Factor de seguridad del equilibrio de fuerzas.

$F_m$  : Factor de seguridad del equilibrio de momentos.

Las figuras 6.1 y 6.2 muestran todas las fuerzas que actúan en una superficie circular y en una superficie compuesta.

La figura 6.3 muestra las fuerzas actuando en una superficie de falla definida por una serie de líneas rectas. La ubicación del centro de momentos no es importante cuando se satisfacen tanto las condiciones de equilibrio de fuerzas y momentos. Sin embargo, cuando sólo el equilibrio de momentos es satisfecho, es importante la ubicación del mismo.

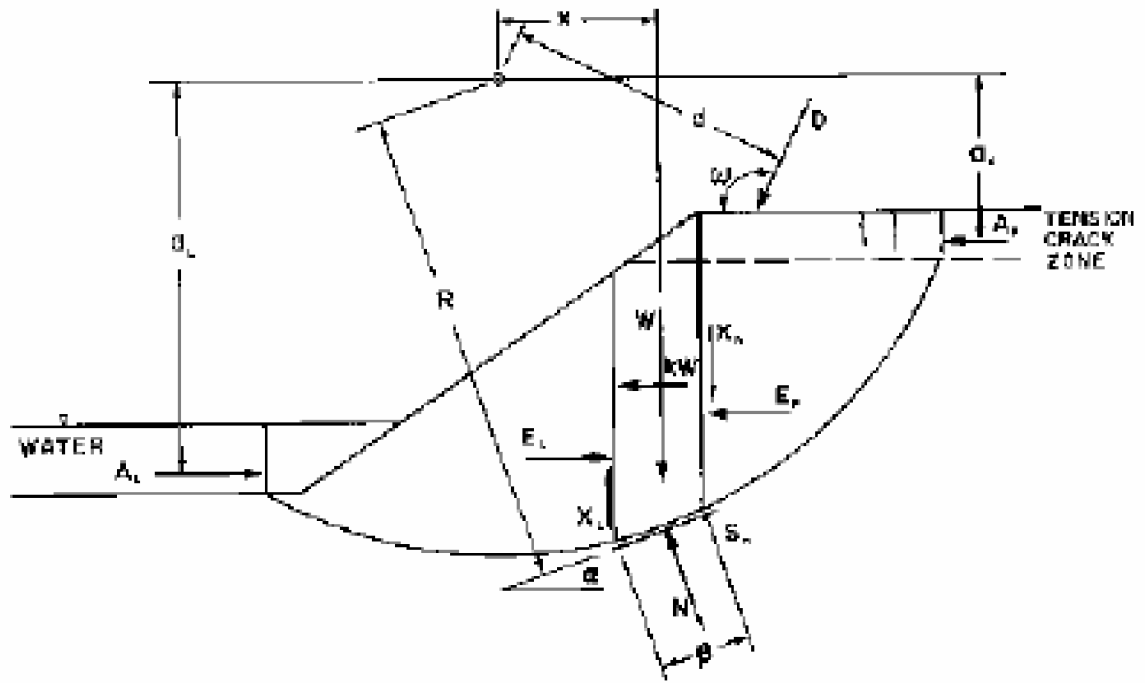


Figura 6. 1 Fuerza actuando en una dovela cuando la superficie de falla es circular.[GEO-SLOPE, 2002]

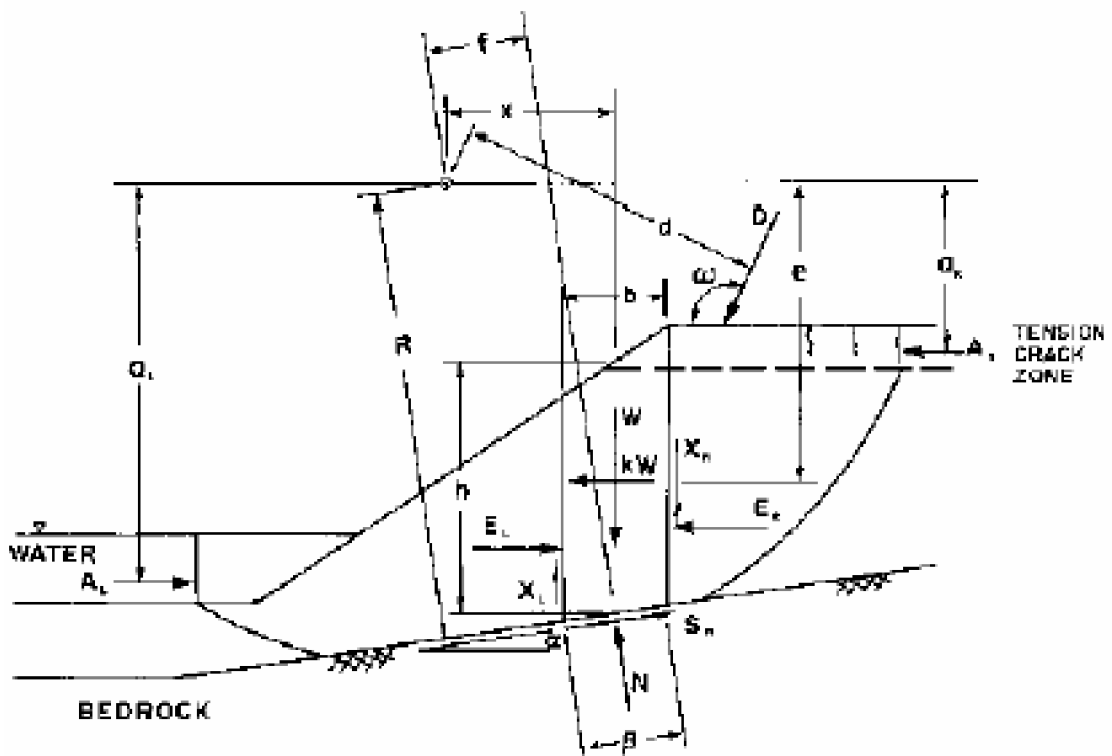


Figura 6. 2 Fuerzas actuando en una dovela cuando la superficie de falla es compuesta. [GEO-SLOPE, 2002]

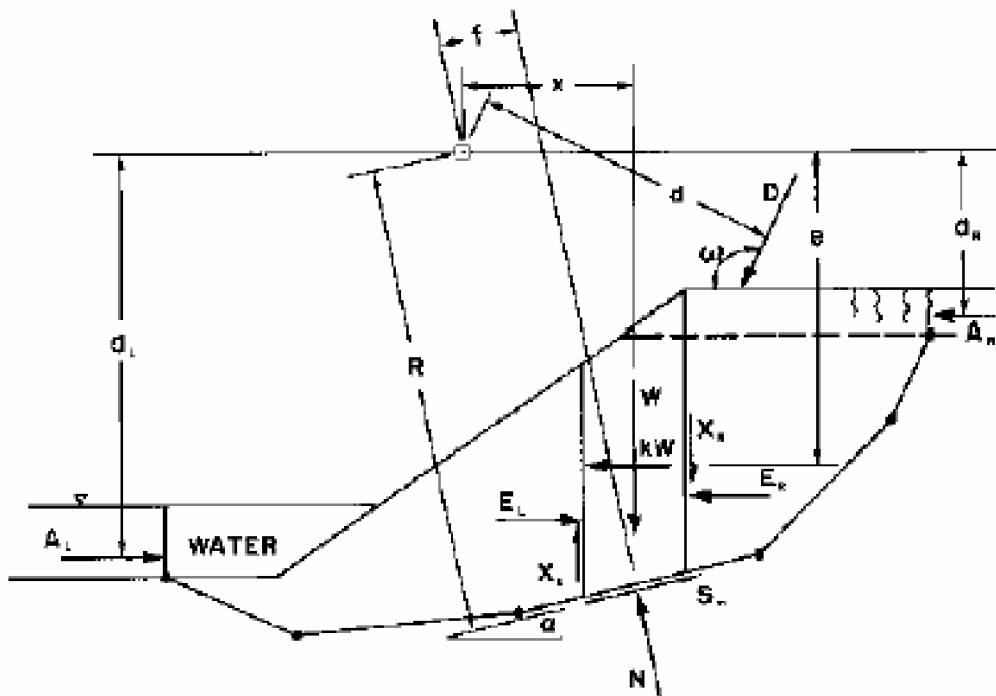


Figura 6. 3 Fuerzas actuando en una dovela cuando la superficie de falla está definida por segmentos de líneas recta.[GEO-SLOPE, 2002]

Cuando se realiza un análisis de esfuerzos efectivos, el esfuerzo cortante es definido como:

$$S = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (\text{Ec. 6.1})$$

Donde:

S : Esfuerzo cortante.

c' : Cohesión efectiva.

$\phi'$  : Angulo de fricción interna efectivo.

$\sigma_n$  : Esfuerzo normal total.

u : Presión de poros.

La magnitud de la fuerza cortante para satisfacer las condiciones de equilibrio es la siguiente:

$$S_m = \frac{s\beta}{F} = \frac{\beta(c' + (\sigma_n - u)\tan\phi)}{F} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

Donde:

$\sigma_n = \frac{N}{\beta}$ , que es igual al esfuerzo normal promedio en cada dovela.

Para calcular el factor de seguridad se recurre al equilibrio de fuerzas y equilibrio de momentos. Estas ecuaciones, junto con el criterio de falla son insuficientes para determinar el problema. Se requiere de un mayor conocimiento acerca de la distribución de la fuerza normal en la base de cada dovela y la distribución de las fuerzas entre dovelas. En las tablas 6.1 y 6.2 se presentan el número de ecuaciones disponibles y variables desconocidas asociadas con problemas de estabilidad.

Tabla 6.1 Ecuaciones disponibles para resolver el factor de seguridad. [GEO-SLOPE, 2002]

Número de ecuaciones disponibles	Descripción
n	Sumatoria de fuerzas en la dirección horizontal
n	Sumatoria de fuerzas en la dirección vertical
n	Sumatoria de momentos
n	Criterio de falla Mohr-Coulomb
4n	Total de ecuaciones

En vista de que el número de variables desconocidas excede al número de ecuaciones disponibles, el problema se vuelve indeterminado. Para hacer el problema determinado se requiere asumir direcciones, magnitudes y/o puntos de aplicación de algunas de las fuerzas. En la mayoría de los métodos primero asume que el punto de aplicación de la fuerza normal que actúa en la base de cada dovela, se ubica en el eje central de la misma; después se asumen las magnitudes, direcciones o puntos de aplicación de las fuerzas que actúan en la interface de dovelas. En general, los métodos asociados con dovelas pueden ser clasificados en términos de (1) las ecuaciones de estática utilizadas para el cálculo del



factor de seguridad y (2) las suposiciones de fuerzas que actúan en la interfase de las dovelas para volver el problema determinado.

Tabla 6.2 Variables desconocidas para resolver el factor de seguridad. [GEO-SLOPE, 2002]

Número de variables desconocidas	Descripción
n	Magnitud de la fuerza normal en la base de una dovela, N.
n	Punto de aplicación de la fuerza normal en la base de cada dovela.
n - 1	Magnitud de la fuerza normal generada en la interfase de dovelas, E.
n - 1	Punto de aplicación de la fuerza normal en la interface de dovelas, X.
n - 1	Magnitud de la fuerza cortante en la en la interfase de dovelas, X.
n	Fuerza cortante en la base de cada dovela, $S_m$ .
1	Factor de seguridad
1	Relación de fuerza normal y cortante en la interfase de dovelas, $\lambda$ .
6n - 1	Total de variables desconocidas.

### 6.2.2 Método general del límite de equilibrio.

En el método general del límite de equilibrio se utilizan las siguientes ecuaciones de estática:

1. La sumatoria de las fuerzas en la dirección vertical para cada dovela. Esta se resuelve para la fuerza normal que actúa en la base de cada dovela, N.
2. La sumatoria de fuerzas en la dirección horizontal para cada dovela es utilizada para el cálculo de la fuerza normal que actúa en la interfase de dovelas, E.
3. La sumatoria de momentos de todas las dovelas con respecto a un punto común. Está ecuación puede ser configurada para resolver el factor de seguridad de equilibrio de momentos,  $F_m$ .
4. La sumatoria de fuerzas en la dirección horizontal de todas las dovelas. Con esta ecuación se plantea el factor de seguridad de equilibrio de fuerzas,  $F_f$ .

Aun con las ecuaciones de estática planteadas previamente, el problema sigue siendo indeterminado. Para poder resolver el problema, se deberá asumir una función arbitraria que plantee la dirección de la resultante de las fuerzas que actúan en la interfase de cada dovela. Después, el factor de seguridad puede ser calculado basado en el equilibrio de momentos ( $F_m$ ) y el equilibrio de fuerzas ( $F_f$ ). Los factores de seguridad pueden variar dependiendo del porcentaje de la fuerza normal ( $\lambda$ ) que se utiliza en el cálculo.

Utilizando el mismo método general del límite de equilibrio, se puede especificar una variedad de fuerzas de interfase para satisfacer las condiciones de equilibrio de fuerzas o equilibrio de momentos. La mayoría de métodos de análisis de equilibrio, están basados en las suposiciones hechas para las fuerzas de interfase y la selección del factor de seguridad generado del equilibrio de momentos ( $F_m$ ) o equilibrio de fuerzas ( $F_f$ ). Un método más riguroso deberá satisfacer tanto el equilibrio de fuerzas como el equilibrio de momentos.

### 6.2.3 Factor de seguridad para equilibrio de momentos.

Para poder plantear la ecuación del factor de seguridad para equilibrio de momentos, se deberá efectuar la sumatoria de momentos de todas las dovelas con respecto a un punto en común (Figuras 6.1 – 6.3). Dicha ecuación se escribe de la siguiente manera:

$$\sum Wx - \sum S_m R - \sum Nf + \sum kWe \pm [Dd] \pm Aa = 0 \quad (\text{Ec. 6.3})$$

El término entre corchetes significa que esa fuerza será considerada sólo en aquella dovela en la cual actúa la fuerza. Sustituyendo la Ecuación 6.2 en la Ecuación 6.3 y resolviendo para el factor de seguridad se tiene:

$$F_m = \frac{\sum (c'\beta R + (N - u\beta)R \tan \phi')}{\sum Wx - \sum Nf + \sum kWe \pm [Dd] \pm Aa} \quad (\text{Ec. 6.4})$$

La Ecuación 6.4 es no lineal debido a que la fuerza normal, N, es también función del factor de seguridad. El procedimiento para resolver la ecuación será descrita mas adelante en éste capítulo.

#### 6.2.4 Factor de seguridad para equilibrio de fuerzas

Tomando en cuenta las Figuras 6.1 a 6.3, se realiza la sumatoria de fuerzas en la dirección horizontal para todas las dovelas, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\sum(E_L - E_R) - \sum(N \sin \alpha) + \sum(Sm \cos \alpha) - \sum(kW) + [D \cos \omega] \pm A = 0 \quad (\text{Ec. 6.5})$$

La primera sumatoria de la expresión anterior deberá ser cero cuando el cálculo se realiza con respecto a la masa deslizante total. Sustituyendo la Ecuación 6.2 en la Ecuación 6.5 y resolviendo para el factor de seguridad, se tiene:

$$F_f = \frac{\sum(c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \phi \cos \alpha)}{\sum(N \sin \alpha) + \sum(kW) - [D \cos \omega] \pm A} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

La Ecuación 6.6 es también no lineal, y el procedimiento para resolver la ecuación será descrito mas adelante en este capítulo.

#### 6.2.5 Fuerza normal en la base de la dovela.

La fuerza normal en la base de una dovela es derivada de la sumatoria de fuerzas en la dirección vertical de cada dovela.

$$-W + (X_L - X_R) + N \cos \alpha + S_m \sin \alpha - [D \sin \omega] = 0 \quad (\text{Ec. 6.7})$$

Sustituyendo la Ecuación 6.2 en la Ecuación 6.7 y resolviendo para la fuerza normal, se tiene lo siguiente:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c'\beta \sin\alpha + u\beta \sin\alpha \tan\phi'}{F} + [D \sin\omega]}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha \tan\phi'}{F}} \quad (\text{Ec. 6.8})$$

Es de la práctica común asignarle la variable  $m_\alpha$  al denominador de la Ecuación 6.8. El factor de seguridad, F, puede ser tanto el factor de seguridad para equilibrio de momentos ( $F_m$ ) como el factor de seguridad para el equilibrio de fuerzas ( $F_f$ ).

La Ecuación 6.8 no puede ser resuelta directamente debido a que el factor de seguridad (F) y las fuerzas cortantes entre dovelas ( $X_L$  y  $X_R$ ) son desconocidos.

Una de las soluciones dadas al factor de seguridad, es propuesta por Fellinius (1936), en la cual las fuerzas cortantes y normales que actúan en la interfase de las dovelas son nulas. Cuando las fuerzas son asumidas en la dirección perpendicular a la base de cada dovela, se obtiene la siguiente ecuación de la fuerza normal:

$$N = W \cos\alpha - k W \sin\alpha + [D \cos(\omega + \alpha - 90)] \quad (\text{Ec. 7.9})$$

Utilizando la Ecuación 6.9 y sustituyéndola en las Ecuaciones 6.4 y 6.6, se tiene la primera iteración del factor de seguridad. El factor de seguridad de la Ecuación 6.4 es también conocido como el factor de seguridad del Método Ordinario de Fellinius. Suponiendo que las fuerzas cortantes entre dovelas en la Ecuación 6.8 son iguales a cero, la fuerza normal en la base puede ser calculada de la manera siguiente:

$$N = \frac{W - \frac{c'\beta \sin\alpha + u\beta \sin\alpha \tan\phi'}{F} + [D \sin\omega]}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha \tan\phi'}{F}} \quad (\text{Ec. 6.10})$$

Cuando la Ecuación 6.10 es utilizada en el cálculo del factor de seguridad del Equilibrio de Momentos (Ecuación 6.4), la solución es el factor de seguridad del Método Simplificado de Bishop.

La Ecuación 6.10 puede ser utilizada para resolver el factor de seguridad del equilibrio de fuerzas (Ecuación 6.6). La solución presentada es también conocida como el Método Simplificado de Janbu sin el factor de corrección empírico  $f_0$  (Janbu, Bjerrum, and Kjaernsli, 1956).

### 6.2.6 Fuerzas que actúan en la interfase de las dovelas.

La fuerza cortante que actúa en la interfase de cada dovela es requerida para el cálculo de la fuerza normal que actúa en la base de cada dovela. La fuerza cortante que actúa en la interfase de las dovelas es calculada como un porcentaje de la fuerza normal que actúa en la interfase de las dovelas de acuerdo con la siguiente ecuación empírica, (Morgenstern and Price, 1965):

$$X = E \lambda f(x) \quad (\text{Ec. 6.11})$$

Donde,

$\lambda$  = Porcentaje en forma decimal de la función utilizada.

$f(x)$  = Función que representa la dirección relativa de la resultante de las fuerzas de interfase. La figura 6.4 muestra algunas de las funciones típicas utilizadas.

La figura 6.5 ilustra como la función de fuerzas de interfase  $f(x)$  es utilizada para el cálculo de fuerza cortante en la interfase. Considerando que se utiliza una función senoidal, asuma que la fuerza normal  $E$ , entre la dovela 1 y 2 es 100 kN y el valor de Lambda ( $\lambda$ ) es 0.5. Los límites de la dovela se ubican en el primer cuarto de la superficie de falla. El valor  $f(x)$  en este punto es 0.707 (sin 45). La fuerza cortante  $X$  se calcula entonces como:

$$f(x) = \sin 45 = 0.707$$

$$\lambda = 0.5$$

$$E = 100$$

$$X = 100 \times 0.5 \times 0.707 = 35.35 \text{ kN}$$

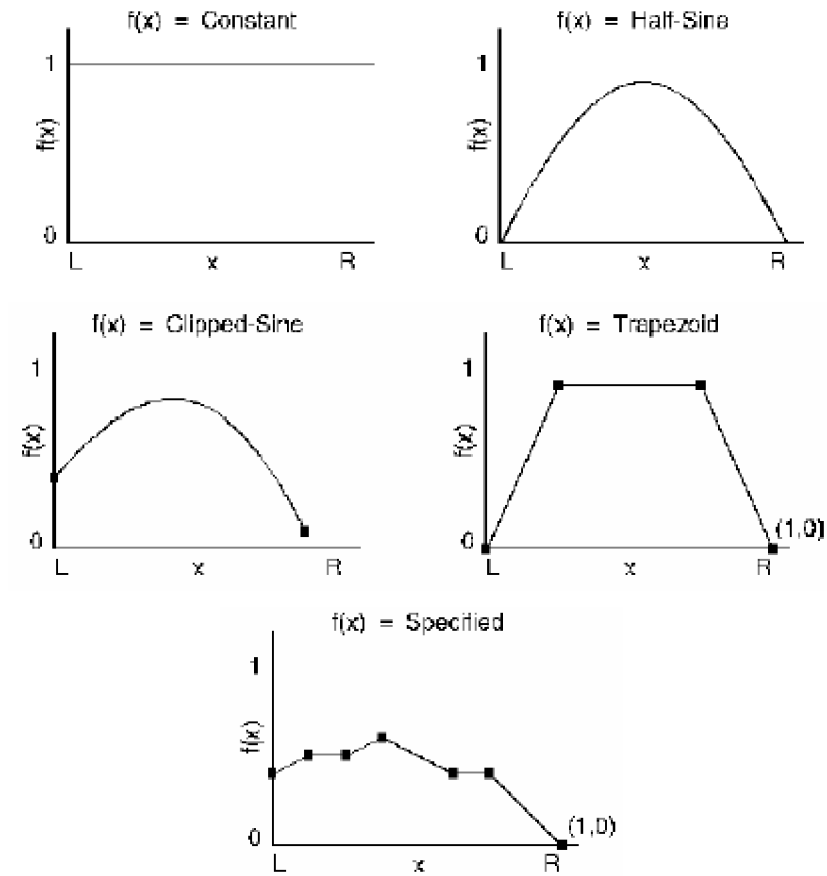


Figura 6. 4 Variación de la dirección de las fuerza de interfase con respecto al eje X. [GEO-SLOPE, 2002]

Para éste ejemplo, la relación de fuerza cortante a fuerza normal varía de cero en la cresta y en el pie, a un máximo de 0.5 en el punto medio de la superficie de falla.

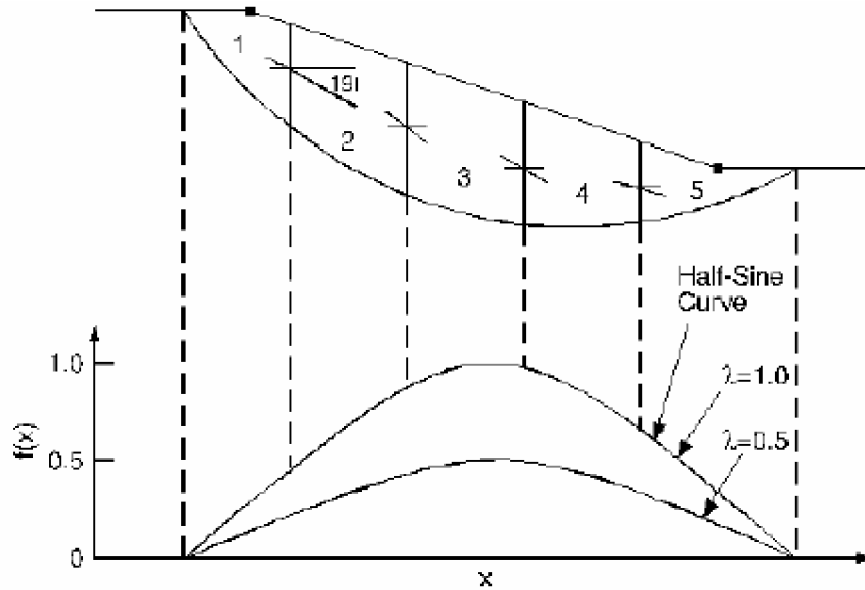


Figura 6. 5 Variación de la dirección de la fuerza de interfase a lo largo de la superficie de falla. [GEO-SLOPE, 2002]

Para cada dovela, sumatoria de fuerzas en la dirección horizontal puede ser escrita como sigue:

$$(E_L - E_R) - N \sin \alpha + S_m \cos \alpha - kW + [D \cos \omega] = 0 \quad (\text{Ec. 6.12})$$

Sustituyendo la Ecuación 6.2 en la Ecuación 6.12, y resolviendo para la fuerza normal en el lado derecho de cada dovela se tiene,

$$E_R = E_L + \frac{(c' \beta - u \beta \tan \phi) \cos \alpha}{F} + N \left( \frac{\tan \phi \cos \alpha}{F} - \sin \alpha \right) - kW + [D \cos \omega] \quad (\text{Ec. 6.13})$$

El cálculo de las fuerzas normales en la interfase de las dovelas se puede realizar de izquierda a derecha a lo largo de la superficie de falla.

### **6.3 Método utilizado por el programa Slope/w de Geo-Slope para el cálculo del factor de seguridad.**

Para calcular los factores de seguridad según los diversos métodos de equilibrio límite, se realizan cuatro etapas para la solución.

#### **6.3.1 Primera etapa**

Para la primera iteración, las fuerzas normales y cortantes entre las dovelas son nulas. El factor de seguridad obtenido para el equilibrio de momentos corresponde al factor de seguridad del Método Ordinario de Fellenius. Este factor de seguridad es utilizado como la primera aproximación correspondiente a la segunda etapa de iteración.

#### **6.3.2 Segunda Etapa**

En la segunda etapa se resuelven las ecuaciones no lineales de los factores de seguridad (Ecuaciones 6.4 y 6.6). El valor  $\lambda$  (relación de fuerza cortante y fuerza normal entre dovelas) se iguala a cero, por lo tanto, la fuerza cortante que actúa en la interfase de las dovelas es nula. Se requieren de 4 a 6 iteraciones para asegurar la convergencia de los factores de seguridad de fuerzas y momentos. La respuesta para la ecuación del equilibrio de momentos corresponde al Método Simplificado de Bishop. La solución del factor de seguridad del equilibrio de fuerzas corresponde al Método Simplificado de Janbu sin la aplicación del factor de corrección empírico,  $f_0$ . El factor de corrección depende de la geometría de la superficie de falla, la cohesión y el ángulo de fricción del suelo. El cálculo del factor de seguridad de Janbu, se deberá realizar manualmente si se requiere utilizar el factor de corrección  $f_0$ . Utilizar Figuras 6.6 y 6.7 para el cálculo manual.



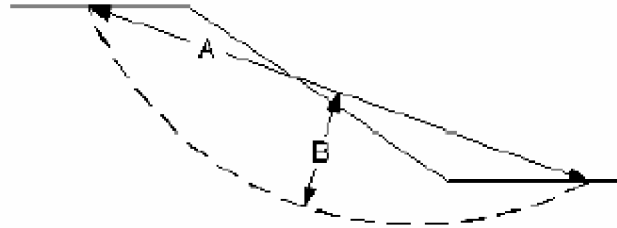


Figura 6. 6 Distancia B definida por Janbu, Bjerrum and Kjaernsli. [GEO-SLOPE, 2002]

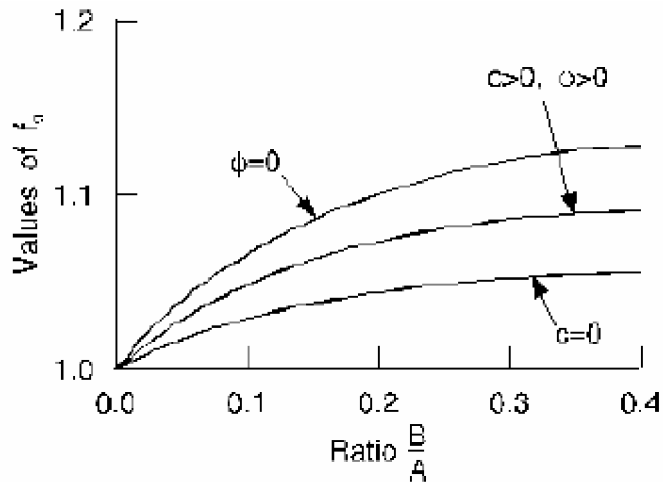


Figura 6. 7 Factor de corrección  $f_0$  del Método simplificado de Janbu. [GEO-SLOPE, 2002]

### 6.3.3 Tercera Etapa

En esta etapa se calculan los factores de seguridad de fuerzas y momentos para aquellos métodos que consideran las fuerzas entre dovelas.

En la etapa 3, el programa calcula un valor de  $\lambda$  que provee el mismo factor de seguridad para equilibrio de fuerzas y momentos. La técnica utilizada es conocida como “Solución Rápida” y es muy similar al Método de convergencia de Newton-Raphson.

En la Solución Rápida se asigna un valor inicial de  $\lambda$  igual a  $2/3$  de la cuerda del talud. (Figura 6.8). Los factores de seguridad de equilibrio de fuerzas y momentos son calculados utilizando esta estimación de lambda. Estos factores de seguridad junto a los obtenidos con el valor de lambda nulo, son utilizados para predecir un valor de lambda tal que los factores de seguridad de equilibrio de momentos y fuerzas sean iguales.

El procedimiento descrito previamente se repite hasta que se cumpla una tolerancia definida previamente. De esta manera se puede realizar el cálculo de factores de seguridad para cualquier función que defina la relación de las fuerzas entre dovelas.

La Figura 6.9 muestra el procedimiento utilizado cuando el factor de seguridad de momentos es mayor que el factor de seguridad de fuerzas, en la Figura 6.10 muestra el procedimiento contrario al descrito anteriormente.

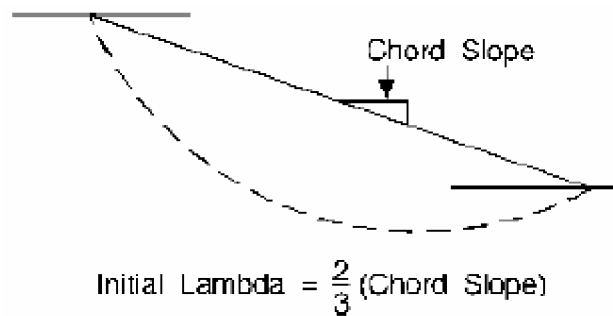


Figura 6. 8 Primera estimación de  $\lambda$  utilizada en la Solución Rápida. [GEO-SLOPE, 2002]

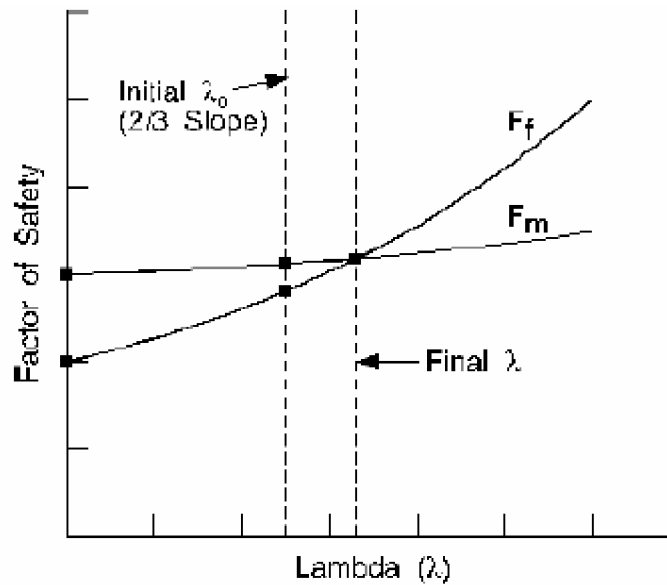


Figura 6. 9 Procedimiento utilizado cuando  $F_m > F_f$  para la estimación  $\lambda_0$ . [GEO-SLOPE, 2002]

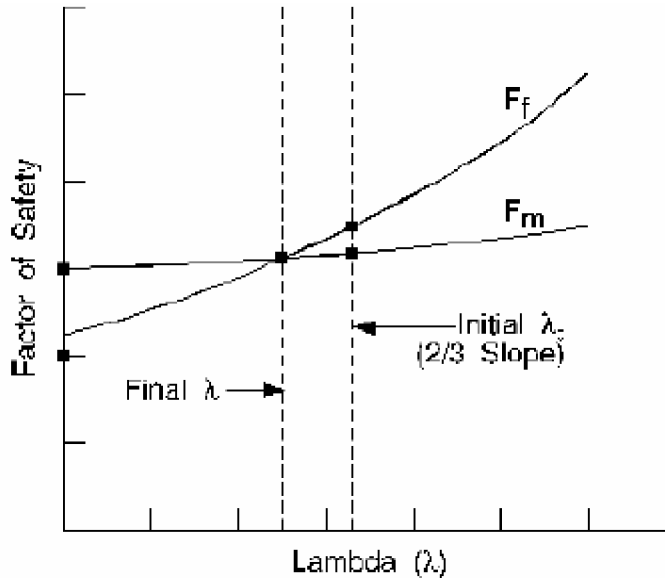


Figura 6. 10 Procedimiento utilizado cuando  $F_m < F_f$  para la estimación  $\lambda_0$  [GEO-SLOPE, 2002]

#### 6.3.4 Cuarta Etapa

La cuarta etapa es realizada cuando se definen valores de  $\lambda$  para el cálculo de factores de seguridad de equilibrio de fuerzas y momentos. Los factores de seguridad pueden ser graficado para varios valores de  $\lambda$  como se demuestra en las Figuras 6.11 y 6.12.

La etapa 4 provee un entendimiento completo de la relación entre los factores de seguridad y la función definida para las fuerzas entre dovelas. También puede ser utilizada para simular todos los métodos de estabilidad que emplean las fuerzas entre dovelas.

En la etapa 4 se realizan las soluciones para los métodos de Corps of Engineers y Lowe-Karafiath. El factor de seguridad es calculado utilizando la ecuación de equilibrio de fuerzas con un valor de  $\lambda$  igual a 1. En la Figura 6.13 se comparan los factores de seguridad obtenidos en distintos métodos de análisis.

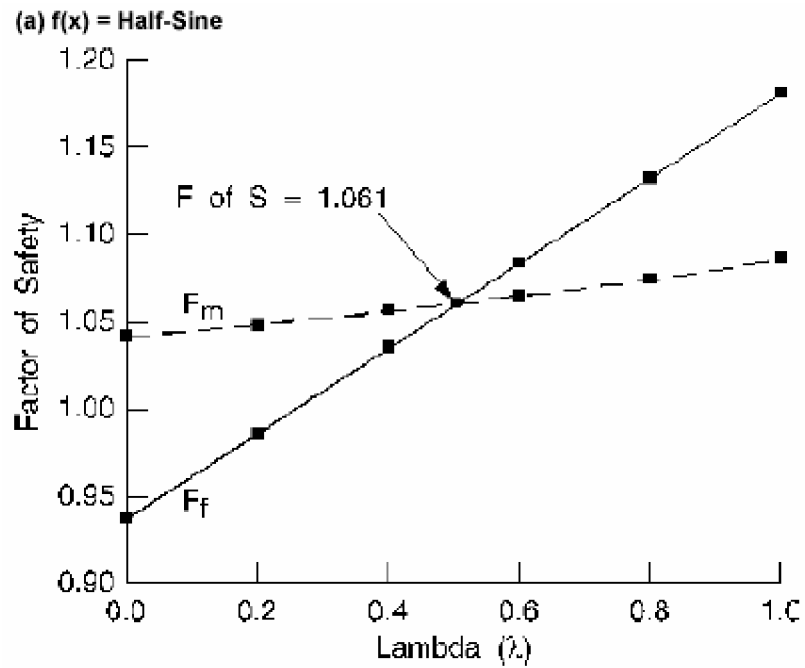


Figura 6. 11 Variación del factor de seguridad respecto a  $\lambda$  cuando la función es senoidal. [GEO-SLOPE, 2002]

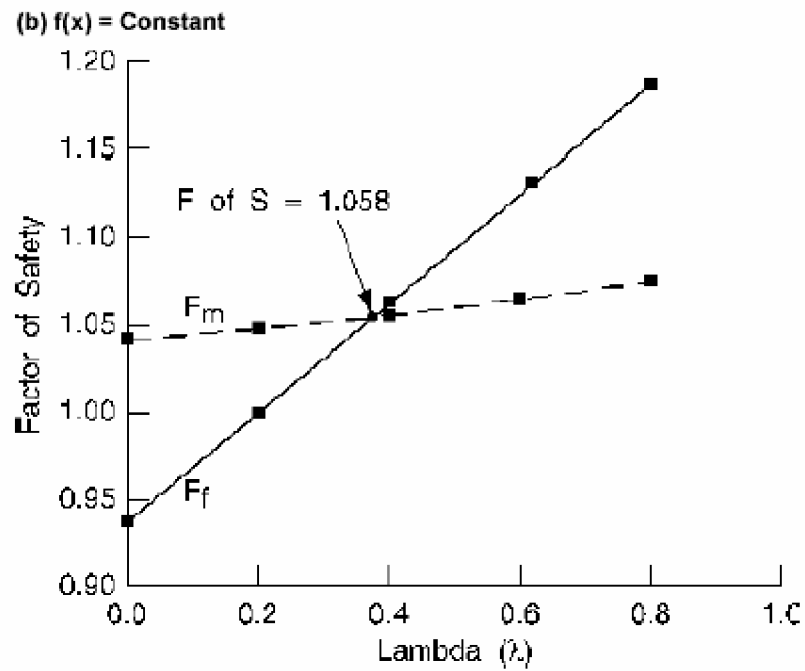


Figura 6. 12 Variación del factor de seguridad respecto a  $\lambda$  cuando la función es constante. [GEO-SLOPE, 2002]

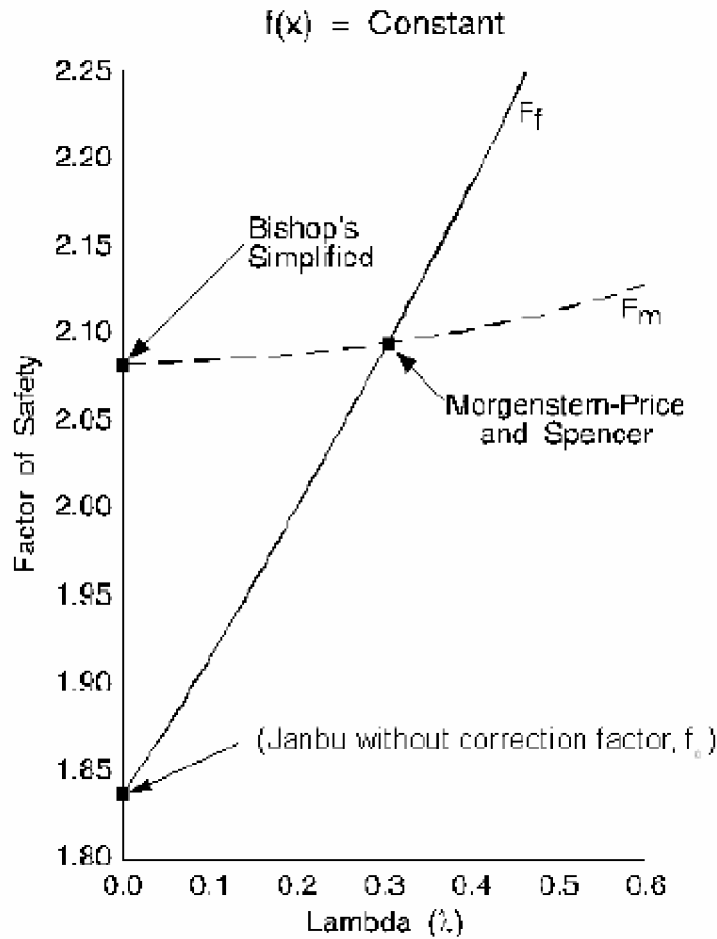


Figura 6. 13 Factores de seguridad obtenidos en distintos métodos. [GEO-SLOPE, 2002]

#### 6.4 Comparación de los diversos métodos

La cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos en todo el mundo son los simplificados de Bishop y de Janbú, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de factores de seguridad que se obtienen por estos dos métodos generalmente, difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern-Price.

Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no es siempre posible, los factores de seguridad determinados con el método de Bishop difieren por aproximadamente el 5% con respecto a soluciones más precisas, mientras el método simplificado de Janbú generalmente, subestima el factor de seguridad hasta valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5%. Esta aseveración fue documentada por Fredlund y Krahn (1977). Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis.

La Tabla 6.3 presenta las condiciones de equilibrio estático que se satisfacen en los diversos métodos. La Tabla 6.4 presenta una comparación de los diversos métodos basados en equilibrio límite.

Tabla 6.3 Condiciones de equilibrio estático que se satisfacen en los diversos métodos. [GEO-SLOPE, 2002]

MÉTODO	DIRECCIÓN VERITCAL *	DIRECCIÓN HORIZONTAL *	EQUILIBRIO DE MOMENTOS
Método Oridinario o de Fellinius	Si	No	Si
Bishop Simplificado	Si	No	Si
Janbu Simplificado	Si	Si	No
Janbu Generalizado	Si	Si	**
Spencer	Si	Si	Si
Morgenstern-Price	Si	Si	Si
GLE	Si	Si	Si
Corps of Engineers	Si	Si	No
Lowe-Karafiath	Si	Si	No

\* Cualquiera de las direcciones ortogonales pueden ser utilizadas para la sumatoria de fuerzas.

\*\* Para el cálculo de la fuerza cortante entre dovelas es utilizado el equilibrio de momentos.

Tabla 6. 4. Métodos basados en equilibrio límite. [<http://albatros.uis.edu.co>, mayo 2005]

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección $F_0$ para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.

## 6.5 Norma técnica para el diseño de estabilidad de taludes, MOP [1994]

### 6.5.1 Consideraciones Generales.

Previamente al diseño de un talud se debe contar con un estudio geotécnico, el que deberá considerar todas las superficies de falla probables así como la localización del nivel freático.

La extensión de la zona a ser considerada en el estudio, será definida por el especialista de suelos de acuerdo a la importancia del talud y a las condiciones del lugar.

Se tomarán medidas para drenar eficientemente las aguas superficiales. Los acueductos y alcantarillados que atraviesen la zona deberán ser capaces de deformarse sin agrietarse.

### 6.5.2 Efecto Estático y Dinámico.

El análisis deberá tomar en cuenta las fuerzas estáticas y sísmicas aplicadas. La fuerza sísmica,  $F_s$ , se determinará multiplicando el peso de cada cuña deslizante (dovela) por el coeficiente sísmico correspondiente el cual se indica a continuación.

El coeficiente sísmico horizontal  $k_h$ , se tomará igual a 0.16 para la zona I y 0.12 para la zona II. El coeficiente sísmico vertical se tomará igual a cero para ambas zonas.

En la Figura 6.14 se muestran las zonas sísmicas en las que ha sido dividido El Salvador. Los factores de seguridad se indican en la Tabla 6.5.

Tabla 6. 5 Factores de seguridad recomendados por el Reglamento de Diseño, MOP [1994: p.13].

Condición	Combinación de Fuerzas	FS
1	$F_g$	1.4
2	$F_g + F_f + F_s$	1.1



Donde:

$F_g$  : Fuerzas gravitacionales.

$F_f$  : Fuerzas debidas a la filtración.

$F_s$  : Fuerzas sísmicas.

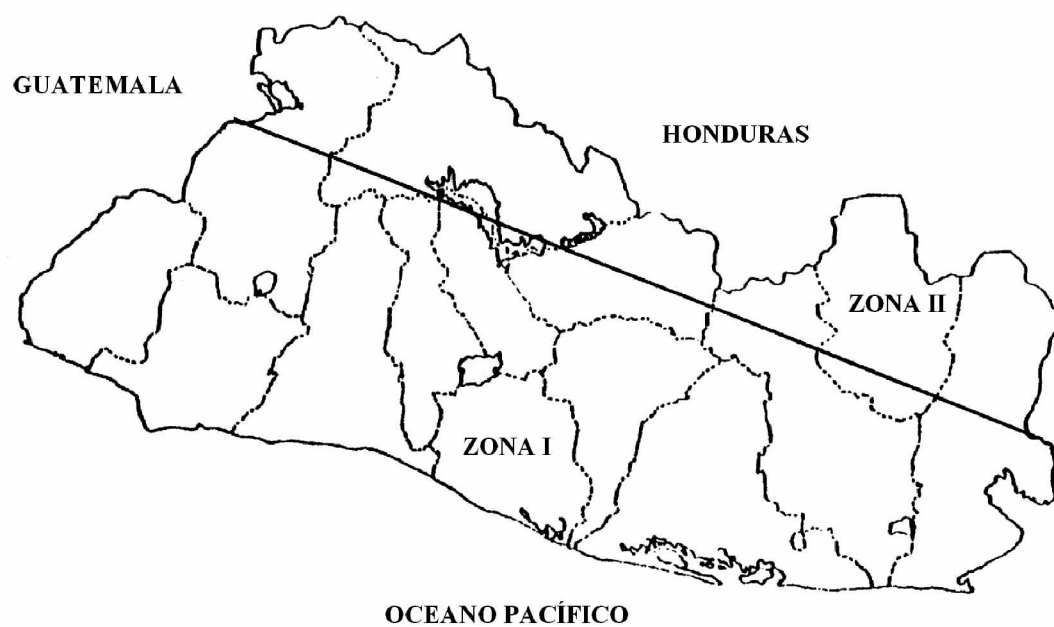


Figura 6. 14 Mapa de zonificación sísmica.

## **7 ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS.**

Para llevar a cabo la labor de recolección de datos y su análisis, se deben realizar trabajos de campo y de oficina, lo cual incluye:

- Reconocimiento del lugar de la obra.
- Información topográfica.
- Establecer las características del área tributaria del río. (cuenca).
- Información hidrometeorológica.
- Evaluación de caudales.

### **7.1 Reconocimiento del lugar de la obra**

Se deben efectuar inspecciones con el objeto de observar el comportamiento de la sección o secciones a analizar, al igual que el comportamiento de la quebrada aguas arriba y aguas abajo de las secciones de análisis, con el fin de calcular desniveles, curvas o cambios bruscos de dirección.

### **7.2 Información topográfica.**

A partir de los planos topográficos se obtiene la siguiente información:

- Levantamiento de la sección transversal en el lugar del proyecto, para establecer el área hidráulica y nivel de aguas máximas.
- Levantamiento de las secciones transversales de la quebrada, una distancia considerable aguas arriba y aguas abajo, con el propósito de observar el comportamiento de la sección hidráulica.
- Estimación de la dirección y pendiente de la quebrada, mediante un levantamiento del eje longitudinal del mismo, en una distancia abundante aguas arriba y abajo.

### **7.3 Establecimiento de las características del área tributaria del río (cuenca).**

En base a una hoja cartográfica o por medio de un levantamiento topográfico se determinan las características físicas de una cuenca. Se resumen de la siguiente manera:

#### **7.3.1 Área de drenaje.**

Se debe determinar cuál es el área de cuenca que produce el escurrimiento que drena la quebrada aguas arriba del sitio a analizar, esto a través de una restitución cartográfica.

#### **7.3.2 Pendiente media de la cuenca**

Este es un elemento físico importante para determinar el comportamiento del régimen del cauce y definir si se encuentra entre una cuenca montañosa o de valle.

Para su determinación se utiliza el método de Horton el cual dice:

$$P_m = d/L \quad (\text{Ec. 7.1})$$

Donde:

P<sub>m</sub> : Pendiente media de la cuenca.

d: diferencia de nivel entre dos curvas.

L: longitud del cauce comprendido entre las curvas

#### **7.3.3 Pendiente media del cauce**

Esta pendiente se calcula usualmente, tomando la diferencia de nivel entre el nacimiento y el punto en estudio, dividida por la longitud del mismo

La pendiente media del cauce tiene gran incidencia en los caudales que la corriente principal conduce a lo largo del mismo. Conociendo la pendiente media del cauce, se

puede calcular el caudal circulante en base a las características físicas de un tramo y de su comportamiento hidráulico, basándose en el principio de que el río se comporta como un canal abierto.

#### **7.3.4 Vegetación y condición de suelo.**

La densidad y tipo de vegetación, así como las condiciones del suelo de una cuenca son factores que influyen tanto con la facilidad que puede tener el agua para infiltrarse, como en la velocidad que pueda desarrollar en las laderas de la cuenca.

#### **7.4 Información hidrometeorologica**

Dentro de la información hidrometeorologica se tiene:

- Distribución de la precipitación en el espacio. Se realiza por medio de métodos como la media aritmética, isoyetas y Thiesen que dan la precipitación promedio para un área específica.
- Distribución de la precipitación en el tiempo. Esta distribución puede realizarse mediante el uso de histogramas que son gráficos que representan la variación de la precipitación con respecto al tiempo.

#### **7.5 Evaluación de los caudales**

Existen varios métodos para la obtención del caudal de acuerdo a la cantidad y tipo de información hidrometeorológica.

Cuando se tiene información de precipitación en cantidad e intensidad, el caudal puede ser obtenido a partir del método que se describe a continuación:

### 7.5.1 El método de la fórmula racional

Este método es el que mejor se adapta para la determinación de la descarga de diseño cuando se tiene este tipo de información. La fórmula racional expresa que la descarga es igual a un porcentaje de la precipitación multiplicado por el área de la cuenca

La fórmula racional es la siguiente:

$$Q = CIA \quad (\text{Ec. 7.2})$$

Donde:

Q : descarga en  $\text{m}^3/\text{seg}$

C : Coeficiente de escorrentía

I : intensidad de la precipitación en  $\text{mm}/\text{minuto}$

A : área de la cuenca en  $\text{km}^2$

Para la aplicación de la fórmula racional se requiere el conocimiento del coeficiente de escorrentía, del tiempo de concentración, intensidad de lluvia correspondiente y el área de la cuenca a drenar.

a) Coeficiente de escorrentía (C)

Cuando se cuenta con información hidrometeorológica se procede de la siguiente manera:

- Se calcula la precipitación media de la cuenca (mensual o anual).
- Se transforma la información de caudales (mensual o anual) a lámina.
- Se determina el coeficiente de la escorrentía a través de la siguiente expresión:

$$C = Q/\text{Prem} \quad (\text{Ec. 7.3})$$

Donde:

Q: caudal transformado en lámina en mm

Prem: precipitación media en mm

En caso de no contar con información hidrometeorológica, el coeficiente de escorrentía se obtiene de tablas en las cuales se recomiendan valores dependiendo del tipo de superficie, vegetación y pendiente.

b) Tiempo de concentración

El tiempo de concentración puede calcularse por medio de las siguientes fórmulas:

La fórmula de Kirpich:

$$T_c = \frac{0.0078 * \left( \frac{1000 * L_c}{0.3048} \right)^{0.77}}{S_c^{0.385}} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Donde:

Lc : Longitud máxima del río desde aguas arriba hasta la salida en kms.

S : pendiente de la cuenca (adimensional) o H/Lc donde H es la diferencia de elevación entre el punto más remoto de la cuenca y el punto de interés.

Tc : Tiempo de concentración en min.

La fórmula de California:

$$T_c = 60 * \left[ 11.9 * \frac{\left( \frac{L_c}{1.6} \right)^3}{\frac{H}{0.3048}} \right]^{0.385} \quad (\text{Ec. 7.5})$$

Donde:

Lc : Longitud máxima del río desde aguas arriba hasta la salida en kms.

H : Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida en m.

Tc : Tiempo de concentración en min.

Intensidad de precipitación

Un procedimiento para el cálculo de la intensidad de la precipitación en función de frecuencia y duración es:

- Considerar la duración de la lluvia igual al tiempo de concentración.
- Ordenar la información de precipitación para la duración encontrada, de menor a mayor y aplicar una ley estadística para eventos máximos.
- Relacionar los datos de intensidad conocida contra frecuencia.
- Con el gráfico definido, se deberá fijar un período de diseño para calcular la intensidad que le corresponde.

Con el Tc y un período de retorno definido, y utilizando las curvas intensidad-duración-frecuencia para la estación más cercana a la zona de estudio se encuentra la intensidad de diseño.

c) Área de drenaje.

El área de drenaje puede encontrarse por medio de restituciones cartográficas o por los métodos convencionales de topografía.

## **7.6 Control de aguas superficiales y subterráneas**

Los métodos de estabilización de deslizamientos que contemplen el control del agua, tanto superficial como subterránea son muy efectivos y son generalmente, más económicos que la construcción de grandes obras de contención, en cuanto tienden a desactivar la presión de poros, considerada como el principal elemento desestabilizante de los taludes. El drenaje reduce el peso de la masa y al mismo tiempo aumenta la resistencia del suelo al disminuir la presión de poros.

Existen varias formas de drenaje, superficial y profundo. El objetivo principal de estos métodos es el de disminuir la presión de poros y en esa forma aumentar la resistencia al corte y eliminar las fuerzas hidrostáticas desestabilizantes. El factor de seguridad de cualquier superficie de falla que pasa por debajo del nivel de agua puede ser mejorado por medio de subdrenaje.

### **7.6.1 Drenaje superficial**

El objetivo principal del drenaje superficial es mejorar la estabilidad del talud o relleno reduciendo la infiltración y evitando la erosión.

El sistema de recolección de aguas superficiales debe captar la escorrentía tanto del talud como de la cuenca de drenaje arriba del talud y llevar el agua a un sitio seguro lejos del deslizamiento. El agua de escorrentía debe en lo posible, desviarse antes de que penetre el área del deslizamiento. Esto puede lograrse con la construcción de zanjas interceptoras en la parte alta del talud, llamadas zanjas de coronación. No se recomienda en problemas de taludes la utilización de conducciones en tubería por la alta susceptibilidad a agrietarse o a taponarse, generando problemas de infiltración masiva concentrada.

Por otro lado el agua que cae por lluvias directamente sobre la superficie del talud, debe ser evacuada lo más rápidamente posible, evitando al mismo tiempo que su paso cause daños considerables al talud, por erosión, almacenamientos e infiltraciones; perjuicios que pueden



ser evitados, tratando el talud con una serie de medidas que favorezcan el drenaje. Entre las más utilizadas son: sellado de grietas con arcilla, imprimación del talud con asfalto, recubrimiento con plásticos, recubrimiento parcial o total con enrocado, conformación y nivelación para evitar o eliminar depresiones y alcantarillas superficiales.

En ocasiones es importante la construcción de medidas temporales de drenaje superficial después de ocurrido un deslizamiento para evitar su ampliación o aceleración. Estas obras pueden consistir en diques o canales de bolsas de polipropileno o fibras vegetales rellenas de suelo.

Generalmente se recomienda para diseño de obras de drenaje en taludes, la utilización del método racional para calcular las cantidades de agua recogida, debido a que los caudales calculados por la fórmula racional tienen intrínsecamente un factor de seguridad mayor que otros métodos.

#### **a) Canales o zanjas de corona**

Las zanjas en la corona o parte alta de un talud son utilizadas para interceptar y conducir adecuadamente las aguas lluvias, evitando su paso por el talud.

La zanja de coronación no debe construirse muy cerca al borde superior del talud, para evitar que se conviertan en el comienzo y guía de un deslizamiento. Se recomienda que las zanjas de coronación sean totalmente impermeabilizadas, así como debe proveerse una suficiente pendiente para garantizar un rápido drenaje del agua captada. Se sugiere que al menos cada dos años se deben reparar las zanjas de coronación para impermeabilizar las fisuras y grietas que se presenten.

Las dimensiones y ubicación de la zanja pueden variar de acuerdo a la topografía de la zona y al cálculo previo de caudales colectados. Se procura que queden localizadas a lo largo de una curva de nivel para un correcto drenaje y que estén suficientemente atrás de las grietas de tensión en la corona

- **Diseño de Zanjas de corona o Canales de drenaje**

El gradiente mínimo de los canales es determinado por la velocidad de flujo necesaria para evitar la sedimentación. La velocidad no debe ser menor de 1.3 m/segundo para el flujo pico.

El dimensionamiento del canal puede hacerse por medio de tablas o utilizando la fórmula de Manning, asumiendo una velocidad máxima permisible de 4 m/seg. y una rugosidad de 0.013.

La fórmula de Manning es la siguiente:

$$Q = \frac{A * S^{1/2} R^{2/3}}{n}, \quad R = \frac{A}{Pm} \quad (\text{Ec. 7.6})$$

Donde:

Q : Caudal en m<sup>3</sup>/s

A : Área de la sección del flujo en m<sup>2</sup>

R : Radio hidráulico en m

Pm : Perímetro mojado en m

n : Coeficiente de rugosidad.

Las uniones de canales representan el problema más delicado en un sistema de drenaje. Ellos inevitablemente causan turbulencia adicionado por la vulnerabilidad a ser bloqueado por cantos de material. Se recomienda en las uniones ampliar la sección de los canales para darles una mayor capacidad y contener la turbulencia.

## **b) Canales colectores y disipadores**

Los canales deben conducirse a entregas en gradería u otro disipador de energía que conduzca el agua recolectada hasta un sitio seguro. Se presentan dos tipos diferentes de canales: El canal rápido y el canal en gradería. El canal rápido se construye a una pendiente igual a la del talud y en ocasiones se le colocan elementos sobresalientes en su fondo para disipar energía. Este sistema es muy utilizado por ser más económico, pero presenta el problema de la poca energía disipada.

El sistema de graderías es más eficiente para disipar energía. El flujo en este tipo de canal es turbulento y debe construirse un muro lateral de borde libre suficiente para permitir la salpicadura del flujo. En la ausencia de datos experimentales, los canales en gradería pueden diseñarse utilizando ábacos, asumiendo una velocidad de 5.0 m/seg., a través de la sección mínima en la cabeza de cada grada.

### **7.6.2 Drenaje subterráneo.**

El drenaje subterráneo tiene por objeto disminuir las presiones de poro o impedir que éstas aumenten. La cantidad de agua recolectada por un sistema de subdrenaje depende de la permeabilidad de los suelos o rocas y de los gradientes hidráulicos. Cuando se instala un dren generalmente, el nivel piezométrico se disminuye al igual que el gradiente hidráulico, lo cual disminuye el caudal inicial recolectado por los drenes.

#### **a) Subdrenes Interceptores**

Los subdrenes interceptores son zanjas excavadas a mano o con retroexcavadora, rellenas de material filtrante y elementos de captación y transporte del agua, como muestra la Figura 7.1. La profundidad máxima de estas zanjas es de aproximadamente seis metros. Los hay de diversas formas así:

- Con material de filtro y tubo colector.
- Con material grueso permeable sin tubo (filtro francés)
- Con geotextil como filtro, material grueso y tubo colector.
- Con geotextil, material grueso y sin tubo.
- Tubo colector con capa gruesa de geotextil a su alrededor.
- Dren sintético con geomalla, geotextil y tubo colector

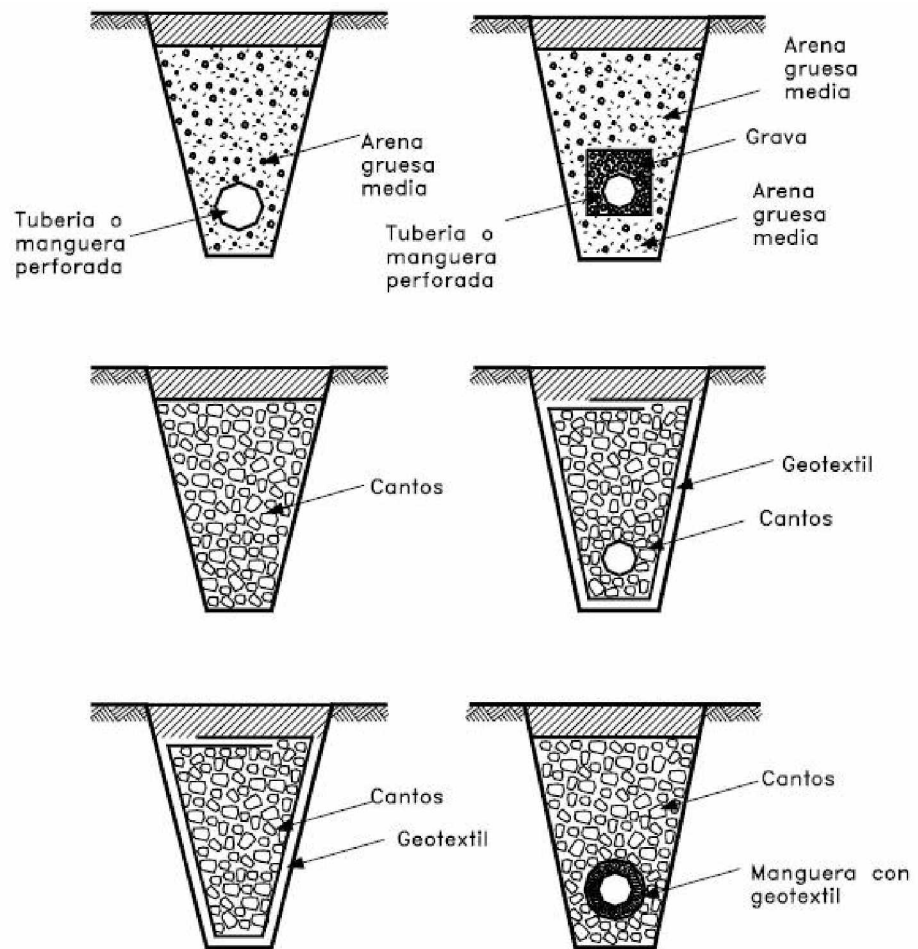


Figura 7. 1 Sistemas de dren de zanja [http://albatros.uis.edu.co, mayo 2005]

El tipo de dren interceptor a emplear dependerá de:

1. Disponibilidad de materiales en la región y costos.
2. Necesidad de captación y caudal del dren.

## b) Material de filtro

Es conveniente tener en cuenta que los drenes tratan de taponarse por transporte y depositación de las partículas más finas del suelo. Para evitar este fenómeno se debe colocar un filtro que debe cumplir los siguientes objetivos:

- Impedir el paso de las partículas finas del suelo a proteger.
- Permitir la filtración rápida del agua.

Existen dos tipos generales de filtro:

- Material granular natural filtrante.
- Filtro de mantos sintéticos o geotextiles.

Se requiere escoger muy cuidadosamente el material de filtro y / o el tipo y calidad del geotextil a emplear.

### 7.6.3 Colchones de drenaje

Las capas de material drenante que se colocan debajo de terraplenes, generalmente después de remover los suelos sueltos se les conoce como colchones de drenaje (Figura 7.2). Generalmente, consisten en una capa de material grueso permeable de 20 a 50 centímetros de espesor envuelto por dos mantos de geotextil. En ocasiones se colocan mangueras o tuberías perforadas para la recolección del agua captada por el colchón de drenaje.

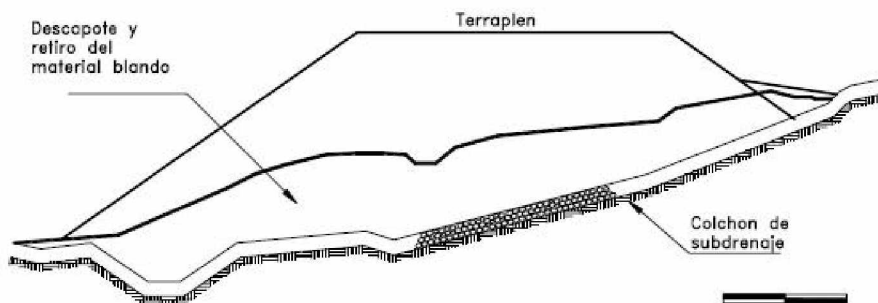


Figura 7. 2 Diagrama de un colchón de drenaje colocado debajo de un terraplén. [<http://albatros.uis.edu.co>, mayo 2005]

## 8 DISEÑO. SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS

### 8.1 Diseño del relleno

El relleno está diseñado bajo el concepto en el cual la cabecera de la quebrada El Cacao será un botadero legal, por tal razón no se sabe la procedencia ni el tipo de material a depositar.

#### 8.1.1 Estudio hidrológico e hidráulico de la quebrada el cacao

En la hoja cartográfica a escala 1:5000 correspondiente a la zona del proyecto, Figura 8.1, se identificó la cuenca que drena a la quebrada El Cacao, luego se calcularon los valores de área, perímetro, longitud de cuenca, altura máxima, altura mínima y pendiente promedio del proyecto tal como se muestra en las Tablas 8.1 y 8.2.

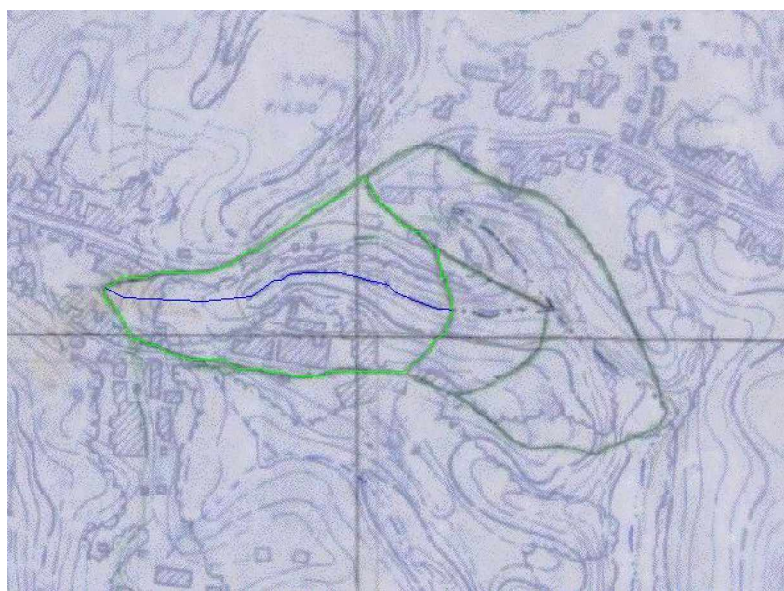


Figura 8. 1 Cuenca El Cacao.

Tabla 8. 1 Parámetros de Cuenca El Cacao

Área de Cuenca	28144.3254 m <sup>2</sup>
Perímetro de Cuenca	754.4019 m
Longitud de la Cuenca	302.9981 m
Altura máxima	722
Altura mínima	688
Pendiente de la Cuenca	0.12

Tabla 8. 2 Determinación de la pendiente promedio de Cuenca El Cacao.

H	L	Pendiente(s)	
716	0		
715	1.9	0.53	
714	4.25	0.43	
713	6.2	0.51	
712	8.2	0.50	
711	9.15	1.05	
710	10.7	0.65	
709	12	0.77	
708	13.2	0.83	
707	14.2	1.00	
706	18	0.26	
705	21.6	0.28	
704	25.4	0.26	
703	30	0.22	
702	37.2	0.14	
701	43.4	0.16	
700	51.2	0.13	
699	65.5	0.07	
698	81.4	0.06	
697	129.1	0.02	
696	134.1	0.20	
695	135.7	0.63	
694	138.1	0.42	
693	148.5	0.10	
692	158.9	0.10	
691	175.8	0.06	
690	208.4	0.03	
689	216.8	0.12	
688	219.9	0.32	
Suma		9.83	
s promedio		0.14	De 0 a 130 m
s promedio		0.10	De 130 a 220 m
s promedio		0.12	De 0 a 220 m

- **Determinación del caudal**

Con los datos de la Tabla 8.1, se procedió a encontrar el tiempo de concentración con el uso de diferentes fórmulas: Kirpich y California para escoger el cálculo más desfavorable. Posteriormente y debido a la cercanía del proyecto se utilizó la Tabla 8.3 intensidad-duración- frecuencia estación Ilopango, se entra a dicha tabla con el tiempo de concentración calculado y un período de retorno acorde al tipo de estructura a diseñar para obtener la intensidad de precipitación con la que se trabajará. Finalmente utilizando la fórmula racional se procedió a encontrar el caudal.

Tabla 8. 3 Tabla de intensidad-duración-frecuencia, estación Ilopango.

Cálculos de intensidad estación Ilopango													
Año	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	
1953	1.98	1.95	1.87	1.66	1.36	1.06	0.81	0.69	0.33	0.27	0.23	0.18	
1954	3.00	2.10	1.56	1.53	1.11	0.78	0.66	0.45	0.34	0.24	0.21	0.17	
1955	2.48	2.05	1.97	1.34	1.61	1.29	1.01	0.69	0.52	0.43	0.38	0.30	
1956	2.12	2.03	2.00	1.78	1.36	1.01	0.78	0.57	0.44	0.37	0.31	0.24	
1957	2.26	2.06	1.68	1.40	1.19	0.85	0.66	0.52	0.40	0.27	0.23	0.14	
1958	2.38	1.89	1.65	1.43	1.16	0.84	0.68	0.49	0.38	0.32	0.27	0.21	
1959	3.68	2.94	2.63	2.48	2.01	1.44	1.11	0.76	0.58	0.48	0.42	0.32	
1960	2.02	2.00	1.91	1.52	1.29	0.91	0.72	0.55	0.44	0.36	0.31	0.24	
1961	2.66	2.16	1.91	1.67	1.47	1.10	0.84	0.37	0.30	0.27	0.26	0.23	
1962	2.58	2.25	1.97	1.62	1.41	1.08	0.85	0.59	0.46	0.38	0.32	0.24	
1963	2.44	2.00	1.72	1.54	1.32	1.05	0.86	0.64	0.52	0.38	0.33	0.26	
1964	2.22	2.02	1.89	1.82	1.54	1.23	0.99	0.67	0.50	0.42	0.20	0.14	
1965	3.42	2.83	2.27	1.88	1.38	0.94	0.74	0.51	0.40	0.33	0.28	0.22	
1966	2.05	2.02	1.68	1.51	1.34	0.95	0.74	0.47	0.41	0.34	0.28	0.12	
1967	3.14	1.90	1.49	1.28	1.01	0.80	0.70	0.59	0.43	0.40	0.34	0.16	
1968	2.40	2.37	2.31	2.07	1.64	1.22	0.98	0.78	0.74	0.71	0.60	0.20	
1969	1.50	1.47	1.31	1.10	0.98	0.86	0.80	0.58	0.45	0.37	0.31	0.15	
1970	2.66	2.33	2.19	2.01	1.60	1.25	0.98	0.71	0.58	0.51	0.46	0.36	
1971	2.74	2.37	1.97	1.54	1.47	1.08	0.82	0.57	0.44	0.37	0.32	0.25	
1972	2.12	1.64	1.42	1.30	0.99	0.70	0.53	0.37	0.30	0.24	0.21	0.17	
1973	3.94	2.82	2.06	1.86	1.67	1.23	1.00	0.76	0.36	0.35	0.21	0.16	
1974	2.00	1.94	1.64	1.46	1.25	0.93	0.76	0.51	0.39	0.32	0.27	0.26	
1975	2.08	1.84	1.79	1.56	1.39	1.34	1.22	0.85	0.65	0.54	0.40	0.35	
1976	3.46	2.43	1.81	1.48	1.11	0.83	0.71	0.54	0.46	0.37	0.31	0.24	
1977	2.50	1.72	1.51	1.30	0.95	0.73	0.55	0.43	0.33	0.26	0.24	0.22	
1978	2.70	1.75	1.55	1.31	1.30	0.97	0.78	0.64	0.52	0.45	0.38	0.21	
1979	2.28	2.18	1.88	1.68	1.27	1.11	0.87	0.64	0.61	0.50	0.43	0.34	
1980	2.22	2.12	2.09	2.06	1.61	1.10	0.84	0.58	0.47	0.40	0.34	0.26	
1981	1.94	1.84	1.58	1.44	1.45	1.03	0.79	0.60	0.46	0.38	0.26	0.22	
1982	2.06	1.93	1.62	1.45	1.35	1.13	0.87	0.59	0.45	0.36	0.31	0.26	
1983	2.08	1.97	1.55	1.37	1.28	0.97	0.66	0.58	0.46	0.43	0.36	0.23	
1984	2.48	2.21	1.93	1.64	1.57	1.12	0.86	0.57	0.43	0.34	0.30	0.17	
<b>Xprom</b>		2.49	2.10	1.83	1.60	1.36	1.03	0.82	0.59	0.45	0.38	0.32	0.23
<b>Desviación</b>		0.55	0.33	0.29	0.29	0.23	0.18	0.15	0.11	0.10	0.10	0.09	0.06
Tr	F												
25	0.04	3.61	2.77	2.41	2.18	1.84	1.40	1.13	0.82	0.66	0.58	0.49	0.35
50	0.02	3.92	2.95	2.57	2.34	1.96	1.50	1.21	0.88	0.71	0.63	0.54	0.39



Los períodos de retorno utilizados para el dimensionamiento de los elementos de drenaje fueron los que se muestran en la Tabla 8.4:

Tabla 8. 4 Períodos de retorno mínimo para elementos de drenaje. [Monsalve, 1999]

Tipo de elemento de drenaje	Período de retorno mínimo (años)
Obras de Drenaje menor	25
Obras de Drenaje Mayor	50

Debido a que existe una abundante vegetación en la quebrada (Figura 8.2), se escogió un coeficiente de escorrentía  $C=0.5$ , el cual es recomendado para suelos muy permeables según [Ven Te Chow, 1999].

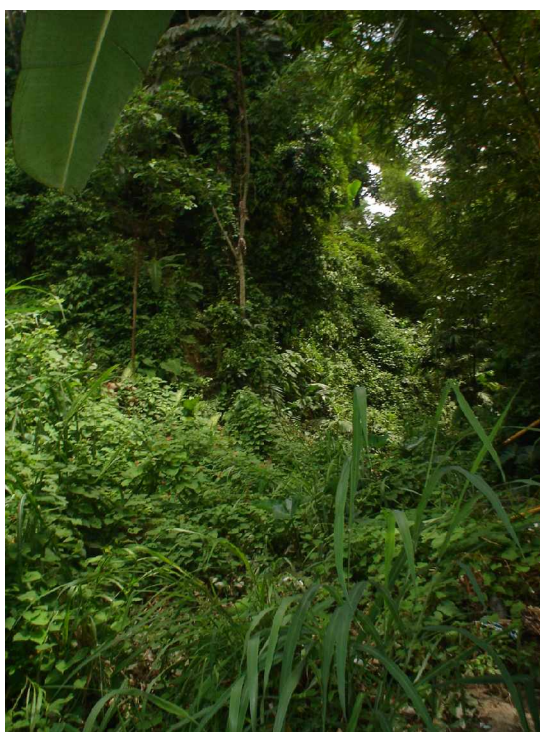


Figura 8. 2 Vegetación existente en la quebrada El Cacao.

Algunos de los árboles observados en la quebrada El Cacao son: maquilishuat, zunza, guarumo, castaño, bambú, llama del bosque, brazil, mano de león, pito, tempisque, rajabien, mango, paterno, Zapotillo, zunza, aceituno, pepeto, flor de fuego.

En las visitas realizadas a la quebrada se observó que existe una tubería de aguas lluvias que descarga al inicio de la quebrada, ésta tiene un diámetro de 18 pulgadas, la cota a la que se encuentra no está ubicada en el estudio topográfico original por lo que el dato fue proporcionado posteriormente por la alcaldía del municipio y fue agregado en el plano topográfico.

El procedimiento para el cálculo de caudal de la cuenca de la quebrada se muestra en la Tabla 8.5.

Tabla 8. 5 Cálculo de caudal de la cuenca El Cacao.

Datos:			
AREA=	0.028	km <sup>2</sup>	
PERÍMET=	0.754	km	
Lc=	0.303	km	
Hmáx=	716.00	msnm	
Hmín=	690.00	msnm	
Hmed=	703.00	msnm	
Tc=	4.19	min	Fórmula de Kirpich
Tc=	4.112686	min	Fórmula de California
scauce=	0.08		Pend promedio del cauce

Q =	ciA	
C =	0.50	adim
i=	3.92	mm/min
A =	28144.33	m <sup>2</sup>
K	0.00	
Q =	0.92	m <sup>3</sup> /s

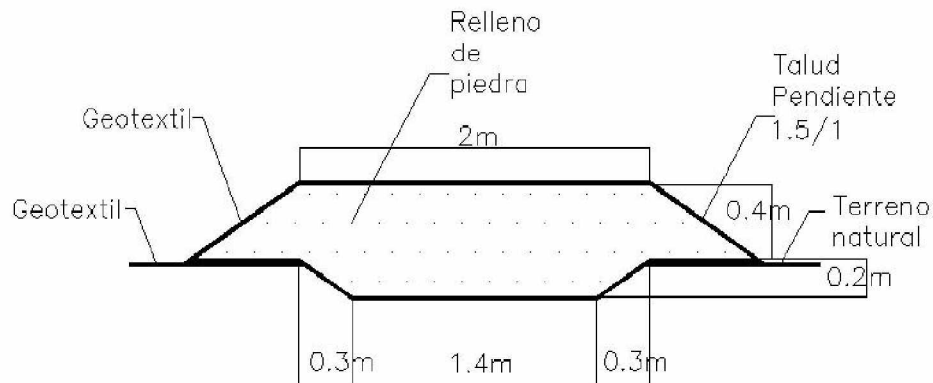
- **Cálculo del área hidráulica para el drenaje subterráneo.**

Para la conformación del relleno es importante la correcta evacuación del agua lluvia para evitar socavaciones en el mismo, por lo que se diseñará un drenaje subterráneo para extraer el agua infiltrada en la zona del relleno. Se diseñó el drenaje subterráneo como un canal trapezoidal y además se consideraron las condiciones de permeabilidad que tendrá dicho drenaje subterráneo ya que estará relleno con piedra que ocasiona que el área hidráulica se

reduzca a la mitad aproximadamente. Para el diseño se asume que sólo deja pasar la mitad del caudal que drenaría un canal trapezoidal sin el relleno de piedra. Véase la Tabla 8.6 para el cálculo de la sección y la Figura 8.3.

Tabla 8. 6 Cálculo del área hidráulica para el drenaje subterráneo.

Asumiendo una sección trapezoidal:	
b =	2.00 m
z =	1.50 :1
y =	0.40 m
n concreto =	0.013
s canal =	0.005
$Q = 1/n * R^{2/3} s^{1/2} A$	Fórmula de Manning
$A = by + zy^2$	Area
$P = b + 2 (y^2 + (zy)^2)^{0.5}$	Perímetro mojado
$R = A/P$	Radio hidráulico
A =	1.04 m <sup>2</sup>
P =	3.4422 m
R =	0.3021 m
$Q_{\text{canal}} = 2.5470536 \text{ m}^3/\text{s}$	← Capacidad máx del canal trapezoidal sin relleno de piedra



DETALLE DRENAJE SUBTERRANEO

Figura 8. 3 Drenaje subterráneo.

Para el diseño del drenaje superficial para evacuar el agua proveniente del relleno y los taludes generados en la col. 3 de Mayo, la calle Alberto Masferrer y la calle Agustín Campos se ocupó la ecuación de Manning y se verificó que las velocidades mínimas fueran

mayores a 0.3 m/s y las velocidades máximas fueran menores que 6 m/s. Las dimensiones de los canales se muestran en la Tabla 8.7.

Tabla 8. 7 Dimensiones de los canales.

DRENAJE SUPERFICIAL EN EL CONTORNO DEL RELLENO (CANAL RECTANGULAR)											
Para todos los cálculos hidráulicos se utilizó la ecuación de Manning, se verificó que $v_{máx} < 6m/s$											
CANALETAS RECTANG. QUE VAN DEL LADO SUR DEL CONTORNO DEL RELLENO (En la base de taludes de la col. 3 de Mayo)											
Tramos	Ancho izq(m)	Longitud(m)	Longitud acum(m)	Área izq(m <sup>2</sup> )	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q Acumulado(m <sup>3</sup> /s)	s	y(m)	borde libre(m)	Altura(m)	Base(m)
Q tub 18 pulg					0.2974						
1-2	50.20	18.59	40.00	933.22	0.03	0.33	0.02	0.25	0.08	0.35	0.50
2-3	33.52	20.00	60.00	670.40	0.02	0.35	0.02	0.25	0.08	0.35	0.50
3-4	27.98	20.00	80.00	559.60	0.02	0.36	0.02	0.30	0.09	0.40	0.55
4-5	29.40	20.00	100.00	588.00	0.02	0.38	0.02	0.30	0.09	0.40	0.55
5-6	44.89	20.00	120.00	897.80	0.03	0.41	0.02	0.30	0.09	0.40	0.55
6-7	14.93	20.00	140.00	298.60	0.01	0.42	0.02	0.30	0.09	0.40	0.55
7-8	51.88	24.67	164.67	1279.88	0.04	0.45	0.02	0.30	0.09	0.40	0.55
8-9	53.50	15.33	180.00	820.16	0.02	0.48	0.02	0.30	0.09	0.40	0.55
9-10	62.26	28.24	208.24	1758.22	0.05	0.53	0.02	0.30	0.09	0.40	0.60
CANALETAS RECTANG. QUE VAN DEL LADO NORTE DEL CONTORNO DEL RELLENO (En la base de taludes de calle Alberto Masferrer)											
Tramos	Ancho der(m)	Longitud(m)	Longitud acum(m)	Área der(m <sup>2</sup> )	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q Acumulado(m <sup>3</sup> /s)	s	y(m)	borde libre(m)	Altura(m)	Base(m)
1-2	26.56	18.59	40.00	493.75	0.01	0.01	0.02	0.10	0.03	0.15	0.20
2-3	35.60	20.00	60.00	712.00	0.02	0.04	0.02	0.15	0.05	0.20	0.30
3-4	32.75	20.00	80.00	655.00	0.02	0.06	0.02	0.15	0.05	0.20	0.30
4-5	28.48	20.00	100.00	569.60	0.02	0.07	0.02	0.15	0.05	0.20	0.30
5-6	28.20	20.00	120.00	564.00	0.02	0.09	0.02	0.15	0.05	0.20	0.30
6-7	25.33	20.00	140.00	506.60	0.02	0.11	0.02	0.20	0.06	0.30	0.40
7-8	22.99	24.67	164.67	567.16	0.02	0.12	0.02	0.20	0.06	0.30	0.40
8-9	22.89	15.33	180.00	350.90	0.01	0.13	0.02	0.20	0.06	0.30	0.40
9-10	70.60	28.24	208.24	1993.74	0.06	0.19	0.02	0.20	0.06	0.30	0.40
CANALETA RECTANG. QUE VA DEL LADO OESTE DEL INICIO DEL RELLENO (Calle Agustín Campos)											
	Alt (m)	Longitud(m)	Área (m <sup>2</sup> )	Q(m <sup>3</sup> /s)	s	y(m)	borde libre(m)	Altura(m)	Base(m)		
	26.09	60.48	1577.92	0.05	2%	0.15	0.05	0.20	0.25		
CANALETA RECTANG. DE TALUDES DE LA COL. 3 DE MAYO Y C. ALBERTO MASFERRER (A cada 2 m de altura)											
	Alt (m)	Longitud(m)	Longitud acum(m)	Área (m <sup>2</sup> )	Q(m <sup>3</sup> /s)	s	y(m)	borde libre(m)	Altura(m)	Base(m)	
	2.00	50.00	50.00	100.00	0.003	2%	0.05	0.02	0.15	0.10	
CANALETA RECTANG. TRANSVERSAL DE TALUDES DE LA COL. 3 DE MAYO Y C. ALBERTO MASFERRER (A cada 50 m de altura)											
	Alt (m)	Longitud(m)	Longitud acum(m)	Área (m <sup>2</sup> )	Q(m <sup>3</sup> /s)	s	y(m)	borde libre(m)	Altura(m)	Base(m)	
	13.50	50.00	50.00	675.00	0.02	2%	0.10	0.03	0.15	0.20	
CANALETA RECTANG. DE TALUD FINAL DEL RELLENO (A cada 2 m de altura)											
	Q(m <sup>3</sup> /s)	s	y(m)	borde libre(m)	Altura(m)	Base(m)					
	0.92	2%	0.36	0.11	0.47	0.73					
CANALETA TRAPEZOIDAL QUE VA AL FINAL DEL RELLENO (En la base del talud final)											
	Q(m <sup>3</sup> /s)	s	y(m)	borde libre(m)	Altura(m)	Base menor(m)	Pend	Base mayor(m)			
	0.92	2%	0.36	0.11	0.46	0.22	1.5:1	1.60			

Las dimensiones dadas en la tabla 8.7 son externas. Los canales transversales en los taludes son “rápidos” y el espesor de todos los canales es de 5 cm.

### **8.1.2 Estudio geológico**

Las capas piroclásticas observadas en la quebrada El Cacao pertenecen a la Formación San Salvador las cuales son:

- Tierra Blanca Joven (TBJ): Unidad A, Unidad B, Unidad C, Unidad D, Unidad E y la Unidad F.
- TB3
- TB4

La ubicación de estas capas está descrita en el mapa geológico de la quebrada que se encuentra en el Anexo C. El relleno se edificará básicamente sobre TB3.

La ubicación del sondeo del ensayo SPT se muestra en el mapa geológico en planta del Anexo C, así como una sección transversal PP' en la cual se muestran las diferentes capas geológicas encontradas en profundidad. Además se muestra una sección transversal QQ' que es la zona donde estará ubicado el talud final del relleno.

### **8.1.3 Estudio geotécnico**

En la quebrada El Cacao se realizó sólo un sondeo para el ensayo de penetración estándar SPT, debido a que se observó en las visitas realizadas que las formaciones tienden a ser continuas en su longitud. Se realizó además una clasificación visual-manual de las muestras alteradas que se obtuvieron en el ensayo SPT, cuyos resultados se muestran en el Anexo B. El relleno estará soportado por un suelo cuya clasificación visual-manual determina que es un limo de baja plasticidad (ML).

### 8.1.4 Especificaciones técnicas para la ejecución del relleno

La capacidad del volumen de material a depositar en la quebrada El Cacao se calculó con el método “Volumen a partir de áreas extremas”, con base al área de secciones transversales separadas aproximadamente a cada 20 metros de longitud. Además se ocupó un factor de variabilidad volumétrica del 5% debido a la naturaleza del material depositado. (Ver tabla 8.8). Volumen de relleno= 12685 m<sup>3</sup>

Tabla 8. 8 Cálculo de volumen del relleno (m3).

CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL RELLENO						
Sección	Área relleno(m <sup>2</sup> )	Dist acumulada(m)				
1	0	21.41				
2	26.54	40				
3	69.67	60				
4	57.44	80				
5	71.77	100				
6	67.38	120				
7	68.33	140				
8	99.61	164.67				
9	66.24	180				
10	90.82	208.24				
Tramos	Dist acumulada(m)	Distancia(m)	Promedio de áreas(m <sup>2</sup> )	Volumen(m <sup>3</sup> )	Factor abundam(5%)	Volumen neto(m <sup>3</sup> )
0-1	21.41	21.41	0.00	0.00	0.00	0.00
1-2	40	18.59	13.27	246.69	12.33	259.02
2-3	60	20	48.11	962.10	48.11	1010.21
3-4	80	20	63.56	1271.10	63.56	1334.66
4-5	100	20	64.61	1292.10	64.61	1356.71
5-6	120	20	69.58	1391.50	69.58	1461.08
6-7	140	20	67.86	1357.10	67.86	1424.96
7-8	164.67	24.67	83.97	2071.54	103.58	2175.12
8-9	180	15.33	82.93	1271.24	63.56	1334.80
9-10	208.24	28.24	78.53	2217.69	110.88	2328.57
				12081.06		12685.11
					TOTAL VOL(m <sup>3</sup> )=	12685.11

#### a) Permisos ambientales

En el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales MARN, la alcaldía debe solicitar un formulario, en el cual se explicarán las características del proyecto, el técnico hará la visita de campo correspondiente en la cual determinará si es necesario o no un estudio de impacto ambiental, si dicho estudio no es necesario se darán los permisos

ambientales inmediatamente. Se deberán obtener los permisos correspondientes para la extracción de materiales pétreos y botaderos.

Para la tala de árboles, se deberá obtener el permiso de tala correspondiente. Si no se afectarán árboles protegidos por Medio Ambiente se acudirá al Ministerio de Agricultura y Ganadería MAG. Si ocurre lo contrario se deberá acudir a solicitar el permiso al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales MARN.

#### **b) Medidas técnicas para la remoción de la vegetación**

En la vegetación se deben aplicar medidas preventivas con el fin de reducir la superficie dañada, proporcionando condiciones necesarias para la reforestación autóctona inicial. Es así como se propone como medida de mitigación inicial para la vegetación un Plan de Manejo. Antes de dar inicio al desmonte se deberá planear y, a la vez, programar todas las actividades que se ejecutarán en los diferentes frentes de trabajo.

Se deberá realizar la contratación de un técnico forestal para coordinar las actividades de tala de vegetación existente, y propiciar el aprovechamiento de la madera. De la tala en la zona a afectar se debe propiciar el uso máximo del material vegetativo. Debe prepararse un plan ó programación, en el que se debe tener en cuenta:

- Manejo de Cobertura vegetal

Antes de iniciar el desmonte, se debe asegurar que la destrucción de la vegetación sea la mínima necesaria para realizar el trabajo. La tala será manual, con motosierra y no con buldózer, para evitar daños al suelo y a la vegetación cercana. No se deberá realizar quema de vegetación.



- Delimitación del espacio que ocupará el relleno.

Partiendo del hecho de que la labor de tala es un impacto negativo irreversible se debe delimitar el área afectable mediante levantamientos topográficos para evitar errores en el alineamiento del espacio para el relleno.

- Despeje de Zona

La tala de árboles debe realizarse a ras del suelo ya que este sistema evita el rebrote de especies que facilitan este tipo de regeneración y se constituyen con el tiempo en peligro para el buen mantenimiento del relleno, los residuos vegetales deben ser aprovechados favoreciendo su descomposición, para ser reincorporados al suelo como materia orgánica, aumentando los nutrientes del mismo (sobre todo para las áreas que serán revegetadas ó en terrazas de taludes). La caída de los árboles debe direccionarse hacia la senda despejada, a fin de evitar la afectación de los árboles adyacentes y no destruir la regeneración natural de las especies dominantes. Las consideraciones anteriores se logran teniendo presente los siguientes aspectos: clase de corte para orientar la caída, diámetro, distribución de las ramas, dirección y velocidad del viento y por último pendiente del terreno. En condiciones muy desfavorables a la caída deseada del árbol se debe orientar la caída con ayuda de malacates mecánicos.

- Frente de Tala y corte

Con la ayuda de una cuadrilla de corteros se hará la tala de la vegetación. Esta actividad ha de realizarse bajo la dirección y supervisión de un especialista, preferiblemente un ingeniero forestal, que definirá el alineamiento correcto del área a intervenir. El producto de esta labor origina desechos vegetales consistentes en ramas de diferentes diámetros, que necesitan una adecuada disposición. Las ramas con diámetros mayores de 5 cm, serán apiladas de manera que puedan ser empleadas en la misma construcción o como fuente de energía (donada a los pobladores de la zona), La madera podría ser utilizada por los pobladores, para elaboración o ampliación de casas, muebles y/o aprovechar los rastrojos

para combustible. De producirse material sobrante no utilizable, este será enviado a un relleno sanitario autorizado, como el de Nejapa. Se debe realizar una calendarización y cumplimiento de actividades, para remover y sacar los residuos de manera continua y además procurar realizar todas estas actividades durante la estación seca.

**c) Medidas técnicas para la depositación del material de relleno.**

- Se hará el acarreo del material pétreo en camiones de volteo conocido como bolquetas o Dumpers los cuales se cubrirán con plástico o lonas para evitar la volatilidad de las partículas del material.
- Al momento de depositar el material en el botadero, se asignará un “tractor de banda” o un rodo “pata de cabra”, el cual estará de forma permanente para arrastrar el material y tenderlo en la superficie, para luego compactarlo de forma bandeada hasta alcanzar una densidad aproximada del 85%, de igual manera se conformarán las bermas.
- Se conformarán pendientes del 2% sobre el relleno una con dirección a la colonia 3 de Mayo y la otra pendiente con dirección a la calle Alberto Masferrer, como se muestra en las secciones transversales del Anexo D, lo anterior se realiza con el objetivo de evacuar la escorrentía del relleno hacia el drenaje que estará ubicado en el contorno del relleno.
- Se contará con material plástico para darle protección en caso de lluvias al material que se remueva o deposite en el transcurso del día.
- Para evitar afecciones respiratorias en la población se deberá establecer un programa de riego fuera del área del relleno durante la etapa de movimientos de tierra.

**d) Medidas técnicas para la conformación y estabilización de taludes a generarse.**

- Para taludes en corte formando terrazas (Colonia 3 de Mayo y calle Alberto Masferrer):

El diseño de taludes en corte tendrán pendientes máximas con relación H:1 / V:2 (2 metros de altura por 1 metro horizontal), con terrazas en las cuales se construirá una cuneta de concreto. Entre las terrazas se dejará una altura menor de 2 mts. El ancho de las bermas es variable. En las terrazas se dejará una pendiente del 2% hacia la cuneta al pie del talud y barreras vivas. Los taludes serán revestidos con zacate vetiver o barrenillo. Se dejarán drenajes transversales a cada 50 m. Las dimensiones de todos los canales se muestran en la Tabla 8.7. Si el talud presenta una altura menor de 8 mts. y tiene pendientes menores en relación 1:2 no se realizarán terrazas, solamente se conformará el talud y se recubrirá con zacate vetiver y barrenillo. (Ver Anexos D)

- Para talud en relleno formando terrazas. (Talud final que cierra el relleno):

El diseño del talud en relleno tendrá pendientes máximas con relación H:1.5 / V:1 (1 metro de altura por 1.5 metros horizontal) con alturas entre terrazas menores a 2 mts. Se construirá una cuneta de concreto entre terrazas y al pie del talud cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 8.7, en las terrazas se dejará una pendiente del 2% hacia la cuneta y barreras vivas. El talud será revestido con zacate vetiver o barrenillo. Se hacen hileras de Vetiver y entre ellas se coloca grama o el zacate barrenillo. (Ver Anexos D).

De acuerdo al análisis de estabilidad de taludes, se deberán efectuar las siguientes medidas:

- a. La siembra de barreras vivas en las bermas y en la corona de los taludes.
- b. Los taludes en corte y relleno (naturales o con bermas) serán revestidos con zacate vetiver y barrenillo.
- c. La reforestación en taludes será en hilera.

Se recomiendan los arbustos presentados en la Tabla 8.9 que son los que crecen en pendientes fuertes y favorecen la estructura del suelo.

Tabla 8. 9 Especies recomendadas para revegetación en taludes. [MARN, 2005]

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO
Flor de mayo	<u>Plumeria acutifolia</u>
Marañón	<u>Anacardium occidentale</u>
Bambú	<u>Bambusa vulgaris</u>
Madrecacao	<u>Gliricidia sepium</u>
Capulín	<u>Muntigia calabura</u>

También se recomienda la siembra de flor de izote, ya que se han obtenido buenos resultados.

**e) Medidas técnicas para el drenaje subterráneo.**

El drenaje subterráneo se colocará en el eje de la quebrada. Las pendientes transversales en el fondo del relleno irán en dirección natural hacia el drenaje subterráneo. Se impermeabilizará el fondo de la zanja del drenaje subterráneo con suelo-cemento con 10% en volumen compactado, al 95% del Proctor T-180 método D, el drenaje subterráneo estará relleno con grava y piedra de 4 y 6 pulgadas, se recomienda la dacita proveniente del cerro San Jacinto ya que tiene buenas propiedades para este uso (es menos densa que el basalto y la andesita) y se cubrirá con un material que permita infiltrar líquidos y retener las partículas finas que lo pudieran obstruir. Este material será de preferencia un geotextil.

**f) Medidas técnicas para la plantación y mantenimiento de los árboles plantados sobre el relleno.**

Para llevar a cabo esta medida de mitigación se sugiere que al realizar la siembra de árboles y arbustos se tenga en cuenta los siguientes criterios:

- Utilización de especies nativas y especies de rápido a moderado crecimiento
- Que puedan cumplir también una función de ornato
- Especies resistentes a los efectos secundarios generados en el proyecto (Contaminación del aire por emisiones vehiculares)
- Árboles que presenten una altura moderada en su período de adultez para no dañar el relleno con sus raíces.

El mantenimiento de las plantas sembradas debe ser por lo menos de dos años que es el tiempo en el cuál se espera que las plantas hayan enraizado, requiriendo menos cuidados posteriormente.

Los principales aspectos a tener en cuenta para el mantenimiento son:

- Siembra durante la estación lluviosa
- Preparación del suelo y siembra
- Control de plagas
- Fertilizantes y Correctores de humedad
- Riego en áreas de engramado sobre todo en los taludes durante la estación seca
- Limpieza y poda

## **8.2 Análisis de estabilidad de taludes**

### **8.2.1 Introducción**

En este apartado se explicarán los procedimientos necesarios para verificar la estabilidad del talud de la Colonia Brisas del Sur.

Se exponen los criterios empleados para la elección de datos de laboratorio necesarios para el análisis, así como los mecanismos de falla planteados, las condiciones del nivel piezométrico y la sollicitación dinámica. Se presentarán los análisis efectuados a las secciones actuales y las secciones propuestas. Finalmente se incorporan las secciones transversales de las canaletas diseñadas para el desalajo de la escorrentía superficial.

### **8.2.2 Método y mecanismo de falla utilizado**

Antes de realizar el análisis de estabilidad, es necesario primero hacer una inspección al talud para observar las características geológicas locales así como los mecanismos de falla presentados.

En el talud de análisis, se observó que en aquellos lugares en los cuales las condiciones geométricas de los estratos no están proclives al fallamiento masivo, es decir, que la inclinación de los estratos está hacia adentro del talud, se generan fallas planas que son sub-paralelas a la cara del talud (Figura 8.4), similares a las que ocurren en las formaciones rocosas.



Figura 8. 4 Vista de fallas planas que ocurren paralelas a la cara del talud de la col. Brisas del Sur.

Los métodos que se utilizan para el análisis de estabilidad en las formaciones rocosas están basados en los estudios hechos por Hoek y Bray [1981]. Las fallas planas en las rocas ocurren cuando una masa de roca desliza a lo largo de una superficie relativamente plana (ver Figura 8.5), esto significa que debe ser sub-paralela a la cara del talud (alrededor de  $20^\circ$ ); también ocurren cuando se generan grietas de tensión provocando empujes por presiones hidrostáticas. Un análisis de este tipo de falla no podría realizarse ya que están originalmente formulados para un talud que posee un solo estrato, por esto se ha optado por plantear el problema recurriendo al método de equilibrio límite propuesto por Morgenstern-Price. El método, como se explicó en el capítulo 6, presenta un factor de seguridad para el equilibrio de fuerzas y momentos, puede plantearse para problemas que presenten mas de un estrato de suelo y ofrece el planteamiento de cualquier superficie de falla.

Además de plantear el mecanismo de falla plana, se realizaron análisis para superficies de falla circulares utilizando el método de equilibrio límite propuesto por Morgenstern-Price, debido a que este tipo de falla se genera cuando las condiciones geométricas están proclives al fallamiento, también porque es la que comúnmente se conoce en nuestro medio.

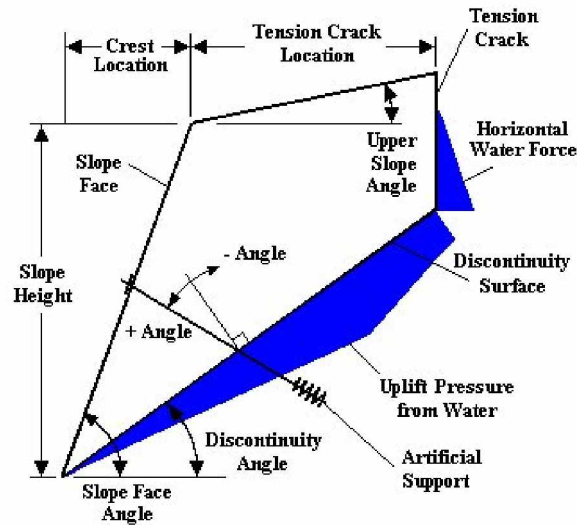


Figura 8. 5 Modelo de la falla planteada por Hoek y Bray [www.engr.siu.edu, mayo2005].

### 8.2.3 Datos del laboratorio empleados en el análisis

Luego de elegir el método de estabilidad, es necesario obtener los parámetros involucrados en el análisis. Tal y como se menciona en los capítulos anteriores, al inicio del desarrollo de esta tesis se realizó una campaña geotécnica, que consistió en la extracción de muestras tanto alteradas como inalteradas; posteriormente se procedió a la realización de pruebas de laboratorio entre las que se destaca el ensayo triaxial y la obtención de los valores de ángulo de fricción ( $\phi'$ ), coeficiente de cohesión ( $c'$ ) y peso volumétrico ( $\gamma$ ).

La cantidad de muestras inalteradas a extraer depende del número de estratos presentes en el talud. Como se cuenta con cuatro estratos geológicos (TBJ, TB3, TB4 y Cuscatlán), ver Anexo C, se extrajeron un total de seis muestras inalteradas con el fin de realizar los



ensayos triaxiales. Se efectuaron dos extracciones de la formación de TBJ (la primera a finales de verano cuando no había llovido aun y la otra a inicios de invierno, cuando se contaba con lluvias escasas); también se extrajeron muestras de la formación TB3 (correspondientes a la parte inferior del paleosuelo y del cuerpo de la formación); además se extrajeron las muestras provenientes de los paleosuelos de TB4 y Cuscatlán. En la Tabla 8.10, se presentan los resultados de dichos análisis en las unidades de medida requeridas para la introducción de datos al programa utilizado.

La falla de suelos ocurre en los estratos más débiles que presentan una descomposición mayor que los demás. En el caso presente, los estratos débiles corresponden a los paleosuelos de las diferentes formaciones geológicas. Para el modelo se utilizaron los parámetros provenientes de los paleosuelos de TB4 y Cuscatlán; también aquellos provenientes de la parte inferior del paleosuelo de TB3 (Muestra 2) y para el caso de TBJ se consideró la situación bajo condiciones críticas de humedad. Cuando se presentan condiciones críticas de humedad, se generan incrementos en los pesos volumétricos y coeficientes de cohesión, acompañados de una disminución del ángulo de fricción. Por esta razón, se ha realizado una combinación entre los parámetros obtenidos para la formación TBJ ( $\gamma = 14.13 \text{ kN/m}^3$ ,  $\phi' = 23.11^\circ$  y  $c' = 33.35$ ).

Tabla 8. 10 Resumen de resultados de pruebas triaxiales.

Muestra	Ángulo de fricción (grados)	Peso Volumétrico kN/m <sup>3</sup>	Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )
TBJ (Unidad C) Muestra 1	23.11	13.05	33.35
TBJ (Unidad C) Muestra 2	33.77	14.13	30.96
Parte inferior del Paleosuelo TB3	42.79	15.24	4.91
Unidad TB3	42.36	14.55	3.84
Paleosuelo TB4	40	13.96	73.90
Paleosuelo Cuscatlán	28.36	16.19	58.42

#### **8.2.4 Condiciones del nivel piezométrico**

Se ha observado que los mecanismos de falla de los taludes del AMSS, son ocasionados por un incremento de peso de la superficie deslizante, acompañado de la pérdida de la capacidad soportante causado por el incremento de la presión de poros en la época lluviosa; esta situación conduce hacia un modelo en el cual las condiciones del nivel piezométrico sean críticas para la falla. En el proyecto de la colonia Brisas del Sur, el nivel piezométrico se ubicó con la ayuda de ensayos SPT, se realizaron tres sondeos de los cuales solamente en uno de ellos se pudo obtener el nivel freático (Ver anexo B). Para el análisis se presentarán condiciones en las que el nivel piezométrico se ubica en las cercanías de la corona, simulando la situación de un talud saturado.

#### **8.2.5 Análisis dinámico**

Como se menciona en el capítulo 6.5, en el apartado referente a los requerimientos exigidos por la “Norma Técnica para Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes” [MOP,1994], es necesario hacer un análisis bajo condiciones dinámicas simulando los efectos de sismo. El coeficiente sísmico ( $k_h$ ) sugerido por la Norma Técnica es de 0.16 para zona I, sin embargo, actualmente en las especificaciones técnicas de las bases de licitación de carreteras, se exige un coeficiente sísmico de 0.20, MOP [www.mop.gob.sv]. Por esta razón se procederá utilizando el coeficiente sísmico de 0.20.

#### **8.2.6 Secciones transversales analizadas**

En la Figura 8.6 se presenta un esquema de la ubicación de las secciones transversales analizadas.

De la Figura 8.7 a 8.11, el estrato amarillo representa a TBJ, el estrato anaranjado es TB3, el estrato verde es TB4 y el estrato café representa a la formación Cuscatlán.

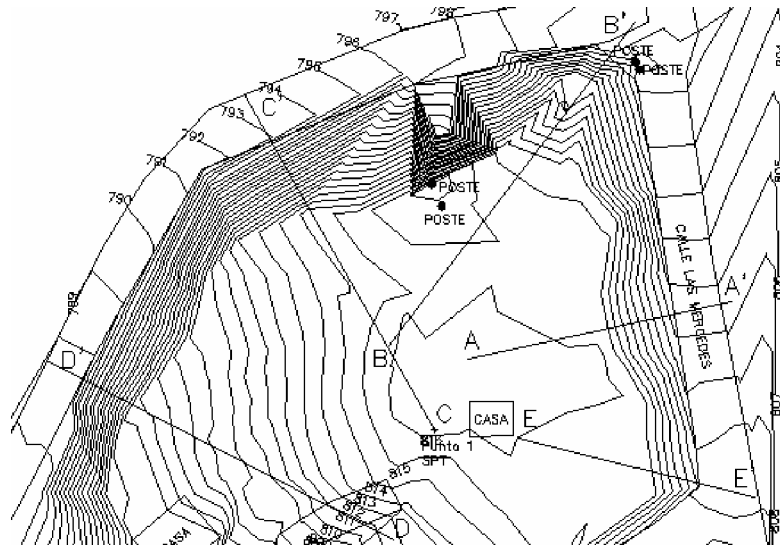


Figura 8. 6. Secciones transversales analizadas.

Para los estudios de fallas planas, se propusieron segmentos de líneas rectas que simularan las condiciones de los análisis de rocas, tal como se muestra en la Figura 8.7; sin embargo, estas fallas no representan ser las críticas ya que generan factores de seguridad cercanos a 2, los factores de seguridad decrecen a medida que la falla se tiende hacia el interior del talud. Esta situación que se presenta como crítica no es la que está sucediendo realmente, por lo tanto no es válida.

En el caso superficies de falla circulares, las condiciones críticas presentadas por el programa se generan cuando los radios de giro son extremadamente grandes y el volumen de la masa en movimiento es grande. Esta condición que se presenta como crítica, no es la que ocurre en realidad en este tipo de materiales bajo las condiciones geométricas presentadas, por lo tanto tampoco es válida. Véase Figura 8.9

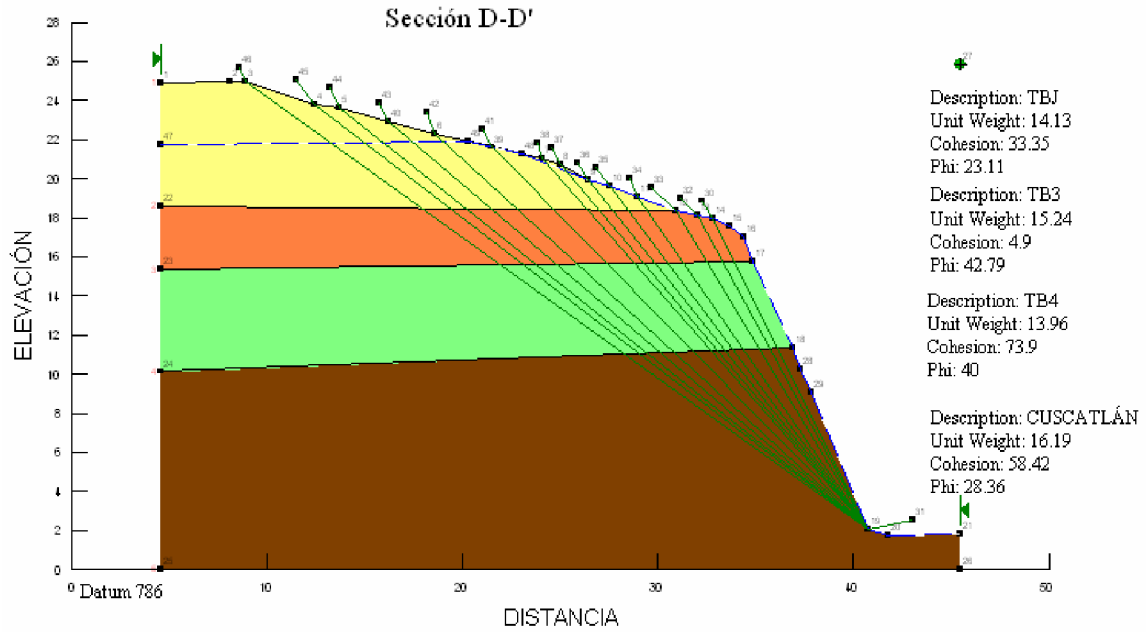


Figura 8. 7 Tipos de fallas planas propuestas en las diferentes secciones.

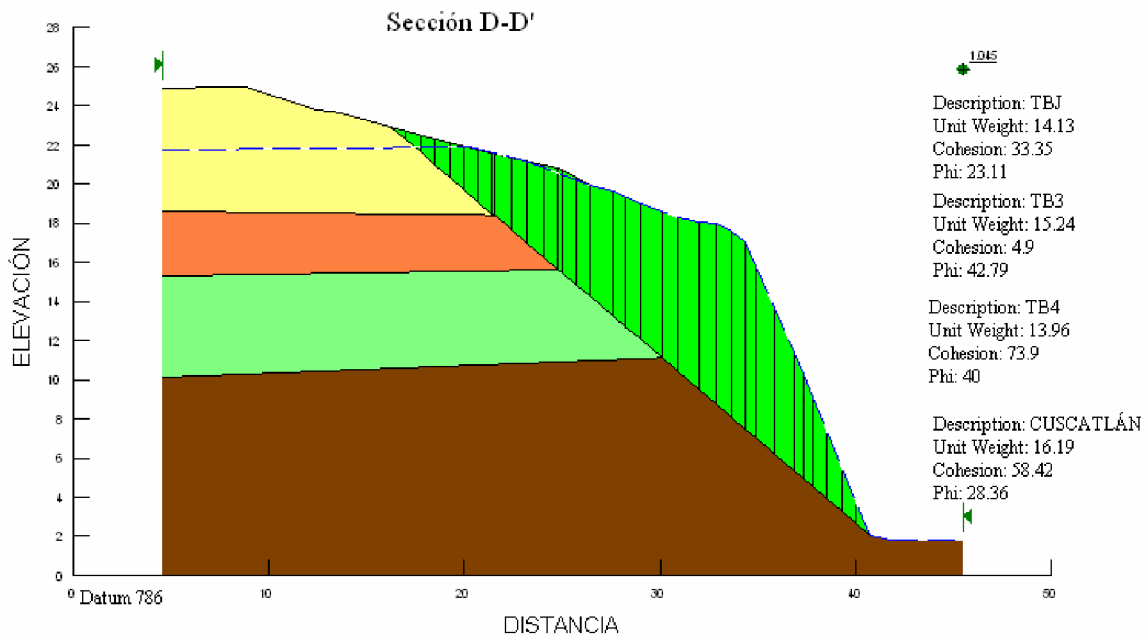


Figura 8. 8 .Falla crítica bajo la condición de sismo.

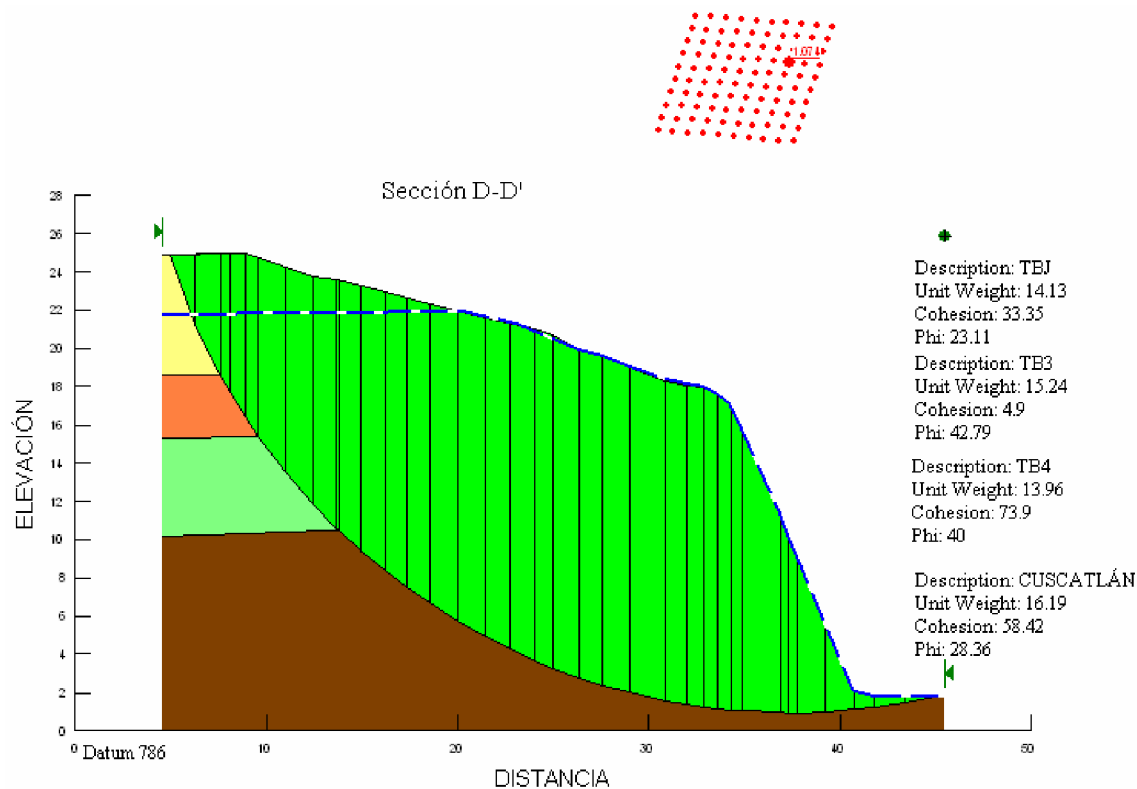


Figura 8. 9 Superficie de falla circular bajo la condición de sismo, sección actual.

Por lo anteriormente expuesto, es evidente que el mecanismo de falla presentado en las condiciones reales del talud, no puede ser analizado con los modelos con que se cuenta.

El mecanismo de falla real está regido por el proceso de exfoliación, las condiciones de humedad y por el empuje de las raíces. El proceso de exfoliación consiste en un efecto térmico causado por la energía solar que genera discontinuidades en la cara del talud.

Debido a que no se puede obtener un factor de seguridad para el mecanismo de falla real, se proponen medidas que mitiguen los efectos mencionados previamente.

Para reducir el efecto de la exfoliación se propone sembrar zacate Vetiver y Barrenillo; para mitigar los efectos de saturación se proponen drenajes superficiales y para disminuir los empujes de raíces, se deben evitar árboles grandes en las cercanías de la corona del talud. Para llevar a cabo todas las medidas anteriores, es necesario brindarle al talud un ángulo de

inclinación que facilite su mantenimiento, por lo tanto, se proponen secciones de corte como se muestran en el Anexo D.

Los resultados de los factores de seguridad obtenidos para los análisis de fallas planas y circulares, tanto para la sección actual como para la sección propuesta, se muestran en la Tabla 8.11.

Tabla 8. 11 Factores de Seguridad de las secciones.

Sección	FALLA PLANA				FALLA CIRCULAR			
	Actual		Propuesta		Actual		Propuesta	
	Estático	Dinámico	Estático	Dinámico	Estático	Dinámico	Estático	Dinámico
A-A'	1.73	1.10	1.83	1.17	2.52	2.02	2.85	2.81
B-B'	1.70	1.08	1.74	1.12	1.95	1.44	2.03	1.76
C-C'	1.42	0.96	1.74	1.16	1.27	1.27	1.48	1.55
D-D'	1.46	1.05	1.66	1.11	1.37	1.07	1.46	1.12
E-E'	3.62	2.38	4.02	2.61	2.00	1.31	2.21	1.35

Es necesario recalcar que aunque se muestran los resultados de los factores de seguridad de los análisis de fallas planas y circulares, no representan el mecanismo de falla real. En la Figura 8.10 se muestra que para un análisis tradicional de fallas circulares, en la sección de corte propuesta, se generan radios de aproximadamente 30 m. Para análisis de fallas planas (Figura 8.11), el ángulo de inclinación de la superficie de falla crítica es mayor que 45°. Este tipo de fallas es aceptable en ciertos tipos de lavas pero no en las cenizas volcánicas en estudio.

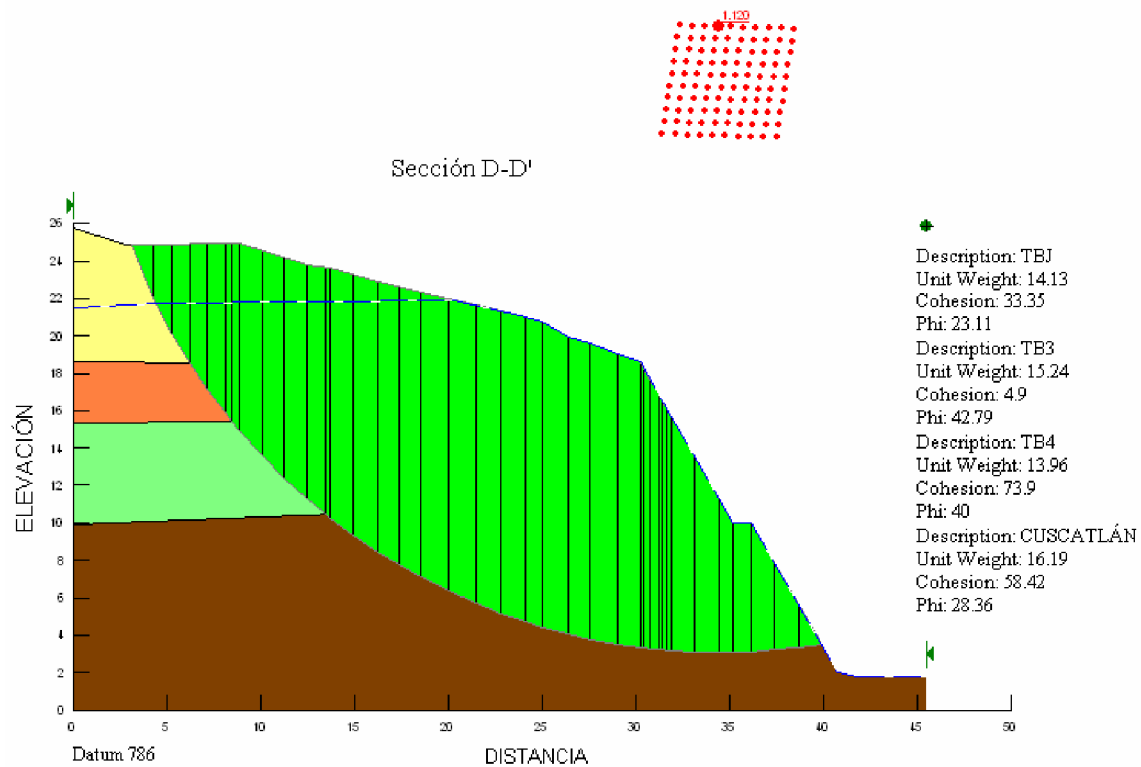


Figura 8. 10 Superficie de falla circular bajo la condición de sismo, sección de corte propuesta.

Los mecanismos de falla circulares que se presentan en este tipo de cenizas volcánicas, cuando las condiciones geométricas están proclives a la falla, es decir, cuando los estratos están tendidos hacia fuera del talud, poseen radios de giro grandes pero el volumen de tierra que se moviliza no es de la magnitud que presenta el programa utilizado. Para demostrar la situación anterior se presenta en la Figura 8.12 que muestra un talud compuesto por los mismos materiales que el talud de la colonia Brisas del Sur.

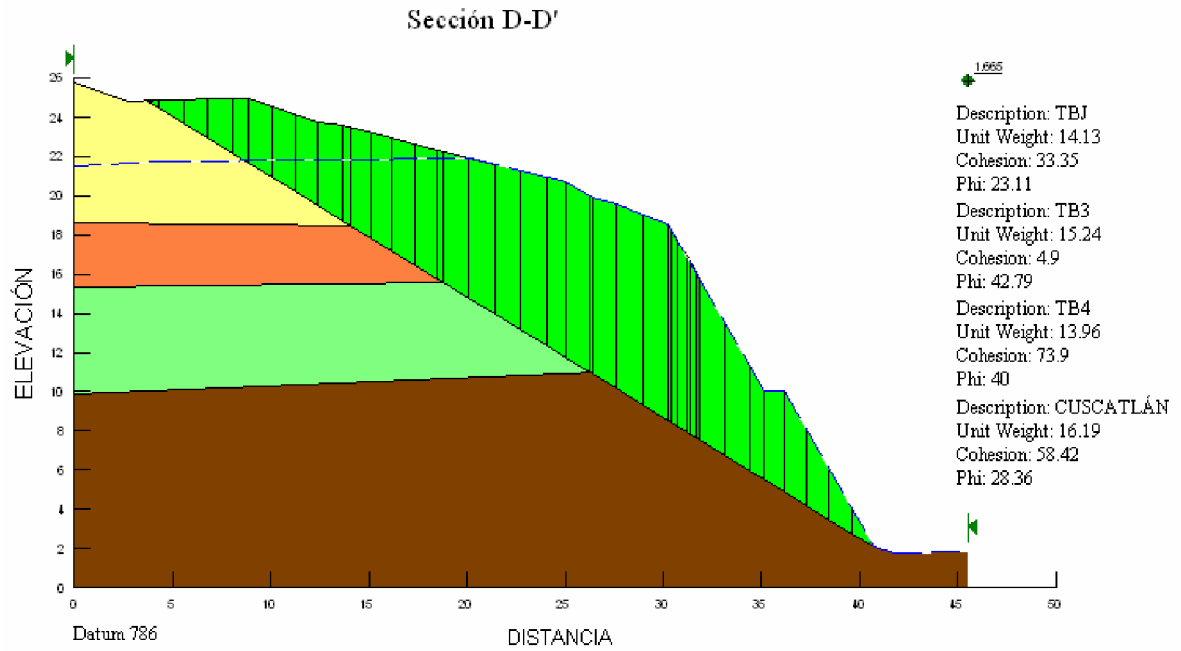


Figura 8. 11 Superficie de falla plana bajo la condición de sismo, sección de corte propuesta.



Figura 8. 12 Mecanismo de falla circular en cenizas volcánicas disparado por lluvias [Hernández, 2005].



### 8.2.7 Secciones transversales de las canaletas y graderías disipadoras.

Después de proponer los cortes, es necesario desalojar la escorrentía superficial para evitar problemas de erosión e infiltración. Para ello se procede al diseño de canaletas tanto en las bermas como en la corona y un sistema de graderías disipadoras de energía en puntos estratégicos. No es necesario en este caso disponer una canaleta al pie del talud, ya que la ubicación de las graderías es tal que el punto de entrega de aguas es directamente en la cuneta de la calle; esta consideración se basa en que el caudal a desalojar no supera los  $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$  y que la velocidad del flujo será disipada por las graderías.

Se debe mencionar que el espesor de todas las canaletas y graderías es de 5 cm.

A continuación se presentan los esquemas de las secciones transversales de las canaletas y las graderías propuestas (Figuras 8.13 a 8.17):

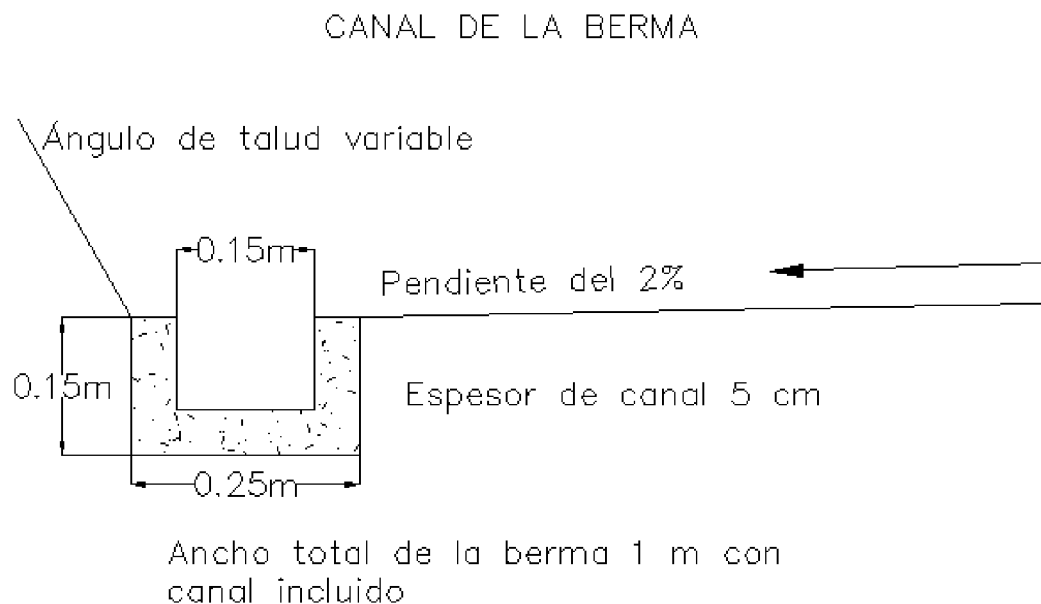
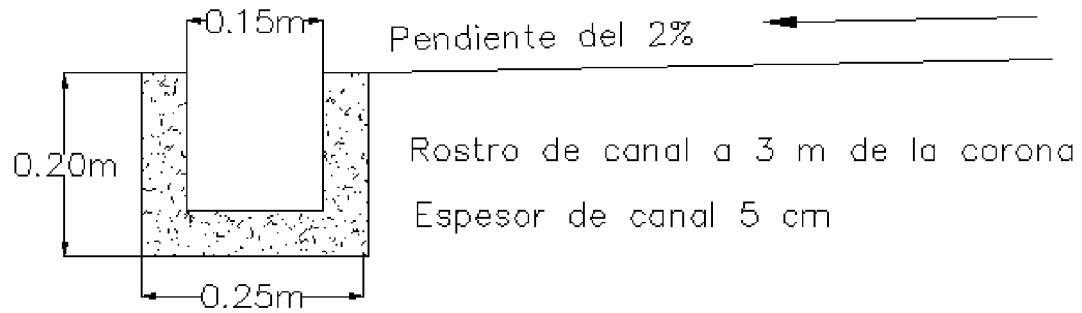


Figura 8. 13 Canal propuesto para la berma.

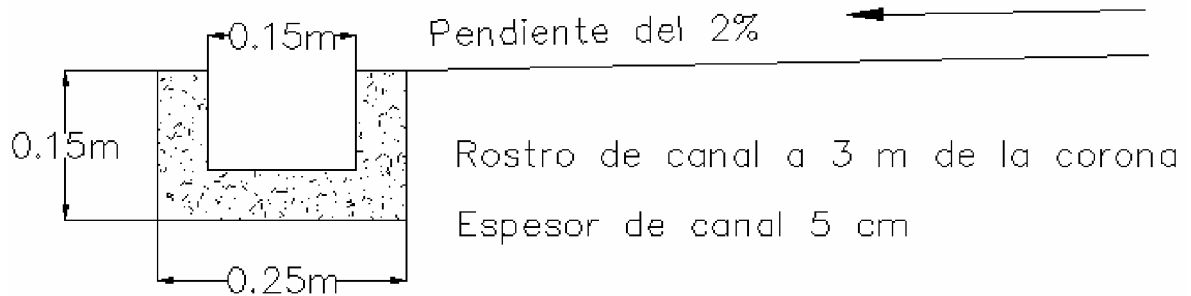
### CANAL DE CORONA, TRAMO A-E



Pendiente del canal 3.01%, de A a E

Figura 8. 14 Canal propuesto para el tramo A-E.

### CANAL DE CORONA, TRAMO A-B



Pendiente del canal 1.98 %, de A a B

Figura 8. 15 Canal propuesto para el tramo A-B.

### CANAL DE CORONA, TRAMO B-C

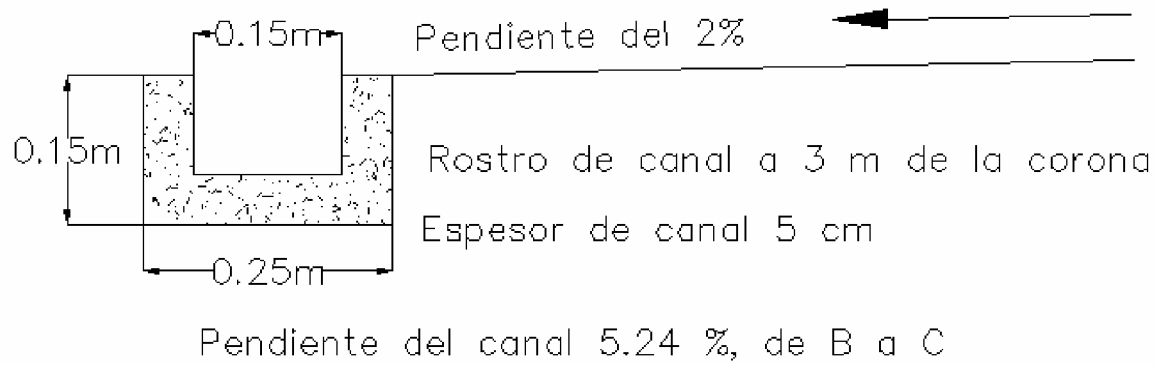


Figura 8. 16 Canal propuesto para el tramo B-C.

### CANAL DE CORONA, TRAMO C-D

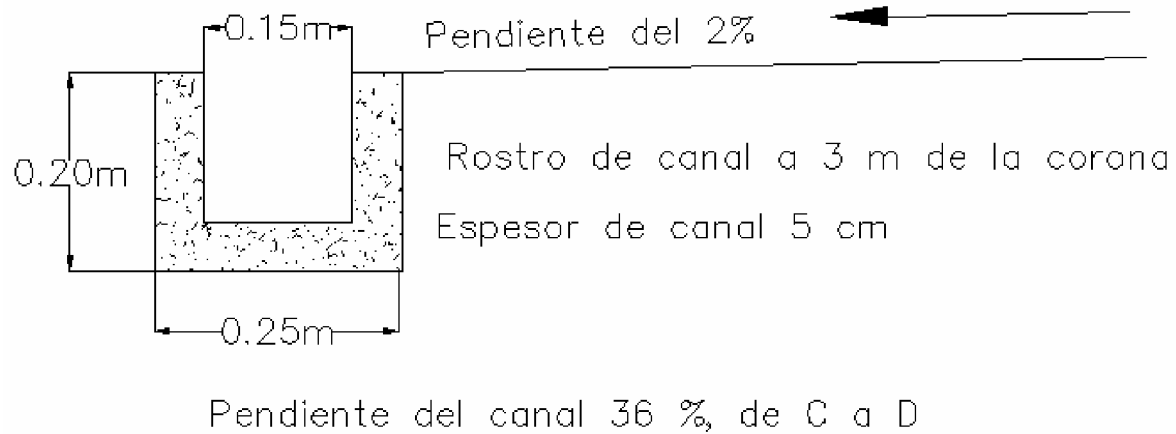


Figura 8. 17 Canal propuesto para el tramo C-D.

En la sección E-E' se propone construir un canal sin graderías, es decir, que dicho canal sea paralelo a la pendiente del talud. Véase la Figura 8.18.

PLANTA DE LA CANALETA DE CORONAMIENTO SECCIÓN E-E'

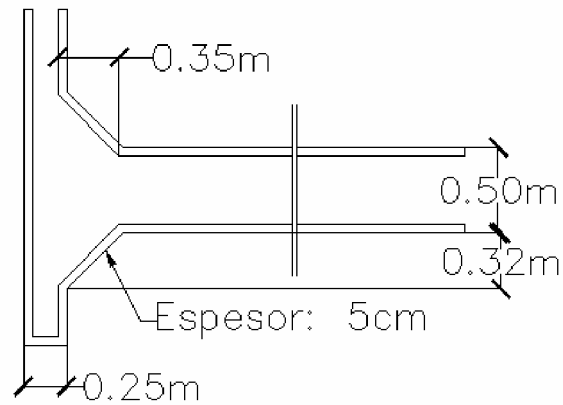


Figura 8. 18 Canaleta de Coronamiento sección E-E'.

Se propone construir graderías en las secciones B-B', C-C' y D-D'; todas tendrán una contrahuella de 1 m de alto (Figura 8.19). El corte A-A' no llevará graderías disipadoras de energía.

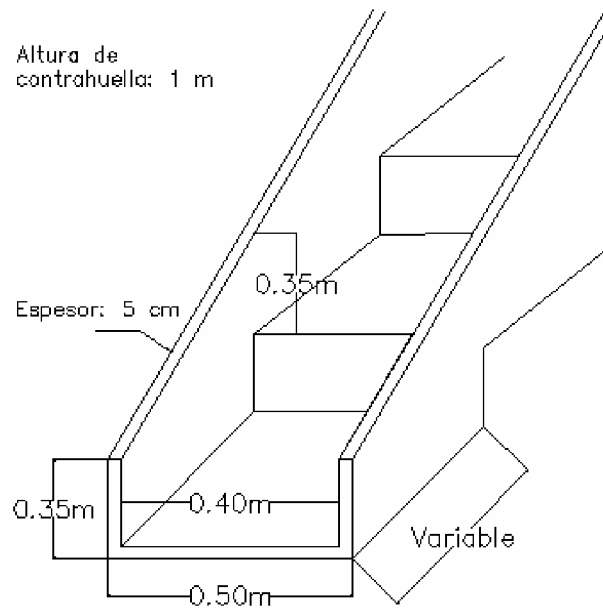


Figura 8. 19 Isométrico de graderías propuestas, sin escala.

## 8.2.8 Especificaciones Técnicas

### a) Limpieza y chapeo

- **Descripción.**

Bajo esta partida, el Contratista desmontará, desyerbará, destronconará y removerá del terreno, toda la vegetación y desechos dentro de los límites de la construcción o como lo indique el Ingeniero.

- **Métodos de construcción.**

Antes de dar inicio al desmonte se deberá planear y, a la vez, programar todas las actividades que se ejecutarán en los diferentes frentes de trabajo, según sea el caso, orientado a la concertación de medidas técnicas que deberán implementarse en la remoción de la cobertura y capa vegetal.

La limpieza y chapeo deberá hacerse con cuadrillas de personal, utilizando herramientas manuales y no se permitirá el uso de maquinaria pesada, salvo para la operación de destroncado, la cual se hará posteriormente al chapeo manual o cuando lo autorice el Ingeniero.

El Contratista eliminará y removerá del sitio de la construcción, todos los árboles marcados para tal efecto, así como los materiales, raíces, troncos, arbustos, cercas, basura y cualquier otro material objetable dentro de los límites de la construcción.

No se removerá ningún árbol, aunque se haya incluido en la lista correspondiente, mientras no sea específicamente marcado por el Ingeniero. Cuando algún árbol que se desee conservar sufra cortaduras deberá usarse como protección una pintura a base de asfalto especialmente preparada para dicho propósito. Esta pintura deberá ser aprobada por el Contratante.

La tala de árboles deberá realizarse a ras del suelo ya que este sistema evita el rebrote de especies que facilitan este tipo de regeneración y se constituyen con el tiempo en peligro para el buen mantenimiento del talud. La caída de los árboles deberá direccionarse hacia la una zona despejada, a fin de evitar la afectación de las viviendas, los árboles adyacentes y atrofiar o destruir la regeneración natural de las especies dominantes. Las consideraciones anteriores se lograrán teniendo presente los siguientes aspectos: clase de corte del fuste para orientar la caída, diámetro, distribución de copas y distribución de las ramas, dirección y velocidad del viento y por último pendiente del terreno. En condiciones muy desfavorables a la caída deseada del árbol se deberá orientar la caída con ayuda de malacates mecánicos.

- **Disposiciones del material proveniente de la limpieza:**

Todos los materiales, los troncos enterrados, las raíces, los matorrales, los troncos de desecho, las ramas y copas de los árboles o cualquier otro desperdicio resultante de las operaciones de limpieza y chapeo, se dispondrán según lo determine el Ingeniero, de manera que no se perjudique o ponga en peligro la propiedad pública o privada. Las ramas con diámetros mayores de 5 cm podrán donarse a los pobladores de la zona para ser utilizada como fuente de energía. De producirse material sobrante no utilizable, este será enviado a un relleno sanitario autorizado, como el de Nejapa. En cualquier caso, será obligación del Contratista el hallar un lugar apropiado y el autorizado por el propietario del mismo y aprobado por el Ingeniero, para depositar el material sobrante, a menos que el Ingeniero indique otro lugar específicamente.

- **Medición y pago.**

La medición y pago se hará en hectáreas, satisfactoriamente limpiadas, chapeadas y destroncadas. Esta área se medirá horizontalmente. No se hará medida alguna ni se considerará pago por la limpia, chapeo y destronque requeridos en los campamentos de construcción, a menos que lo autorice el Ingeniero. Se incluirá toda la mano de obra, los materiales, el equipo, las herramientas, transportes y los imprevistos necesarios para la terminación del trabajo.

No se pagará sobreacarreo por el transporte del material resultante de la partida Limpieza y Chapeo.

**b) Reubicación de servicios públicos.**

- **Descripción.**

Consistirá en la remoción y reubicación de servicios de alumbrado público y telefonía; tuberías de agua potable (para el caso de la tubería galvanizada) o reinstalación (tuberías de PVC, que al movilizarlas puedan sufrir daño o sea mayor el costo de remoción). La supervisión efectuará una revisión de los postes y tuberías que puedan obstaculizar los trabajos de terracería indicando posteriormente en planos de planta y perfil, los detalles de las mismas y las características. Para estos trabajos, el Contratista podrá sub-contratar o no los servicios de remoción con las entidades involucradas o responsables de los servicios previa autorización del Propietario con Asesoría del Supervisor. El contratista presentará un documento que detalle la obra a ejecutar y las cantidades de obra.

- **Métodos de construcción.**

Los trabajos de remoción de servicios públicos serán ejecutados por las empresas o Instituciones involucradas o el contratista mismo, quien presentará el presupuesto de los trabajos requeridos con memoria de cantidades. Dicho pago comprenderá todas las operaciones y suministros necesarios para que los servicios sean desplazados a los lugares indicados por la Supervisión.

- **Medición y pago.**

Las actividades involucradas en esta partida, se pagarán por Suma Global (S.G.), hasta que las obras estén completas y recibidas a satisfacción por el Supervisor.

El pago incluye la compensación total por la mano de obra, materiales, herramientas, equipo, dispositivos de seguridad e imprevistos necesarios para ejecutar las actividades de remoción de servicios públicos.

**c) Topografía para la construcción**

• **Descripción.**

Este apartado incluye el suministro del personal calificado, equipo y material necesarios para la ejecución de la topografía, colocación de estacas, cálculo y registro de los datos para el control del trabajo.

El personal, equipo y material deberán conformarse a las siguientes condiciones:

- a. Personal. Deberán usarse cuadrillas de topografía técnicamente calificadas, capaces de realizar el trabajo en el tiempo previsto y con la debida precisión. Mientras esté en ejecución la labor de topografía, deberá mantenerse en el proyecto un supervisor de cuadrillas debidamente calificadas.
- b. Equipo. Deberán usarse instrumentos y equipo de soporte aptos para alcanzar las tolerancias relativas al proyecto.
- c. Material. Deberán proporcionarse herramientas, suministros y estacas del tipo y calidad normalmente usados en trabajos de topografía y apropiados para el uso específico propuesto. Las estacas deberán ser de suficiente longitud para obtener un empotramiento firme en el terreno, con suficiente largo sobre la superficie para efectuar las anotaciones necesarias de manera legible.

• **Métodos de construcción.**

El Contratante fijará las líneas de referencia iniciales, establecerá los puntos de control horizontal y vertical y suministrará los datos necesarios para obtener un control adecuado



del trabajo. Se entregará toda la información relativa al diseño que sea de necesidad para el Contratista.

Antes del inicio de la construcción, debe informarse al Contratante sobre cualquier línea, punto de control o estacas que se hayan perdido. El Contratante restablecerá todos esos elementos antes del inicio.

Deben llevarse a cabo los cálculos adicionales necesarios para el mejor uso de los datos suministrados por el Contratante. En el caso de que se encuentren errores aparentes en el estacado inicial o en la información suministrada, debe notificarse esos hechos de manera inmediata al Contratante.

Deben preservarse todos los puntos de control y de referencia iniciales. Luego del inicio de la construcción, el Contratista debe reemplazar todas las referencias iniciales, o puntos de control necesarios para el trabajo, que hubieran sido destruidos o perturbados. Antes de iniciar la topografía, debe discutirse y coordinarse con el Contratante lo siguiente:

- a. Métodos topográficos y de estacado
- b. Anotaciones que se inscribirán en las estacas
- c. Puntos de referencia
- d. Control de estructuras existentes
- e. Cualesquiera otros procedimientos y controles necesarios para el trabajo.

La topografía y los controles que se establezcan deberán estar dentro de las tolerancias mostradas en la Tabla 8.12.

Las anotaciones de campo deberán realizarse en el formulario aprobado por el Contratante. Las anotaciones topográficas de campo deben remitirse a la oficina del proyecto tantas veces el contratante lo solicite. Asimismo, deben elaborarse los datos necesarios para fundamentar las cantidades de pago. Todas las anotaciones de campo y la documentación de soporte son propiedad del Contratante hasta la conclusión del proyecto.

El trabajo no se podrá iniciar hasta que el estacado haya sido aceptado por el Contratante. La topografía de la construcción y el trabajo de estacado deben ser revisados aleatoriamente para efectos de precisión y las porciones inaceptables del trabajo deben ser rechazadas. El trabajo de topografía rechazado debe ser rehecho dentro de las tolerancias especificadas en la Tabla 8.12 que se muestra más adelante.

La aceptación de las estacas de construcción no releva al Contratista de la responsabilidad de corregir los errores descubiertos durante el trabajo y de cubrir todos los costos adicionales asociados con el error.

Deben removerse y eliminar todas las marcas, cavidades, estacas y cualquier otro material de estacado, inmediatamente después de la conclusión del proyecto y antes de su recepción, con excepción de los bancos de marca.

- **Requerimientos de la topografía.**
  - a. Puntos de Control. El Contratista debe relocalizar los puntos de control iniciales, tanto horizontales como verticales, que estén en conflicto con la construcción, trasladándolos a áreas que no serán perturbadas por las operaciones de construcción. El Contratante debe suministrarle las coordenadas y las elevaciones de los puntos que serán relocalizados, antes de que los puntos iniciales sean eliminados.
  - b. Secciones transversales. Las secciones transversales deben ser tomadas normalmente a la línea de central de las calles de acceso (calle al cantón El Porvenir y calle Las Mercedes). El espaciamiento de las secciones transversales en la línea de centro no debe exceder 15 metros. Todas las distancias entre las secciones transversales deben reducirse a distancias horizontales de la línea central de las calles.
  - c. Referencias. Las referencias deben colocarse en las mismas ubicaciones de las secciones transversales, se ubicarán fuera de los límites la limpieza del terreno. Toda la información de los puntos de referencia debe anotarse en las estacas de referencia.

- d. Límites de la limpieza, chapeo y destronque. Los límites de limpieza, chapeo y destronque deben señalarse en las secciones transversales del talud.

Tabla 8. 12 Tolerancias en las Mediciones para la Construcción y el Estacado.

FASE DEL ESTACADO	HORIZONTAL	VERTICAL
Puntos de control	1:10.000	±5 mm
Puntos de las secciones transversales	±50 mm	±100 mm
Límites de limpieza y desbosque	±500 mm	-

Las mediciones topográficas de la construcción y el estaqueado serán aceptados hasta que la supervisión proporcione el visto bueno para que inicien los trabajos de corte.

- **Medición y pago.**

La topografía y el estacado de construcción se medirán y pagarán en base a una suma global.

**d) Excavación de taludes.**

- **Descripción.**

Bajo esta partida, el contratista porporcionará todos los materiales, equipo y requerimientos necesarios para la conformación del talud. Los cortes se iniciarán hasta que la limpieza, chapeo, destroncado y remoción de estructuras existentes hayan sido aprobados por la supervisión.

Es responsabilidad del contratista tomar las precauciones necesarias para que las excavaciones se ajusten a las líneas del proyecto.

- **Métodos de construcción.**

Los taludes deberán construirse con un ángulo de inclinación según la forma en que se especifica en los planos, también se proporcionarán bermas bajo el criterio de la media altura, es decir, que el talud tendrá una terraza intermedia de un (1) metro de ancho medido horizontalmente a lo largo su perímetro.

A la terraza intermedia se le proporcionará una pendiente del 2% hacia la cara del talud tal como se especifica en los planos. En dicha terraza se construirá una canaleta de concreto que servirá para el desalojo de la escorrentía superficial.

En la corona del talud se efectuará un corte necesario para proporcionar una pendiente del 2% hacia su interior. El corte tendrá una longitud de 3.25 m medidos horizontalmente desde la orilla de la corona. En este punto se construirá la canaleta de coronamiento.

- **Manejo y disposición de material.**

El material proveniente de la excavación, estimado en 3271.22 m<sup>3</sup> a desalojar deberá ser llevado a un relleno autorizado y deberá ser manejado adecuadamente. Dicho material se transportará cubierto con lona y en vehículos adecuados. Se deberá elaborar un plan de desalojo, el cual se coordinará con los administradores del relleno.

La carga, transporte y descarga hasta el lugar ordenado estará incluido en el precio unitario de la partida Excavación de Taludes.

Si el material destinado para transportarse al botadero interfiere con la ejecución de trabajos posteriores a la excavación, el Contratista queda obligado a realizar el transporte hasta el lugar que ordene el Supervisor sin costo adicional para el Propietario.

Incluir como excavación los siguientes volúmenes:

- a. La excavación generada por el corte de los taludes.
- b. De existir, remoción del material de deslizamientos y derrumbes previo al inicio del proyecto.
- c. Excavación de drenajes y desagües. El Contratista efectuará por cuenta propia, cuando las exigencias requieran, el drenaje y desagüe del agua en la zona de trabajo. Durante las excavaciones el Contratista evitará enlodamiento, encharcamientos o circulación de agua que pudiera afectar a las obras, el avance de los trabajos, obstruir accesos, producir derrumbes, etc. Para tal fin las aguas freáticas o de procedencia superficial, etc. serán controladas y/o delimitadas por medio de diques, canaletas de drenaje, bombeo, etc. descargándolas a una distancia o sitios tales que no regresen al área de trabajo, ni ocasionen problemas aguas abajo.
- d. Excavación y compactación para canaletas de bermas, corona y graderías disipadoras. El término compactación se refiere a las operaciones necesarias para aumentar la densidad del material de relleno mediante la expulsión de aire y/o agua contenidos en los espacios intermedios con la finalidad de alcanzar la estabilidad requerida. La compactación se hará manualmente o con equipos ligeros.

La Excavación no deberá incluir el material de derrumbes y deslizamientos atribuibles al método de operación del Contratista.

Se entenderá por deslizamiento, el desplazamiento inusitado de materiales, sobre una superficie de falla y formada en la masa del material originalmente considerado. Por derrumbes se entenderá la precipitación repentina de materiales, desde un lugar alto, siguiendo una trayectoria cualquiera.

Durante la construcción de cualquier obra, el Contratista deberá llevar a cabo las obras de protección necesarias para reducir al mínimo la posibilidad de que se presenten derrumbes o deslizamientos y tomará por su cuenta todas las precauciones que crea conveniente para prevenirlos.

El Contratista no recibirá ningún pago por concepto de las excavaciones que resulten de sus operaciones, bien sea por las condiciones del terreno, por la acción de agentes naturales sobre el mismo o por las que ejecuta para facilitar sus operaciones de construcción o por cualquier otra causa.

Si el Contratista, como resultado de un descuido en sus operaciones de excavación, afloja o altera el material de modo que sea necesaria su remoción, el Ingeniero Supervisor podrá ordenarle remover estos materiales, utilizando procedimientos satisfactorios, sin que por este motivo perciba compensación alguna.

Se considerará como negligencia del Contratista, el apilamiento inadecuado de materiales del trabajo cerca de los bordes de las excavaciones en terreno inestable y la omisión de las precauciones necesarias para prevenir derrumbes así como todos aquellos factores, que a juicio del Ingeniero Supervisor pongan en peligro la estabilidad de la obra por culpa del Contratista. Todos los materiales provenientes de derrumbes y deslizamientos, serán retirados por el Contratista como y cuando ordene el Ingeniero Supervisor ó si éste lo considera necesario, aquel deberá reparar los perfiles y secciones transversales afectados.

La disposición de los materiales provenientes de derrumbes o deslizamientos deberá hacerse en la forma y en el lugar que indique el Ingeniero Supervisor.

- **Medición y pago.**

Se medirán y pagarán los metros cúbicos realmente excavados y aceptados en su posición original por el método del promedio del área extrema, de acuerdo a los límites establecidos en los planos o los indicados por la Supervisión.

e) **Canaletas de concreto y graderías disipadoras**

- **Descripción.**

Este trabajo consistirá en la construcción de las canaletas de concreto ubicadas en la corona y en la terraza intermedia, así como también la construcción de las graderías disipadoras. Se realizarán de acuerdo con estas especificaciones y en conformidad razonable con los detalles y localizaciones indicados en los planos o establecidos por el Ingeniero.

- **Métodos de construcción.**

Una vez hecha la excavación se procederá a colocar las formaletas, que podrán ser de hierro o madera y las cuales deberán acuñarse de tal manera, que no se deformen al ser vertido el concreto. Las formaletas deberán nivelarse para ajustarse a los niveles mostrados en los planos con una tolerancia de 1 cm. en más o menos. Las canaletas en curvas se harán con duelas de madera que queden sin angulosidades para que el concreto forme una curva continua y uniforme.

El concreto para las canaletas y graderías se proporcionará para que soporte una carga mínima de ruptura a la compresión de  $210 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días. Se mezclará por medio de una revolvedora mecánica aprobada por el supervisor y en ningún caso su capacidad será menor de 6 pies cúbicos. Los materiales se mezclarán por lo menos durante 1 1/2 minutos.

El concreto estará sujeto a la aceptación o al rechazo por medio de la inspección visual en el lugar de la obra. No se permitirá el reemplado del concreto.

El contratista deberá presentar la siguiente información para su aprobación:

- a. El tipo y fuentes de agregados
- b. El tipo y fuentes de cemento.

- c. Pesos de balanza de cada agregado propuesto en términos kilogramos por metro cúbico de concreto.
- d. Cantidad de agua propuesta en términos de kilogramos por metro cúbico de concreto.
- e. Cantidad de cemento propuesta en términos de kilogramos por metro cúbico de concreto.
- f. Contenido de aire.
- g. Asentamiento.

Cuando se recurre a un proveedor comercial el Contratista deberá proporcionar una certificación, con cada carga de camión de concreto, que certifique que el material y las proporciones de mezcla utilizadas están en conformidad con la mezcla aprobada.

El Ingeniero podrá hacer y probar cilindros para determinación de resistencia.

Las formaleas se diseñarán y construirán de modo que puedan ser sacadas sin dañar el concreto. Deberán estar libres de pandeo y alabeo y estarán construidos de modo que el concreto acabado tenga la conformación y dimensiones indicadas en los planos, y deberán ajustarse a la alineación y a la rasante.

En ningún caso se usará concreto que tenga más de 30 minutos de elaborado. El proporcionamiento deberá hacerse de manera de no rebasar ciertos límites que se indican a continuación:

- a. Máximo contenido neto de agua: será de 25 litros por cada bolsa de cemento de 94 libras.
- b. El límite de consistencia no excederá de 10 cm. Las dosificaciones y clases de todo material que entre a formar parte de la mezcla están sujetas a la aprobación del supervisor.
- c. Cuando el supervisor lo considere necesario, podrá ordenar tomar muestras y efectuar las pruebas que él crea adecuadas.



- d. El concreto se vaciará en las formaletas en forma continua y se acondicionará en éstas mediante vibradores de 1 1/4" a 2" de diámetro. Las formaletas podrán ser retiradas después de transcurridas 24 horas.
- e. Una vez retiradas las formaletas se procederá a dar un acabado a las canaletas mediante un afinado con mezcla de arena y cemento en proporción volumétrica de 1:2. La superficie de los cordones y cunetas deberán estar humedecidas convenientemente. El agregado de este mortero deberá pasar en su totalidad por una malla no mayor de un milímetro. El espesor del afinado en los cordones no deberá ser mayor de 3 mm. y en las cunetas no menor de 1 cm. ni mayor de 2cm.
- f. Una vez efectuado el afinado se procederá al curado de los cordones y cunetas. Este consistirá en mantenerlos humedecidos durante un tiempo no menor de 3 días mediante riego o cualquier otro procedimiento aprobado por el supervisor.

- **Medición y pago.**

Esta partida se pagará por metro lineal terminado esto incluye encofrado y desencofrado.

**f) Revegetación de taludes con zacate vetiver y barrenillo.**

- **Descripción.**

El trabajo de la revegetación del talud de corte tiene como propósito dejarlos conformados por periodos largos y que estos no colapsen por las condiciones climatológicas propias de cada zona; ésta actividad tiene como primera medida revegetar con zacate vetiver y barrenillo todo el talud con trazos transversales, con el propósito de evitar el arrastre de materiales y desconformación de los mismos causados principalmente por fenómenos hidrometeorológicos.

- **Materiales a utilizar.**

Se utilizarán para revegetar el talud zacate Vetiver y zacate barrenillo.

Las características que tiene el zacate vetiver (*Vetiveria ziznoides*) son las siguientes: la macolla o el haz tiene que tener un diámetro no menos de 10 cm y un distanciamiento entre cada uno de 10 a 12 cm y una profundidad aproximada de 10 cm. Se estima que se sembrarán 10 haces por metro lineal.

El Zacate barrenillo (*Paspalum notatum*) de preferencia se deberá sembrar asexualmente es decir a través de esquejes verdes de 3-10 cm. de longitud y con presencia de sistema radicular.

- **Métodos de construcción.**

Con la siembra del zacate vetiver (*Vetiveria ziznoides*), se deberá sembrar en hileras dispuestas perpendicularmente y con distanciamiento variable de acuerdo a la pendiente del terreno. La distancia entre barreras vivas deberá ser de 1 metro (distancia inclinada) en aquellos taludes con pendientes de 45°. En pendientes mayores de 45° y hasta 60° de las barreras deberán sembrarse a 0.80 metros de distancia inclinada.

Para el ahoyado y la siembra deberá hacerse después del trazo de las hileras sobre el terreno. Se podrán abrir surcos entre 15 a 20 cm de profundidad y 15 de cm de ancho para depositar los haces de vetiver. De preferencia esta práctica se debe hacer al inicio del período lluvioso, posteriormente a los 20-25 días después de la siembra se recomienda hacer la primera fertilización con formula 16-20-0 (N-P-K), a los 35-40 días comenzar con la primera poda del tallo para estimular el crecimiento radicular y conformando a corto plazo el talud.

Para la siembra del zacate barrenillo (*Paspalum notatum*), de preferencia también es importante iniciar la siembra en el periodo lluvioso ahoyando a una profundidad de 5-8 cm de manera que la densidad de siembra cubra el área entre hilera de vetiver, se deberá realizar una primera fertilización al voleo con formula 20-20-0 (N-P-K),.

En aquellos lugares en donde no se presente adecuadas condiciones para el crecimiento de las gramíneas, se colocará primero una capa de tierra vegetal de 20 cm de espesor compactada manualmente y luego se colocarán los zacates. Este sector comprende pero no se limita al cuerpo de la formación TB4, cualquier otro lugar que necesite la colocación de tierra vegetal previa a la siembra de las gramíneas, será evaluado por la Supervisión.

- **Medición y pago.**

El pago se realizará por cada metro cuadrado de superficie cubierta con barrera viva bien desarrollada de zacate vetiver y zacate barrenillo. La barrera de zacate vetiver deberá estar bien cerrada sin espacios libres que permitan la formación de surcos de erosión y sin daños a su follaje. El zacate barrenillo deberá estar bien enraizado y sin daños.

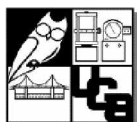
Incluirá también la colocación y compactación de la capa vegetal en aquellos lugares que se requiera o la Supervisión dictamine necesaria.

## 8.2.9 Presupuesto General de la Construcción del Talud.

El presupuesto general de la construcción del talud se muestra en la Tabla 8.13.

Tabla 8. 13 . Presupuesto General de la Construcción del Talud.

Nombre del proyecto: DISEÑO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUD DE COLONIA BRISAS DEL SUR, SANTO TOMÁS.							
Número	Partidas y Actividades	Unidad	Cantidad	Costo Unitario, US \$	Valor parcial, US\$	%	
1	<b>TRAZO</b>						
1.1	Topografía general	S.G.	1.00	2,500.00	2500	7.93%	
					Sub total, US\$:	<b>2500</b>	<b>7.93%</b>
2	<b>MOVIMIENTO DE TIERRAS</b>						
2.1	Limpieza y desmonte	Ha.	0.14	1,288.94	185.30	0.59%	
2.2	Conformación de talud	m3	3,271.22	7.00	22,898.54	72.62%	
2.3	Construcción de canal de bermas	ml	106.51	2.62	279.06	0.88%	
2.4	Construcción de canal de coronamiento	ml	78.87	2.62	206.64	0.66%	
2.5	Construcción de gradas disipadoras	ml	122.01	2.62	319.67	1.01%	
2.6	Remoción de estructuras existentes	S.G.	1.00	400.00	400.00	1.27%	
					Sub total, US\$:	<b>24,289.20</b>	<b>77.03%</b>
3	<b>PROTECCIÓN DE TALUDES</b>						
3.1	Protección de taludes con zacate vetiver	m2	1,437.59	3.30	4,744.05	15.04%	
					Sub total, US\$:	<b>4,744.05</b>	<b>15.04%</b>
				<b>TOTAL COSTO DIRECTO:</b>	<b>31,533.25</b>	100.00%	
				<b>COSTOS INDIRECTOS Y UTILIDAD, 15%:</b>	<b>4,729.99</b>		
				<b>IVA, 13%:</b>	<b>4,714.22</b>		
				<b>COSTO TOTAL DEL PROYECTO:</b>	<b>40,977.45</b>		
				<b>COSTO INDICE, US\$/m2</b>	<b>28.50</b>		





## 9 CONCLUSIONES.

- La microfábrica, la succión y eventualmente la cementación son propiedades que se encuentran presentes en los suelos volcánicos, las mismas tienen un nivel de influencia en dichos suelos, en unos operan mejor que en otros, a ello puede deberse la estabilidad de los taludes casi verticales en suelos no cohesivos.
- Los procesos de intemperismo físico ocasionan la formación de discontinuidades paralelas a la cara del talud, que se exhiben como fisuras y grietas verticales que los separan en bloques. En las distintas capas piroclásticas se genera un proceso de exfoliación que es el mecanismo que gobierna la ruptura de esos materiales, y cuando sufren la acción de detonantes como la lluvia y sismos fuertes se produce el derrumbe. En las ignimbritas de matriz gruesa las rebanadas miden decenas de centímetros.
- Las lluvias contribuyen enormemente en el proceso de inestabilidad de taludes, ya que favorecen la erosión y saturan los suelos disminuyendo la succión. Por esta razón la mayor cantidad de deslizamientos en Santo Tomás ocurren en la época de invierno.
- Una fase importante en el desarrollo de la solución a los problemas de carácter geológico, comprenden los ensayos de laboratorio. La utilización de parámetros granulométricos que presentan mayor confiabilidad en los resultados, conlleva a diseños más seguros, así por ejemplo, evaluar un suelo cuyas partículas tengan gruesos mayores a 5 cm generará errores en los parámetros que se obtienen de los ensayos de corte y triaxial, es más recomendable en este caso realizar un ensayo in situ.
- La aplicación de un modelo de fallas en el análisis de estabilidad de taludes, se basa en las observaciones hechas en campo. Requiere un análisis detallado de todas las características geológicas, geometría, condiciones del nivel freático, cargas

impuestas, etc. Influye también en la estabilidad, las modificaciones efectuadas al ambiente original del talud.

- La presencia de un paleosuelo es determinante en las condiciones de fallamiento ya que es en ese punto donde se genera la falla. Debido a lo anterior, en el análisis se han utilizado los parámetros provenientes de dichas capas.
- Cuando la pendiente de los estratos se encuentran proclive al deslizamiento se generarán superficies de falla circulares guiadas por los paleosuelos (ver Figura 8.12), sin embargo, debido a que en el talud de análisis no se cuenta con éste tipo de condiciones (ver Figura 2.8), no existirán fallas circulares. Además si se plantea en el programa GEO-SLOPE secciones con pendiente de estratos contraria al deslizamiento simulando falla circular, se generan volúmenes de masa en movimiento relativamente grandes (ver Figura 8.9), los cuales no representaran las condiciones reales.
- Cuando se plantean superficies de fallas planas similares a las que se presentan en las formaciones rocosas, el ángulo de deslizamiento en la condición crítica es inaceptable para éste tipo de material, ya que el ángulo de deslizamiento real observado ronda los 80 grados aproximadamente, pues la superficie de falla es casi paralela a la cara del talud.
- Con los factores de seguridad encontrados en el programa GEO-SLOPE, es evidente que los resultados de los análisis efectuados en dicho programa no representan las condiciones críticas reales, ya que los mecanismos de falla real está regidos por el proceso de exfoliación, el empuje de las raíces, las altas condiciones de humedad en el talud y la sismicidad.
- La zona de las formaciones geológicas analizadas la que se considera mas crítica en cuanto a estabilidad asociada con la plasticidad proveniente de la meteorización, es el paleosuelo de la Formación TB4 ya que ésta presenta mayor gravedad específica

y menor tamaño de partículas (40% es menor que  $0.3 \mu\text{m}$ ); en el caso del paleosuelo de la Formación Cuscatlán, el 26.1% es menor que  $0.4 \mu\text{m}$ ; en la parte inferior del paleosuelo de TB3, el 22.67% de las partículas es menor que  $0.4 \mu\text{m}$ ; en la Formación Cuscatlán, el 21.78% es menor que  $0.5 \mu\text{m}$ ; en la Unidad TB3, el 20.5% es menor que  $0.6 \mu\text{m}$ ; en la Unidad C, el 19.31% es menor que  $0.7 \mu\text{m}$ .

- Debido al incremento de las presiones de poros que se generán por el agua sub-superficial provoca una disminución de los esfuerzos efectivos causando la disminución de la capacidad soportante del talud, lo que provoca inestabilidad del mismo.
- El volumen de material a remover del talud de la col. Brisas del Sur es  $3271 \text{ m}^3$ , considerando un factor de abundamiento de 1.38. (Ver tabla 8.13).
- El volumen de material a depositarse en la cabecera de la quebrada El Cacao es  $12685 \text{ m}^3$ .
- El área en planta del relleno de la cabecera El Cacao es de  $3364.18 \text{ m}^2$ . El perímetro de dicho relleno es de  $482.74 \text{ m}$  y el ancho máximo es de  $32.08 \text{ m}$ .
- Debido a que TB3 es el estrato sobre el que se asentará el relleno de la cabecera de la quebrada El Cacao, en el Anexo B referente al ensayo de penetración estándar, se puede tener una idea aproximada de la capacidad de soporte (qu) dividiendo el número de golpes obtenidos para TB3 entre diez (recomendación para suelos limosos). El resultado es de  $1.1 \text{ kg/cm}^2$  a la profundidad de  $3.5 \text{ m}$ .
- La solución propuesta para el talud está regida por los factores de fallamiento:
  - a) Exfoliación: siembra de gramíneas.
  - b) Erosión por lluvias: drenaje superficial.
  - c) Raíces: Eliminar árboles que generan el problema.
  - d) Pendiente Alta: Reducción.





## **10 RECOMENDACIONES.**

- Evitar que las aguas grises y aguas negras provenientes de las casas ubicadas en la colonia 3 de Mayo y las que se ubican sobre la calle Alberto Masferrer descarguen en la quebrada El Cacao, ya que generan deterioro ambiental. Se debe proceder a diseñar un adecuado alcantarillado en la zona lo más pronto posible antes que se desarrolle el proyecto del relleno.
- Se deben retirar los desechos sólidos depositados en la quebrada El Cacao y llevarlos a un botadero legal de desechos sólidos antes que se inicie la construcción del relleno.
- Se deberá mantener informados a los residentes de la zona de la ejecución de las obras mediante reuniones y avisos en medios de comunicación masiva. Se debe de evitar en lo posible especulaciones y rumores colectivos para prevenir conflictos sociales y ambientales.
- Para garantizar en alguna medida el mantenimiento y el buen estado de los proyectos, se debe realizar un programa de educación ambiental a los habitantes de los alrededores, especialmente en lo que concierne al manejo de los desechos sólidos, ya que la población está acostumbrada a depositar basura en la quebrada El Cacao, debido en parte a la falta de conciencia ambiental existente.
- Brindar mantenimiento continuo a los drenajes superficiales y remover la basura acumulada en los mismos, con el objeto que las canaletas puedan evacuar correctamente la escorrentía superficial en los taludes y en el relleno, evitando así problemas como la erosión.

- Es importante proporcionar un adecuado mantenimiento a los árboles plantados sobre el relleno para evitar los problemas derivados de la erosión que pueden generar inestabilidades.
- Controlar la construcción de viviendas en las proximidades de la corona del talud de la col. Brisas del Sur para impedir el incremento de fuerzas movilizadoras que promuevan la inestabilidad del mismo.
- Mantenimiento del talud en la col. Brisas del Sur para impedir la erosión de las formaciones geológicas, este consistirá en el control de malezas, fertilización y riego. Con las gramíneas propuestas, será necesario brindar el control de malezas manual por lo menos una vez al año. La fertilización consistirá en la aplicación de 1-1.5 onzas de urea 46% N + 5% S al inicio de la época de lluvias, repitiéndola 1 mes antes de la salida de las lluvias. Si la plantación se realiza en época seca, es necesario regar durante el primer mes todos los días, luego 2 veces por semana hasta que las plantas se establezcan.
- El material de recorte del talud de la col. Brisas del Sur puede colocarse en la quebrada El Cacao para utilizarse como material de relleno.
- Previo a la conformación del relleno de la cabecera de la quebrada El Cacao, se debe realizar un ensayo de consolidación en TB3 ya que sobre éste se depositarán los materiales.
- Para el relleno de la cabecera de la quebrada El Cacao, se debe realizar un ensayo triaxial en TB3 para obtener parámetros de ángulo de fricción, cohesión y capacidad de soporte del suelo.
- Durante la conformación del talud se debe controlar la acción del polvo, aplicando capas de agua mediante un riego controlado. Dicha medida servirá para evitar infecciones respiratorias agudas en la población y en los empleados del contratista.

- Proporcionar equipo de protección requerido durante el desarrollo del proyecto y supervisar que se use adecuadamente.
- La maquinaria que se utilice debe estar con buenos silenciadores y con buena combustión.
- La seguridad peatonal consistirá en la ubicación de banderilleros y señales claras y oportunas al inicio y al final del trabajo.
- Dado el tonelaje del equipo a utilizar, debe exigirse al contratista que en caso de averías de las calles, repare a la brevedad cualquier daño efectuado, sin afectar el monto inicial del proyecto.
- El financiamiento del proyecto puede hacerse mediante el Fondo de Desarrollo de El Salvador (FODES), donaciones de Bancos, organismos de gobierno tal como el Fondo de Inversión Social (FISDL), o mediante ayudas de agencias internacionales para el desarrollo.
- Desarrollar un análisis de estabilidad de taludes que simule las condiciones de esfuerzos generados por las raíces.
- Se deberá obtener el permiso de tala de árboles en el relleno de la cabecera de la quebrada El Cacao. Si se afectarán árboles protegidos por Medio Ambiente se deberá acudir a solicitar el permiso al MARN. Si ocurre lo contrario, se acudirá al MAG.



## 11 BIBLIOGRAFIA

- Bommer J. J., Rolo R. y Fernández P.[1998]. Propiedades Mecánicas de la Tierra Blanca y la Inestabilidad de Taludes. Revista ASIA, No. 129, El Salvador.
- Calderón M. O., Paredes M.A., Rodríguez H.E. [1997]. Evaluación del riesgo en términos de estabilidad de taludes para el área metropolitana de San Salvador. Trabajo de graduación para optar al grado de Ingeniero Civil en la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”.
- Consorcio Salvador e. Italtelna Italconsult-Geotérmica Italiana [1988]. Estudio vulcanológico. San Salvador-Programa di Ricostruzione. Republica Italiana, Ministero degli Affari Esteri, Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo. Ministerio de Obras Públicas. Informe Inédito.
- Dull R.A.; Southon J.R. and Sheets P. [2001]. Volcanism, Ecology and Culture: A reassessment of the volcan Ilopango TBJ eruption in the Southern Maya Realm. Latin American Antiquity Vol. 12 Number 1, Society for American Archeology.
- Goodyear, w. A. [1880]. Earthquake and volcanic phenomena. December 1879 and January 1889 in the Republic of Salvador, Central America. Star & Herald Office. Panamá. 56 pages.
- Hart, W.J., and Steen McIntyre, V., [1983]. Tierra Blanca Joven Tephra from the AD 260 Eruption of Ilopango Caldera: in Archeology and Volcanism in Central America. University of Texas Press, Austin, Texas, p. 14-34.
- Hernández, E.W. [2004] Características geomecánicas y vulcanológicas de las tefras Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango El Salvador. Trabajo de graduación

presentado para optar al grado de Maestría en Tecnología Geológicas, Universidad Politécnica de Madrid, España.

- Mecánica de Suelos, Guía de laboratorio, 1997, San Salvador, El Salvador, Editorial UCA.
- Monsalve, [1999] Hidrología para Ingenieros. Alfaomega
- Rolo R., Bommer J., Houghton B., Vallance J., Berdousis P., Mavrommati Ch., and Murphy W. [2004]. Geologic and Engineering characterization of Tierra Blanca pyroclastic ash deposits. Imperial College London. In Natural Hazards in El Salvador. The Geological Society of America. Special paper 375.
- Rose, W., Conway, F. M., Pullinger, C.R., Deino, A., and McIntosh, W.C. [1999]. An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America: Bulletin of Volcanology, v. 61. p. 106-120.
- Schmidt-Thome, M. [1975]. The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America), a basis for city development and planning. Pg 207-228. Hannover.
- GEO-SLOPE Internacional Ltd. [2002]. SLOPE/W for slope stability análisis. Calgary, Alberta, Canada.
- Universidad Nacional de Salta, Instituto Geonorte, Escuela del Doctorado, [2003] Procesos volcániclos subaéreos. Curso Internacional De Volcanología De Campo De Los Andes Centrales X Edición.
- Vallance J., and Houghton B. [1998]. The AD 260 eruption at Lake Ilopango, El Salvador: A complex explosive eruption through a caldera lake. National Science Foundation, Research Proposal.

- Ven Te Chow, [1994] Hidráulica de canales abiertos. McGraw – Hill Interamericana S. A. Colombia.
- William H., and Meyer-Abich H. [1953]. El origen del Lago de Ilopango: Comunicaciones del Instituto Tropical Investigaciones Científicas v. 26; p. 1-8.
- Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador. [www.aimecuador.org](http://www.aimecuador.org) , mayo 2005.
- Fondo de Inversión Social. [www.fisd.gov.sv](http://www.fisd.gov.sv) , agosto 2005.
- GEO-SLOPE Internacional Ltd. [www.geo-slope.com](http://www.geo-slope.com) , julio 2005.
- Ministerio de Obras Públicas. [www.mop.gov.sv](http://www.mop.gov.sv), agosto 2005.
- Secretaría para la integración económica centroamericana. [www.sieca.org.gt](http://www.sieca.org.gt) , agosto 2005.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales. [www.snte.gov.sv](http://www.snte.gov.sv), mayo 2005.





# **ANEXO A**

**RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X**





## RESULTADOS DE ANALISIS EN MUESTRAS DEL SANTO TOMAS

Origen de muestra: Santo Tomas

Tabla 1: Resultados de análisis petrográfico macroscópico y por medio de la técnica de difracción de rayos X.

No. de muestra	Descripción Macroscópica	Composición Mineralógica	%
TB3-A CT20-05 Muestra de paleosuelo, Col. Brisas del Sur, Santo Tomás	Muestra de color café- claro con cristales de color blanco, verdoso y negro.	Albita – $\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$ Cristobalita – $\text{SiO}_2$ Cuarzo – $\text{SiO}_2$ Magnesiohornblende – $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4\text{Al}(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{F})_2$	56 22 12 8
TB3-B CT21-04 Muestra de la base de U. TB3-B, Col. Brisas del Sur, Santo Tomás	Muestra de color beige, terrosa	Anortita – $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ Cristobalita – $\text{SiO}_2$ Magnesiohornblende – $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	51 27 22

Los minerales encontrados son principalmente plagioclasa (anortita y albita), cristobalita, cuarzo y magnesiohornblenda.

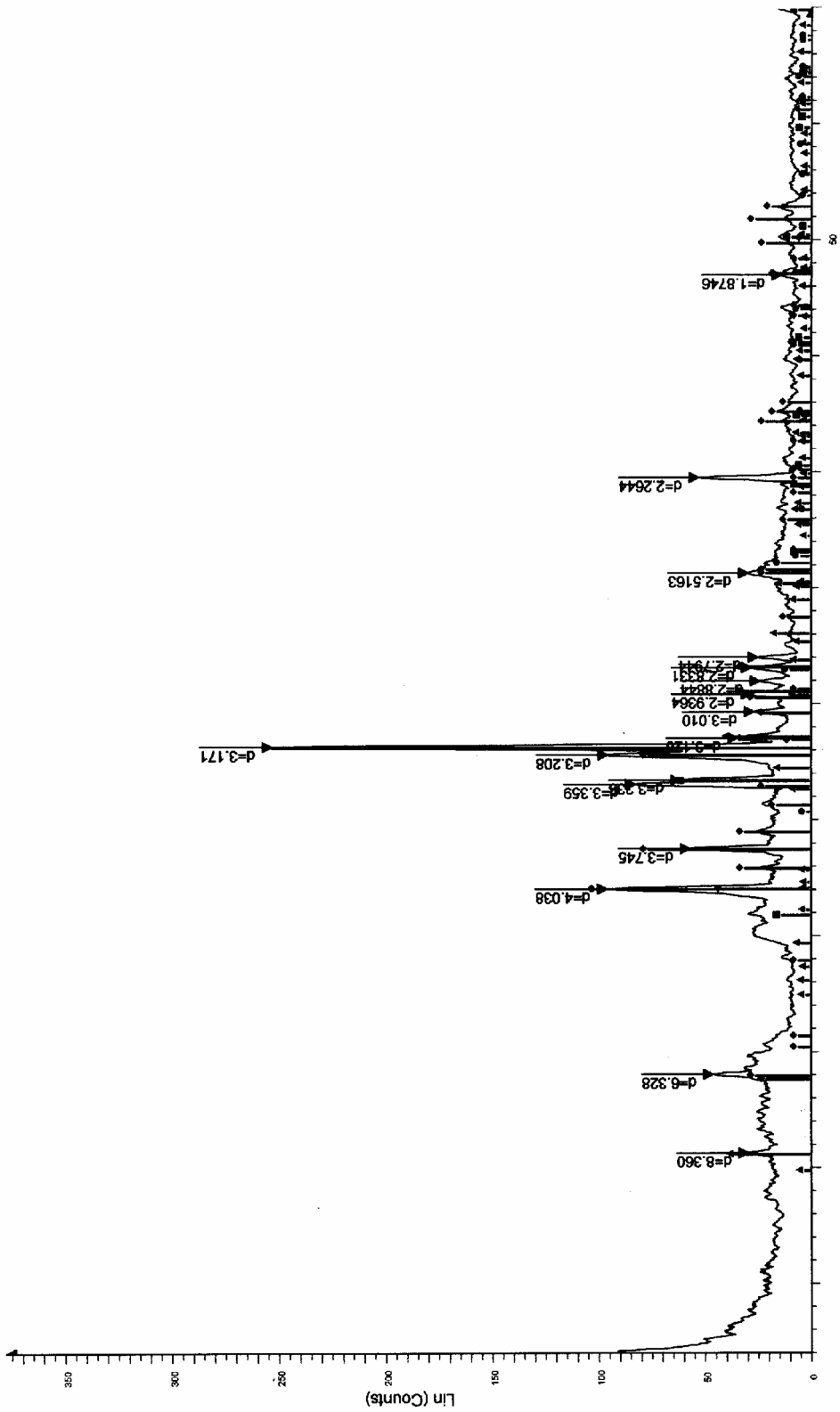
La plagioclasa es un mineral común y ampliamente distribuido en las rocas ígneas constituyendo más de 50% de todas rocas ígneas. La estructura de las plagioclasas es una red tridimensional continua de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  y  $\text{AlO}_4$ , con los iones de carga positiva Na y Ca. Usualmente son transparentes en macroscopía casi similar al color de cuarzo. Solamente se distingue de cuarzo por su clivaje o exfoliación.

**El cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) es un mineral abundante y se encuentra en muchos tipos de rocas, como mineral esencial, ya sea como accesorio o secundario. Es la forma estable del grupo de sílice a la presión atmosférica, a las temperaturas hasta de  $867^\circ\text{C}$ .**

**La cristobalita pertenece al grupo de sílice donde se forma a baja temperatura ( $100\text{-}150^\circ\text{C}$ ).**

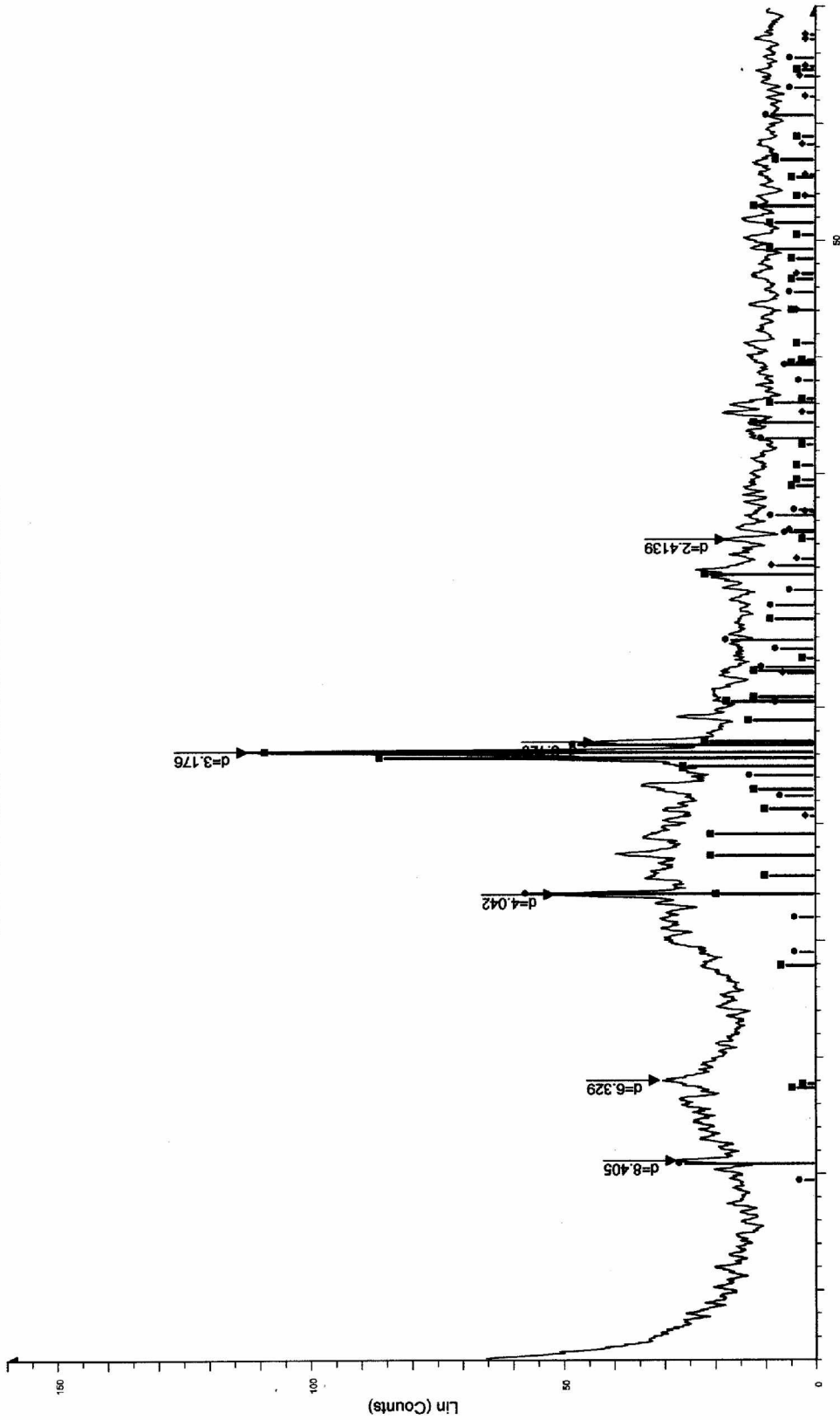
**La magnesiohornblenda es un tipo de anfíbol. La estructura del anfíbol es típica de los tetraedros de  $\text{SiO}_4$ . Se encuentra en abundancia en las rocas ígneas.**

# TB3-A Santo Tomas muestra total



TB3-A Santo Tomas muestra total - File: CT20-05 TB3-A.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.0 s - Temp.: 27.0 °C - Time Started: 16 s - 2-  
 39-1425 (\*) - Cristobalite, syn - SiO2 - Y: 39.58 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056  
 10-0393 (\*) - Albite, disordered - Na(Si3Al)O8 - Y: 100.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056  
 33-1161 (\*) - Quartz, syn - SiO2 - Y: 22.92 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056  
 45-1371 (i) - Magnesiohombrende, ferroan - Ca2(Mg,Fe+2)4A(Si7Al)O22(OH,F)2 - Y: 14.58 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

TB3-B Santo Tomas muestra total



2-Theta - Scale

TB3-B Santo Tomas muestra total - File: CT21-05 TB3-B.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.0 s - Temp.: 27.0 °C - Time Started: 16 s - 2-  
 41-1481 (I) - Anorthite, sodian, disordered - (Ca<sub>2</sub>Na)(Si<sub>2</sub>Al)<sub>4</sub>O<sub>8</sub> - Y: 85.83 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056  
 39-1425 (°) - Cristobalite, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 50.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056  
 21-0149 (D) - Magnesiohombiende, ferroan - Ca<sub>2</sub>(Mg,Fe<sup>3+</sup>)(Si,Al)<sub>8</sub>O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub> - Y: 41.67 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

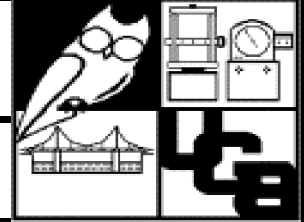
# **ANEXO B**

**RESULTADOS DE ENSAYOS DE PENETRACIÓN  
ESTÁNDAR**





# LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



ENSAYO: PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84.  
CONTENIDO DE HUMEDAD

LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: Quebrada El Cacao

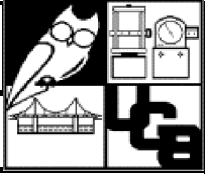
SONDEO No: 1

Profundidad	Cápsula	Tara	Suelo Húmedo+ Tara	Suelo Seco + Tara	Agua	Suelo Seco	Contenido de Humedad
(m)	No.	WT (g)	W <sub>H+T</sub> (g)	W <sub>S+T</sub> (g)	W <sub>w</sub> (g)	W <sub>S</sub> (g)	w (%)
0.5	1 grande	15.12	50.34	40.86	9.48	25.74	36.83
1	2 grande	15.4	62.86	47.41	15.45	32.01	48.27
1.5	3 grande	15.29	61.19	46.81	14.38	31.52	45.62
2	4 grande	15.27	73.92	53.81	20.11	38.54	52.18
2.5	5 grande	15.48	71.05	53	18.05	37.52	48.11
3	6 grande	15.36	73.86	55.18	18.68	39.82	46.91
3.5	7 grande	15.34	84.34	71.06	13.28	55.72	23.83
4	8 grande	15.03	69.56	55.64	13.92	40.61	34.28
4.5	9 grande	15.06	64.21	52.14	12.07	37.08	32.55
5	10 grande	15.4	51.59	42.86	8.73	27.46	31.79
5.5	7 pequeña	9.25	33.16	24.81	8.35	15.56	53.66

PESO DEL AGUA:  $W_w = W_{H+T} - W_{S+T}$

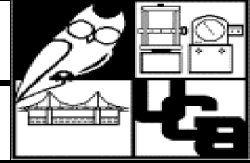
PESO DEL AGUA:  $W_s = W_{S+T} - W_w$

CONTENIDO DE HUMEDAD:  $w = \frac{W_w}{W_s} * 100$

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS			
ENSAYO:		PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84. CLASIFICACIÓN	
LOCALIZACIÓN DEL SONDEO:		Quebrada El Cacao	
SONDEO No:		1	
EQUIPO:		Penetración Estándar (S.P.T)	
PROF.	No. GOLPES	CLASIFICACIÓN	w
(m)	N		%
0.5	1	Sedimento. Arena limosa de baja plasticidad; presencia de gravilla de pómez; color café oscuro	36.83
1	1	Sedimento. Arena limosa de baja plasticidad; presencia de gravilla de pómez; color café oscuro	48.27
1.5	1	Sedimento. Arena limosa de baja plasticidad; presencia de gravilla de pómez; color café oscuro	45.62
2	1	Arena limosa de mediana plasticidad, color café oscuro; tamaño de pómez < 2.54 cm	52.18
2.5	1	Arena limosa de baja plasticidad, color café oscuro; tamaño de pómez < 2.00 cm	48.11
3	4	Arena limosa de mediana plasticidad, color café oscuro; tamaño de pómez < 3.5 cm. Sedimento.	46.91
3.5	11	Arena limosa de baja plasticidad, color café oscuro; tamaño de pómez < 3.5 cm. Sedimento.	23.83
4	15	Inicio de paleosuelo TB4 a 3.85 m. Limo de alta plasticidad, color café amarillento	34.28
4.5	11	Limo de alta plasticidad, color café amarillento	32.55
5	6	Formación TB4. Arena limosa de baja plasticidad color café claro	31.79
5.5	21	TB4 cenizas. Arena limosa de baja plasticidad color café claro	53.66

La presencia de agua comienza a notarse a la profundidad de 1 m.

# LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



ENSAYO: PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84.  
CLASIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE AGUA

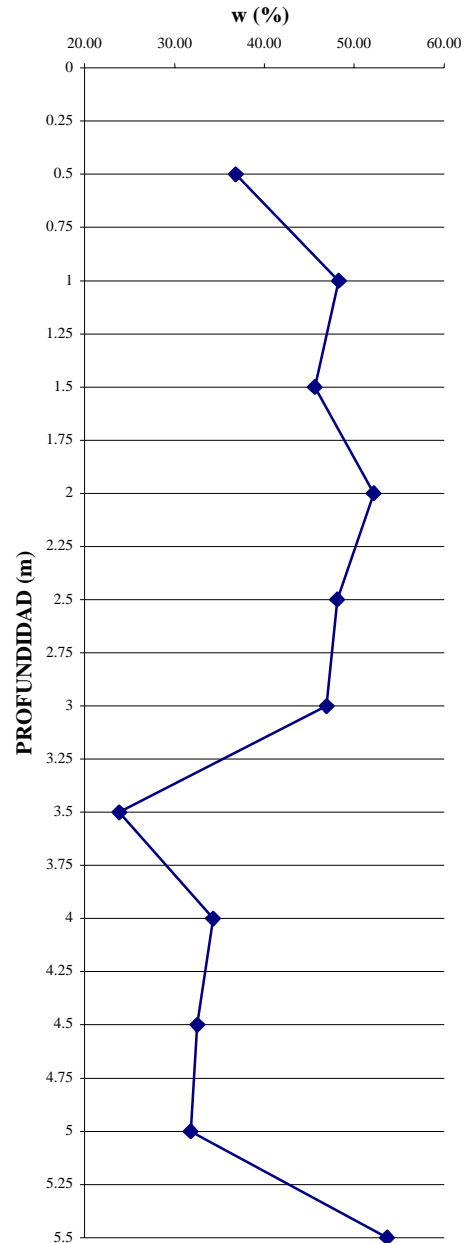
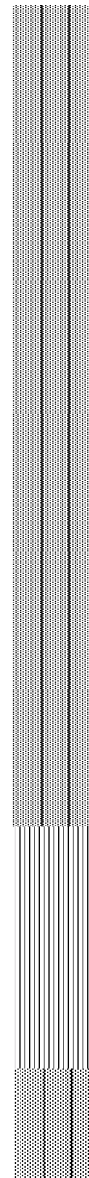
LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: Quebrada El Cacao

SONDEO No: 1

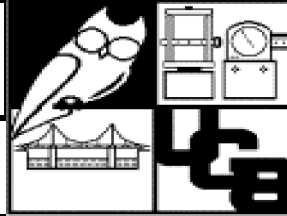
EQUIPO: Penetración Estándar (S.P.T)

SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS
	GUIJARROS
	GRAVAS
	ARENAS
	ARENA LIMOSA (Baja Plasticidad)
	ARENA ARCILLOSA (Plástica)
	LIMOS ARENOSOS LIMOS ARCILLOSOS LIMOS ORGÁNICOS (Baja o mediana Plasticidad)
	LIMOS ARCILLOSOS LIMOS INORGÁNICOS (Alta Plasticidad)
	ARCILLAS ARENOSAS ARCILLAS INORGÁNICAS ARCILLAS LIMOSAS (Baja o mediana plasticidad)
	ARCILLAS INORGÁNICAS ARCILLAS LIMOSAS (Alta plasticidad)
	SUELOS ORGÁNICOS (Baja o mediana plasticidad)
	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS, HUMUS

SIMBOLO



# LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



ENSAYO: PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84.  
CONTENIDO DE HUMEDAD

LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: Talud Brisas del Sur

SONDEO No: 1

Profundidad	Cápsula	Tara	Suelo Húmedo+ Tara	Suelo Seco + Tara	Agua	Suelo Seco	Contenido de Humedad
(m)	No.	W <sub>T</sub> (g)	W <sub>H+T</sub> (g)	W <sub>S+T</sub> (g)	W <sub>w</sub> (g)	W <sub>S</sub> (g)	w (%)
0.5	3	11.62	61.39	51.18	10.21	39.56	25.81
1	6	12.22	92.86	71.69	21.17	59.47	35.60
1.5	2	11.38	82.29	64.18	18.11	52.8	34.30
2	2a	11.55	76.71	59.42	17.29	47.87	36.12
2.5	1a	13.06	72.23	57.24	14.99	44.18	33.93
3	1	9.86	46.15	39.71	6.44	29.85	21.57
3.5	6a	10.59	48.23	42.81	5.42	32.22	16.82
4	5	9.56	50.55	43.51	7.04	33.95	20.74
4.5	3a	10.7	48.68	42.68	6	31.98	18.76
5	4a	11.99	54.7	47.74	6.96	35.75	19.47
5.5	5a	12.15	52.91	46.54	6.37	34.39	18.52

PESO DEL AGUA:  $W_w = W_{H+T} - W_{S+T}$

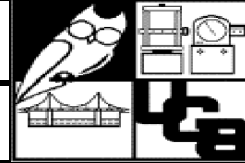
PESO DEL AGUA:  $W_s = W_{S+T} - W_T$

CONTENIDO DE HUMEDAD:  $w = \frac{W_w}{W_s} * 100$

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS			
ENSAYO:		PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84. CLASIFICACIÓN	
LOCALIZACIÓN DEL SONDEO:		Talud Brisas del Sur	
SONDEO No:		1	
EQUIPO:		Penetración Estándar (S.P.T)	
PROFUNDIDA D (m)	No. GOLPES N	CLASIFICACIÓN	w %
0.5	2	Unidad D; Arena Limosa de baja plasticidad; color café oscuro.	25.81
1	4	Unidad D; Limo de baja plasticidad ; color café claro; con raíces.	35.60
1.5	6	Unidad D;Limo de baja plasticidad; color café claro; con raíces.	34.30
2	7	Unidad D;Limo de baja plasticidad; color café claro; con raíces.	36.12
2.5	9	Unidad C; limo de baja plasticidad; color café claro.	33.93
3	16	Unidad C; limo de baja plasticidad; color café amarillento.	21.57
3.5	25	Unidad C; limo de baja plasticidad; color café amarillento; presencia de pómez en pequeñas cantidades <0.5 cm	16.82
4	26	Unidad C; limo de baja plasticidad; color café amarillento; presencia de pómez en pequeñas cantidades <1.5 cm	20.74
4.5	35	Unidad C. En 4.35 se ubica el estrato gris de la Unidad C; limo de baja plasticidad color café amarillento; presencia de pómez <1.5 cm	18.76
5	29	Unidad C; limo de baja plasticidad color café amarillento; presencia de	19.47
5.5	43	Unidad C; limo de baja plasticidad con 60% pómez; partículas de pómez	18.52

En este ensayo no se encontró nivel de agua.

# LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



ENSAYO: PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84.  
CLASIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE AGUA

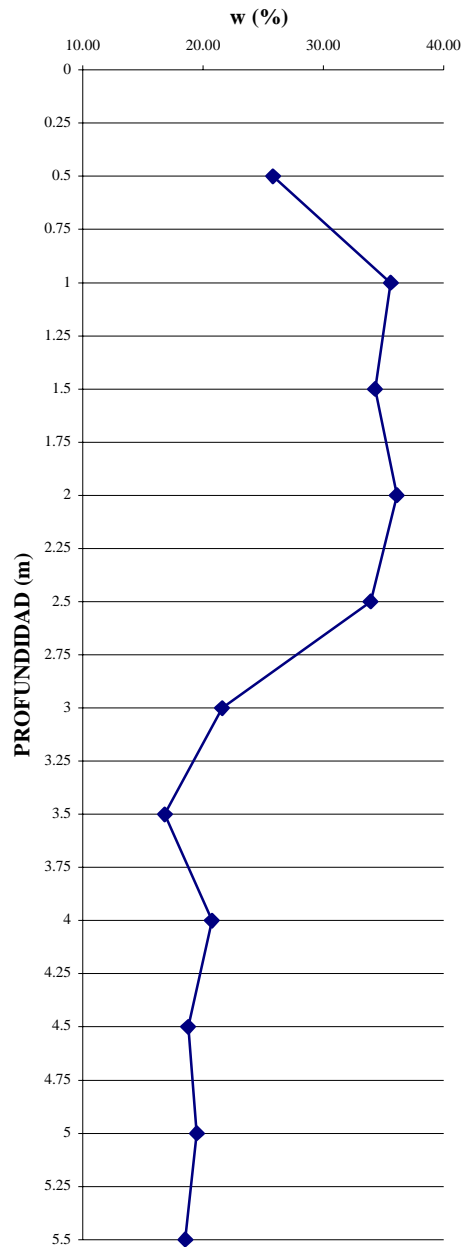
LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: Talud Brisas del Sur

SONDEO No: 1

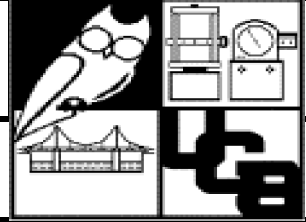
EQUIPO: Penetración Estándar (S.P.T)

SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS
	GUIJARROS
	GRAVAS
	ARENAS
	ARENA LIMOSA (Baja Plasticidad)
	ARENA ARCILLOSA (Plástica)
	LIMOS ARENOSOS LIMOS ARCILLOSOS LIMOS ORGÁNICOS (Baja o mediana Plasticidad)
	LIMOS ARCILLOSOS LIMOS INORGÁNICOS (Alta Plasticidad)
	ARCILLAS ARENOSAS ARCILLAS INORGÁNICAS ARCILLAS LIMOSAS (Baja o mediana plasticidad)
	ARCILLAS INORGÁNICAS ARCILLAS LIMOSAS (Alta plasticidad)
	SUELOS ORGÁNICOS (Baja o mediana plasticidad)
	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS, HUMUS

SIMBOLO



# LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



ENSAYO: PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84.  
CONTENIDO DE HUMEDAD

LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: Talud Brisas del Sur

SONDEO No: 2

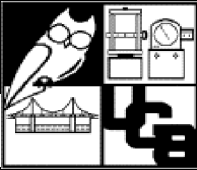
Profundidad	Cápsula	Tara	Suelo Húmedo+ Tara	Suelo Seco + Tara	Agua	Suelo Seco	Contenido de Humedad
(m)	No.	W <sub>T</sub> (g)	W <sub>H+T</sub> (g)	W <sub>S+T</sub> (g)	W <sub>w</sub> (g)	W <sub>S</sub> (g)	w (%)
0.5	1	10.01	39.19	34.22	4.97	24.21	20.53
1	2	10.05	48.17	41.18	6.99	31.13	22.45
1.5	3	10.07	40.8	35.72	5.08	25.65	19.81
2	4	9.94	46.59	40.02	6.57	30.08	21.84
2.4	5	9.99	57.06	47.3	9.76	37.31	26.16
2.5	6	9.98	57.99	48.12	9.87	38.14	25.88
3	7	10.05	57.57	45.19	12.38	35.14	35.23
3.5	8	10	67.83	55.71	12.12	45.71	26.51
3.8	9	9.98	63.66	53.12	10.54	43.14	24.43
4	14	7.99	50.66	36.68	13.98	28.69	48.73
4.5	10	9.93	56.88	38.55	18.33	28.62	64.05
5	11	10	71	52.75	18.25	42.75	42.69
5.5	12	9.98	80.39	56.99	23.4	47.01	49.78
6	13	8.42	72.88	60.15	12.73	51.73	24.61

PESO DEL AGUA:  $W_w = W_{H+T} - W_{S+T}$

PESO DEL AGUA:  $W_s = W_{S+T} - W_T$

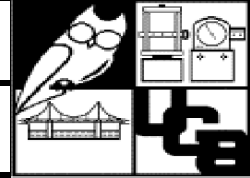
CONTENIDO DE HUMEDAD:  $w = \frac{W_w}{W_s} * 100$



LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS			
ENSAYO:		PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84. CLASIFICACIÓN	
LOCALIZACIÓN DEL SONDEO:		Talud Brisas del Sur	
SONDEO No:		2	
EQUIPO:		Penetración Estándar (S.P.T)	
PROFUNDIDA D (m)	No. GOLPES N	CLASIFICACIÓN	w %
0.5	10	Unidad C. Arena limosa de baja plasticidad, color amarillo; con presencia de raíces en pequeñas cantidades	20.53
1	25	Unidad C. Arena limosa de baja plasticidad, color gris.	22.45
1.5	28	Unidad C. Arena limosa de baja plasticidad, color gris.	19.81
2	31	Unidad C. Arena limosa de baja plasticidad, color gris.	21.84
2.5	11	Paleosuelo TB3 inicia en 2.4 m. Arcilla de baja plasticidad con poca arena; color negro.	25.88
3	13	Paleosuelo TB3. Limo arenoso de mediana plasticidad; color café oscuro.	35.23
3.5	10	Paleosuelo TB3 llega hasta 3.8 m. Limo arenoso de mediana plasticidad; color café oscuro.	26.51
4	9	TB3 comienza en 2.4 m y termina en 4.0 m. Limo de baja plasticidad color gris.	48.73
4.5	14	Paleosuelo TB4. Limo de alta plasticidad color anaranjado.	64.05
5	18	Paleosuelo TB4. Limo de alta plasticidad color anaranjado.	42.69
5.5	15	Paleosuelo TB4. Limo de alta plasticidad color anaranjado.	49.78
6	48	Paleosuelo TB4. Limo de alta plasticidad color anaranjado.	24.61

El agua aparece a 4.3 m de profundidad.

# LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

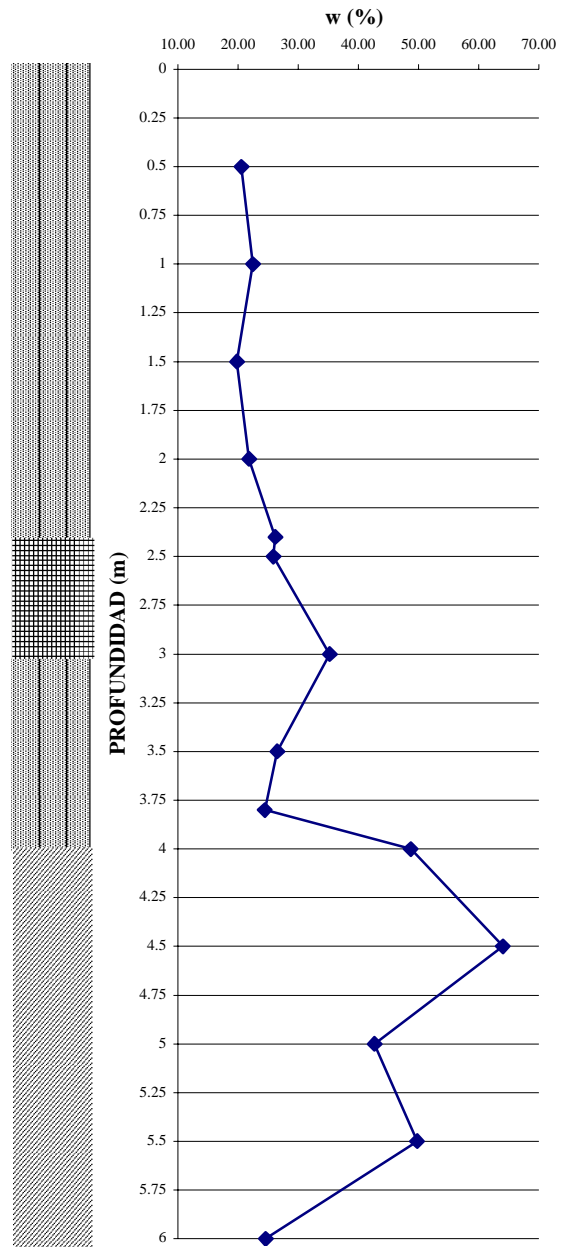


ENSAYO: PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84.  
CLASIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE AGUA

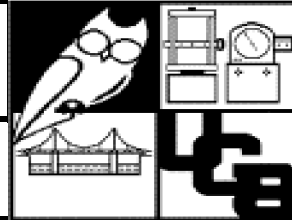
LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: Talud Brisas del Sur  
 SONDEO No: 2  
 EQUIPO: Penetración Estándar (S.P.T)

SÍMBOLO.	CARACTERÍSTICAS
	GUIJARROS
	GRAVAS
	ARENAS
	ARENA LIMOSA (Baja Plasticidad)
	ARENA ARCILLOSA (Plástica)
	LIMOS ARENOSOS LIMOS ARCILLOSOS LIMOS ORGÁNICOS (Baja o mediana Plasticidad)
	LIMOS ARCILLOSOS LIMOS INORGÁNICOS (Alta Plasticidad)
	ARCILLAS ARENOSAS ARCILLAS INORGÁNICAS ARCILLAS LIMOSAS (Baja o mediana plasticidad)
	ARCILLAS INORGÁNICAS ARCILLAS LIMOSAS (Alta plasticidad)
	SUELOS ORGÁNICOS (Baja o mediana plasticidad)
	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS, HUMUS

## SIMBOLO



# LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



ENSAYO: PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84.  
CONTENIDO DE HUMEDAD

LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: Talud Brisas del Sur

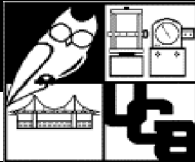
SONDEO No: 3

Profundidad	Cápsula	Tara	Suelo Húmedo+ Tara	Suelo Seco + Tara	Agua	Suelo Seco	Contenido de Humedad
(m)	No.	W <sub>T</sub> (g)	W <sub>H+T</sub> (g)	W <sub>S+T</sub> (g)	W <sub>w</sub> (g)	W <sub>S</sub> (g)	w (%)
0.5	1	9.67	82.67	68.02	14.65	58.35	25.11
1	2	9.41	137.83	109.78	28.05	100.37	27.95
1.09	3	9.75	74.37	58.97	15.4	49.22	31.29
1.5	4	9.44	76.2	60.78	15.42	51.34	30.04
2	5	9.7	62.13	48.87	13.26	39.17	33.85
2.5	6	9.72	68.51	55.57	12.94	45.85	28.22
3	7	9.51	74.36	58.56	15.8	49.05	32.21
3.5	8	9.51	55.05	44.38	10.67	34.87	30.60
3.82	9	9.61	60.86	48.26	12.6	38.65	32.60
4	10	9.81	51.87	41.57	10.3	31.76	32.43
4.5	11	9.36	53.56	42	11.56	32.64	35.42
5	12	9.65	61.41	53.53	7.88	43.88	17.96

PESO DEL AGUA:  $W_w = W_{H+T} - W_{S+T}$

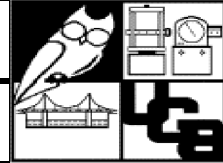
PESO DEL AGUA:  $W_s = W_{S+T} - W_T$

CONTENIDO DE HUMEDAD:  $w = \frac{W_w}{W_s} * 100$

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS			
ENSAYO:		PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84. CLASIFICACIÓN	
LOCALIZACIÓN DEL SONDEO:		Talud Brisas del Sur	
SONDEO No:		3	
EQUIPO:		Penetración Estándar (S.P.T)	
PROFUNDIDA D	No. GOLPES	CLASIFICACIÓN	w
(m)	N		%
0.5	6	Unidad C. Arena limosa de baja plasticidad, color amarillo.	25.11
1	4	Unidad C. Arena limosa de baja plasticidad, color amarillo.	27.95
1.5	8	Paleosuelo TB3 inicia en 1.09 m. Limo de mediana plasticidad; color café oscuro	30.04
2	16	TB3. Limo de baja plasticidad color café claro.	33.85
2.5	48	TB3. Limo de baja plasticidad color café claro.	28.22
3	83	TB3. Limo de baja plasticidad color café claro.	32.21
3.5	46	TB3. Limo de baja plasticidad color café claro.	30.60
4	26	Paleosuelo TB4 inicia en 3.82 m. Limo de alta plasticidad color anaranjado.	32.43
4.5	22	Paleosuelo TB4. Limo de alta plasticidad color anaranjado.	35.42
5	29	TB4. Arena limosa-limo de mediana plasticidad; color amarillo.	17.96

En este ensayo no se encontró el nivel de agua.

# LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



ENSAYO: PENETRACIÓN ESTÁNDAR ASTM D 1586-84.  
CLASIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE AGUA

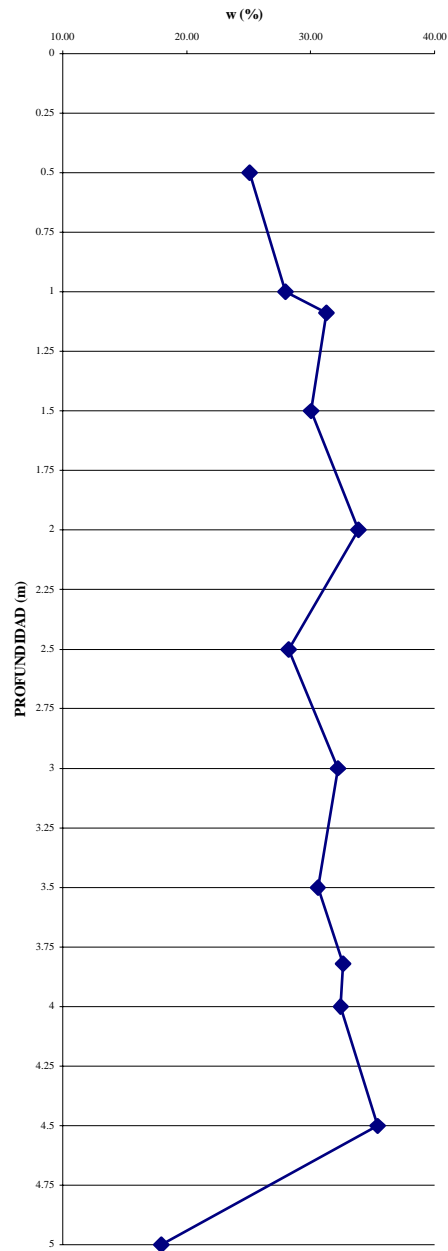
LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: Talud Brisas del Sur

SONDEO No: 3

EQUIPO: Penetración Estándar (S.P.T)

SÍMBOLO.	CARACTERÍSTICAS
	GUIJARROS
	GRAVAS
	ARENAS
	ARENA LIMOSA (Baja Plasticidad)
	ARENA ARCILLOSA (Plástica)
	LIMOS ARENOSOS LIMOS ARCILLOSOS LIMOS ORGÁNICOS (Baja o mediana Plasticidad)
	LIMOS ARCILLOSOS LIMOS INORGÁNICOS (Alta Plasticidad)
	ARCILLAS ARENOSAS ARCILLAS INORGÁNICAS ARCILLAS LIMOSAS (Baja o mediana plasticidad)
	ARCILLAS INORGÁNICAS ARCILLAS LIMOSAS (Alta plasticidad)
	SUELOS ORGÁNICOS (Baja o mediana plasticidad)
	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS, HUMUS

SIMBOLO



# **ANEXO C**

**MAPAS GEOLÓGICOS**



# **ANEXO D**

PLANOS DE DISEÑO