

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



**“ELABORACIÓN DE MAPA DE CARACTERÍSTICAS
GEOTÉCNICAS DE LOS MUNICIPIOS DE ANTIGUO
CUSCATLÁN Y SANTA TECLA Y PROPUESTA DE
REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS PARA MUROS DE RETENCIÓN,
TALUDES Y EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES
NIVELES”**

PRESENTADO POR:

**YOSSELIN RAQUEL CENTENO REYES
LUCÍA JULISSA CORTEZ SANDOVAL
MELVIN SIFREDO SALGUERO RAMÍREZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2018

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL :

MSC. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR :

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título :

**“ELABORACIÓN DE MAPA DE CARACTERÍSTICAS
GEOTÉCNICAS DE LOS MUNICIPIOS DE ANTIGUO
CUSCATLÁN Y SANTA TECLA Y PROPUESTA DE
REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS PARA MUROS DE RETENCIÓN,
TALUDES Y EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES
NIVELES”**

Presentado por :

**YOSSELIN RAQUEL CENTENO REYES
LUCÍA JULISSA CORTEZ SANDOVAL
MELVIN SIFREDO SALGUERO RAMÍREZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

**INGRA. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJIA
ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE
ING. JOSÉ ALEXANDER CHÁVEZ
ING. MAURICIO ERNESTO VÁSQUEZ**

San Salvador, Abril 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

INGRA. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJIA

ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE

ING. JOSÉ ALEXANDER CHÁVEZ

ING. MAURICIO ERNESTO VÁSQUEZ

AGRADECIMIENTOS

A Dios, el creador del universo por su amor infinito, por iluminar y proteger cada instante de mi vida, por brindarme sabiduría, inteligencia y la fuerza para levantarme en los momentos de debilidad, por ser mi luz y mi camino, porque fue su gracia inmensa que hizo posible culminar mi carrera y terminar satisfactoriamente este trabajo de graduación. Este triunfo es por él y para él.

A mis padres **María Elvira Reyes y Samuel Antonio Centeno**, porque son la parte fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor absoluto, a ellos gracias por estar en todas las etapas de mi vida.

A mis hermanas **Verenice Centeno Reyes y Elvira Iveth Centeno Reyes**, por ser parte importante de mi vida, por confiar y creer en mí, por apoyarme en cada decisión y proyecto, por ser mis cómplices en todo, desde que éramos unas niñas y por su comprensión en mis ratos de estrés. Gracias hermanas.

A mis abuelos **Elida Reyes y Luis Alonso Reyes**, por sus constantes oraciones elevadas a Dios, pidiendo su apoyo y protección para mi vida, por recordarme lo hermosa que es la vida y lo justa que puede llegar a ser. Gracias por su amor y su inmensa bondad, porque son sus oraciones que fueron

escuchadas por Dios y que ahora hacen posible culminar una meta y desarrollarme en esta nueva fase de mi vida como profesional.

Y por supuesto a todos mis familiares que son especiales para mí, por estar a mi lado a lo largo de toda la formación de mi carrera, quiero expresar un profundo agradecimiento por sus oraciones, consejos y cariño.

Mis compañeros de tesis y amigos: **Julissa y Melvin**, por la oportunidad de haber alcanzado esta meta juntos, por las aventuras vividas y por los consejos brindados.

A mis asesores **Ing. Lesly E. Mendoza, Ing. José Miguel Landaverde, Ing. José Alexander Chávez e Ing. Mauricio Vásquez**, les agradezco por compartir sus valiosos conocimientos, por toda la ayuda y tiempo dedicado al desarrollo del Trabajo de Graduación.

A mis amigos y compañeros de estudio: **Carlos, David, Fabio, Cristian y Rodrigo**, por darme ánimos en los momentos duros, porque siempre creyeron en mí. A mis amigas: **Julissa, Janneth, Gaby y Karla**, por sus locuras, consejos, y brindarme grandes momentos de risa, por haber hecho de mi fase universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidaré. Gracias niños!!!

A todos ellos agradezco de corazón...

Yosselin Raquel Centeno Reyes

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios Todopoderoso por darme el regalo de la vida y por permitirme llegar a este punto de mi carrera. Estoy inmensamente agradecida con EL, ya que ha estado conmigo en todo momento y ha iluminado mi mente para poder resolver hasta las pruebas más difíciles.

A la Virgen Santísima, por su valiosísima intercesión y por siempre cubrirme con su manto santo.

A mis Padres: **Ana Mirian y José Arnoldo Cortez**, por su amor y apoyo incondicional en todo momento. Sé cuánto ha sido el sacrificio que han hecho para que yo pueda ver cumplida esta meta y realmente lo valoro. Es por esto, que dedico mi trabajo de graduación a ustedes, quienes siempre han querido lo mejor para mí, quienes desde que estaba pequeña, veían en mí, el potencial de llegar a culminar mi carrera como profesional.

A mi hermano **Arnoldo Cortez**, por saber comprenderme en los momentos de mucho estrés, por animarme, por escucharme siempre, por estar pendiente de mí y darme tu amor incondicional de hermano.

A **Mamayita** (mi abuelita), ya que sus oraciones han sido un impulso para mí, gracias por estar pendiente de mi en todo momento y por sus oraciones. Es un regalo inmenso para mí y para toda la familia tenerla con nosotros y poder celebrar con usted este triunfo, usted es el ligante que nos mantiene unidos.

A mi tía **Ercilia**, quien ya descansa en la Paz del Señor, gracias por haber estado conmigo de una manera tan cercana en mi niñez y en mi juventud, por cuidarme de pequeña y por sus consejos. La tengo muy presente y la extraño mucho.

Por toda mi familia, porque siempre han estado pendientes de mí, porque se alegran conmigo en mis triunfos y me han apoyado en todo momento.

A **Carlos**, por tu amor y apoyo, por tus palabras sinceras y por tus consejos. Gracias por comprenderme aún en los momentos más estresantes de la carrera, por enseñarme tantas cosas útiles...aprendo de ti cada día. Gracias por tu ayuda incondicional en mi tesis, realmente valoro todo lo que has hecho por mí.

A mis asesores: **Ing. Lesly Mendoza, Ing. Miguel Landaverde, PhD. Alex Chávez e Ing. Mauricio Vásquez**, quienes nos han acompañado y guiado durante este proceso. Gracias por sus enseñanzas y por permitirnos la oportunidad de tener esta experiencia, en la que hemos aprendido muchas herramientas que nos servirán para desarrollarnos en el campo laboral.

A todos mis amigos:

A **Vanne**, mi amiga incondicional, quien ha tenido la paciencia de escucharme y estar ahí siempre en los buenos y en mis peores momentos, y por alegrarte siempre que pasa algo bueno en mi vida. A **Alejandro**, por tu amistad, tus

consejos y por todos los momentos divertidos que pasamos junto con Vanne en los primeros años de la U.

A mis amigas **Andrea, Hilda, Wendy y Yolanda**. Gracias porque a pesar que no nos vemos muy seguido, la amistad siempre se mantiene y volvemos a recordar muchos momentos que pasamos en nuestra infancia en la escuela, en el colegio, o en el micro escolar.

A mis compañeros de tesis: **Yosselin y Melvin**, porque sé que no ha sido fácil este proceso, pero que pesar de todo, hemos sabido llevar este trabajo a su culmen con perseverancia. Gracias por su acompañamiento y apoyo durante esta experiencia.

A **Karla Janeth, Karla Noemi, Gaby y Yosselin**, por los buenos momentos que hemos pasado durante los últimos años de la U. Agradezco además a **Janeth y Carlos Escalante**, por su hospitalidad y cariño.

Agradezco al equipo de **SÍSMICA: Ing. Celso Alfaro, Ing. Jaime Hernández, Ing. Rex Alas, Ing. Astrid González** y a todos los demás Ingenieros y Arquitectos que me han compartido su conocimiento, y no dudaron en ningún momento en responder mis consultas.

Lucía Julissa Cortez Sandoval

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso y a nuestra madre santísima la Virgen María, por la bendición de permitirme finalizar una de mis más grandes metas, por iluminarme y guiarme durante todo este recorrido, ayudándome a tomar las mejores decisiones y sosteniéndome en los momentos difíciles, ya que sin ellos nada de esto sería posible.

De la misma forma, agradecer eterna y profundamente a mis padres: Adolfo Salguero Gutiérrez y Blanca Rosa Ramírez Quijada quienes me han dado su apoyo incondicional para poder finalizar mis estudios universitarios, por todo su esfuerzo y sacrificio para sacarme adelante, y por motivarme a alcanzar mis metas; así mismo expresarles mis más sinceros agradecimientos a mis hermanos, tías y primas hermanas quienes residen junto a nosotros y que siempre me han estado ahí cuando los he necesitado.

Y un agradecimiento especial a la familia López Salguero por su apoyo durante mis años de estudio, así mismo a mis queridas primas y demás familiares que de alguna u otra manera me apoyaron durante este proceso.

Agradezco, además, a los coordinadores de esta investigación, Ing. Lesly Mendoza, Ing. Miguel Landaverde, PhD. Alexander Chávez e Ing. Mauricio Vásquez, por su ayuda, consejos, comprensión y por compartir sus

conocimientos, convirtiéndose así, en un apoyo fundamental durante el desarrollo de esta investigación.

A mis compañeras de trabajo de graduación Yosselin Centeno y Julissa Cortez y a todos los compañeros con los cuales he convivido y luchado durante el tiempo de mis estudios, haciendo mención especial de los “memos” (David, Guillermo y German) a quienes agradezco su amistad y por todas las aventuras compartidas. Y a todas aquellas personas que de una u otra forma me brindaron su apoyo para lograr este pequeño pero importante logro en mi vida, y que Dios los bendiga en todos sus proyectos y metas en su vida.

Melvin Sifredo Salguero Ramírez

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	iii
CAPÍTULO I	1
CONSIDERACIONES GENERALES	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.3. OBJETIVOS	9
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	9
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.4. ALCANCES	10
1.5. LIMITACIONES	11
1.6. JUSTIFICACIÓN	12
CAPÍTULO II	14
MARCO TEÓRICO	14
2.1. INTRODUCCIÓN	15
2.2. MAPAS Y SU APLICACIÓN EN INGENIERIA CIVIL	16
2.2.1. GENERALIDADES	16
2.2.2. MAPAS RELACIONADOS A LA INGENIERÍA CIVIL EN EL SALVADOR	16
2.3. MAPAS GEOTÉCNICOS	18
2.3.1. DEFINICIÓN DE MAPAS GEOTÉCNICOS	18
2.3.2. CLASIFICACIÓN DE MAPAS GEOTÉCNICOS	18
2.3.3. CONTENIDO DE LOS MAPAS GEOTÉCNICOS	21
2.3.4. SIMBOLOGÍA Y REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS	23
2.3.5. APLICACIONES DE MAPAS DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	25
2.4. CONDICIÓN TECTÓNICA, DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	28
2.4.1. TECTÓNICA REGIONAL	28
2.4.2. MARCO TECTÓNICO EN EL SALVADOR	29
2.4.3. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	31
2.4.4. ESTRATIGRAFÍA DEL AMSS	37
2.5. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS SUELOS DEL AMSS	47
2.5.1. PROPIEDADES FÍSICAS	47
2.5.2. PROPIEDADES MECÁNICAS	50

2.6. DEFINICIÓN Y OBJETIVO DEL ESTUDIO GEOTÉCNICO	53
2.7. FASES DEL ESTUDIO GEOTÉCNICO	54
2.7.1. ESTUDIO PREVIO (RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN).....	55
2.7.2. DEFINICIÓN DE LA CAMPAÑA GEOTÉCNICA.....	58
2.7.3. EJECUCIÓN DE RECONOCIMIENTOS, ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO	61
2.7.4. INTERPRETACIÓN DEL ESTUDIO GEOTÉCNICO.....	72
CAPÍTULO III.....	73
ELABORACIÓN DE MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	73
3.1. INTRODUCCIÓN.....	74
3.2. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION.....	75
3.3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	79
3.3.1. OBJETIVO DEL ESTUDIO	79
3.3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	79
3.3.3. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA.....	83
3.3.4. ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS	85
3.3.5. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN LA BASE DE DATOS.....	89
3.3.6. REVISIÓN DE REGISTROS DE LA BASE DE DATOS.....	97
3.3.7. SELECCIÓN DE LA INFORMACIÓN QUE CONTENDRÁ EL MAPA	101
3.3.8. ELABORACIÓN DE MAPA MEDIANTE EL SOFTWARE ArcGIS.	106
3.3.9. REPRESENTACIÓN DE MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS.....	120
CAPÍTULO IV	124
PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS.....	124
4.1. INTRODUCCIÓN.....	125
4.2. CONTENIDO MÍNIMO DEL INFORME GEOTÉCNICO	126
4.3. EDIFICACIONES.....	131
4.3.1. GENERALIDADES	131
4.3.2. ASPECTOS EN ESTUDIO PARA EDIFICACIONES	132
4.3.3. REVISIÓN DE LINEAMIENTOS Y NORMATIVAS GEOTÉCNICAS	136
4.4. TALUDES	150
4.4.1. GENERALIDADES	150
4.4.2. ASPECTOS EN ESTUDIO PARA TALUDES.....	152
4.4.3. REVISIÓN DE LINEAMIENTOS Y NORMATIVAS GEOTÉCNICAS	163
4.5. MUROS DE RETENCIÓN	169
4.5.1. GENERALIDADES	169
4.5.2. ASPECTOS EN ESTUDIO PARA MUROS DE RETENCIÓN	169

4.5.3. REVISIÓN DE LINEAMIENTOS Y NORMATIVAS GEOTÉCNICAS	173
4.6. PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS PARA EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES NIVELES, TALUDES Y MUROS DE RETENCIÓN	176
4.6.1. ALCANCE Y OBJETIVO.....	176
4.6.2. EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES NIVELES.....	176
4.6.3. TALUDES	183
4.6.4. MUROS DE RETENCIÓN	191
4.7. RESUMEN DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES NIVELES, TALUDES Y MUROS DE RETENCIÓN.....	196
CAPÍTULO V	199
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	199
5.1. INTRODUCCIÓN.....	200
5.2. ANÁLISIS DEL MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS.....	201
5.2.1. MAPA DE COMPACIDAD	201
5.2.2. MAPA DE HUMEDAD	204
5.2.3. MAPA DE TIPOS DE SUELOS	208
5.3. ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE LOS INFORMES GEOTÉCNICOS	211
5.4. ANÁLISIS DE LINEAMIENTOS Y NORMATIVAS GEOTÉCNICAS.....	221
5.4.1. EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES NIVELES.....	222
5.4.2. TALUDES	226
5.4.3. MUROS DE RETENCIÓN	233
CAPÍTULO VI	237
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	237
6.1. INTRODUCCIÓN.....	238
6.2. CONCLUSIONES.....	239
6.2.1. MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	239
6.2.2. CONTENIDO DEL INFORME GEOTÉCNICO	241
6.2.3. PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES NIVELES, TALUDES Y MUROS DE RETENCIÓN	241
6.3. RECOMENDACIONES	243
6.3.1. RECOMENDACIONES GENERALES	243
6.3.2. RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS.....	245
BIBLIOGRAFÍA	247
ANEXOS	255

INDICE DE FIGURAS

Figura No. 2.1 Mapa geotécnico de la llanura costera y geología superficial del corredor noreste de Washington D.C. a Boston.....	24
Figura No. 2.2 Ejemplo de diagramas para representación de datos geotécnicos puntuales de sondeos o ensayos.	25
Figura No. 2.3 Mapa geotécnico general correspondiente a una zona de Tenerife, España (Leyenda simplificada: escala original 1:15.000).....	27
Figura No. 2.4 Configuración de las placas tectónicas en El Salvador.	29
Figura No. 2.5 Sistemas de fallas asociadas a la formación y evolución del Graben Central en El Salvador.	30
Figura No. 2.6 Mapa geológico del AMSS y sus alrededores, en base al Mapa Geológico 1:100,000 de El Salvador.....	33
Figura No. 2.7 El modelo de elevación digital muestra las tres zonas geológicas en su cercanía al volcán de San Salvador.	36
Figura No. 2.8 a) Mapa de sectores del CVSS caracterizado por secciones estratigráficas compuestas. b) Estratigrafía correspondiente al sector 2 del mapa.	39
Figura No. 2.9 Estratigrafía de la TBJ.....	44
Figura No. 2.10 a) Representación de depósitos provenientes del CVSS y de Caldera de Ilopango en Zona Rosa, San Salvador. b) Depósito de Plan de la Laguna en Santa Elena.	45
Figura No. 2.11 Secuencia estratigráfica (superior) del relleno del Graben Central en San Salvador. Muestra la relación espacio – temporal de los distintos depósitos volcánicos explosivos y efusivos asociados a sus respectivos centros de emisión.....	46
Figura No. 2.12 Esquema de las fases de un estudio geotécnico.....	55
Figura No. 2.13 Métodos de reconocimiento en la campaña geotécnica.....	63
Figura No. 2.14 Secuencia de hincado del muestreador estándar y algunos elementos que intervienen en el ensayo SPT.	67
Figura No. 3.1 Ubicación del área de estudio.....	79
Figura No. 3.2 Área de estudio formada por Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla.....	80
Figura No. 3.3 Esquema de proceso de la elaboración de mapa de características geotécnicas.....	83
Figura No. 3.4 Planimetría, ejes viales de Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla y puntos de localización de estudios de suelos.....	85
Figura No. 3.5 Ejemplo de la forma de cómo se ordenó la base de datos con información básica que proporcionan los Estudios Geotécnicos.....	87
Figura No. 3.6 Perfil estratigráfico del suelo.....	90
Figura No. 3.7 Hoja de registros.....	91
Figura No. 3.8 Plantillas en Excel que se exportaron a software gINT logs. a) Hoja POINT b) hoja GEOL c) hoja ISPT.....	99
Figura No. 3.9 Regiones delimitadas para la generación del mapa.....	102
Figura No. 3.10 Puntos cargados al software ArcGIS delimitados en la zona de estudio.....	108
Figura No. 3.11 Método Topo to Raster para interpolación de compacidades.....	109
Figura No. 3.12 Reclasificación de los valores de N en el mapa de compacidades.....	110
Figura No. 3.13 Asignación de compacidad a los polígonos del mapa en función del código de la reclasificación.....	111
Figura No. 3.14 Mapa de compacidades a la profundidad de 2.00 m.....	112
Figura No. 3.15 Mapa de compacidades a la profundidad de 5.00 m.....	112
Figura No. 3.16 Isolíneas de humedades a 2.00 m en a) época lluviosa y b) época seca.	114

Figura No. 3.17	Isolíneas de humedades a 5.00 m en a) época lluviosa y b) época seca.	115
Figura No. 3.18	Método de interpolación kriging para el mapa de tipo de suelos.....	117
Figura No. 3.19	Mapa de tipos de suelos a 2.00 m de profundidad.....	118
Figura No. 3.20	Mapa de tipos de suelos a 5.00 m de profundidad.....	118
Figura No. 3.21	Mapa de tipos de suelos a 2.00 m de profundidad con puntos de Gravas.	119
Figura No. 3.22	Colores de relleno para los diferentes tipos de suelos	121
Figura No. 3.23	Mapa de características geotécnicas de los municipios de Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla.	122
Figura No. 4.1	Tipos de falla por capacidad de carga del suelo: a) falla general por corte; b) falla local por corte; c) falla de corte por punzonamiento	134
Figura No. 4.2	Esquemas orientativos para la colocación de puntos de reconocimientos	138
Figura No. 4.3	Zonificación Sísmica de la República de Guatemala.	147
Figura No. 4.4	Tipos de taludes a) desmonte, b) trinchera.	151
Figura No. 4.5	Partes de un talud con un ángulo uniforme (a) y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos (b).	152
Figura No. 4.6	Indicadores que muestran la presencia de un movimiento superficial (creep)..	155
Figura No. 4.7	Nomenclatura de una zona de falla	156
Figura No. 4.8	Tipos de superficie de falla en un talud	157
Figura No. 4.9	a) deslizamiento planar en macizo rocoso b) deslizamiento en cuña	159
Figura No. 4.10	Flujo de detritos.....	159
Figura No. 4.11	Pequeños movimientos de ladera que generalmente se transforman a flujos de escombros y arrastran material de la superficie para crecer en volumen.	161
Figura No. 4.12	Localización general sugerida de sondeos para estudios de deslizamientos.	164
Figura No. 4.13	Profundidad de los sondeos para la construcción de a) un terraplén, b un corte.	165
Figura No. 4.14	Principales Fuerzas que actúan sobre un muro de retención	171
Figura No. 4.15	Posibles fallas de un muro de retención. a) Falla por volteo, b) Falla por deslizamiento, c) Falla por capacidad de carga del suelo.....	172
Figura No. 4.16	Recomendación de ubicaciones de perforaciones	178
Figura No. 4.17	Número de perforaciones en condiciones especiales del suelo o terrenos irregulares.	179
Figura No. 4.18	Zapata aislada con dimensiones $L=B=1.2$ m.....	180
Figura No. 4.19	Gráfico de variación del incremento de esfuerzo con la profundidad, bajo una zapata cuadrada, considerando $B=1.20$ m y sometida a un esfuerzo inicial de 15 T/m^2	181
Figura No. 4.20	Gráfico de la variación del incremento de esfuerzo bajo una zapata cuadrada con la profundidad, considerando $B=2$ m y sometida a un esfuerzo inicial de 15 T/m^2	182
Figura No. 4.21	Esquema de ubicación de sondeos en un talud, donde S1, S2 y S3 representan cada número de sondeo.	184
Figura No. 4.22	Ejemplo de distribución y espaciamiento de perforaciones en un talud.....	186
Figura No. 4.23	Profundidad a alcanzar en sondeos ubicados en la corona, cuerpo y pie de taludes.....	188
Figura No. 4.24	Profundidad de reconocimientos en taludes con un ángulo de inclinación $\beta > 53^\circ$	189
Figura No. 4.25	Ubicación de los sondeos en el pie, en la cimentación y en el trasdós de un muro de retención.	192
Figura No. 4.26	Isobaras de presión vertical bajo una franja flexible de franja.....	194
Figura No. 4.27	Profundidad estimada de los reconocimientos en muros de retención.	195
Figura No. 4.28	Profundidad estimada de los reconocimientos en muros de retención de más de 10 m, y soportando taludes.....	196

Figura No. 5.1 Mapa de compacidades a la profundidad de 2.00 m (Figura No. 3.14 repetida)	202
Figura No. 5.2 Mapa de compacidades a la profundidad de 5.00 m	202
Figura No. 5.3 Isolíneas de humedades a la profundidad de 2.00 m en época seca.	206
Figura No. 5.4 Isolíneas de humedades a la profundidad de 5.00 m en época seca.	206
Figura No. 5.5 Isolíneas de humedades a la profundidad de 2.00 m en época lluviosa.	207
Figura No. 5.6 Isolíneas de humedades a la profundidad de 5.00 m en época lluviosa	207
Figura No. 5.7 Mapa de tipos de suelos a 2.00 m de profundidad	209
Figura No. 5.8 Mapa de tipos de suelos a 5.00 m de profundidad	210

INDICE DE TABLAS

Tabla No. 2.1 Mapas relacionados a la ingeniería civil en El Salvador	17
Tabla No. 2.2 Clasificación de los mapas geotécnicos en función de su objetivo, contenido y escala	19
Tabla No. 2.3 Información básica que debe incluir un mapa geotécnico general	23
Tabla No. 2.4 Propiedades físicas del suelo.....	49
Tabla No. 2.5 Estado tensional representado por el círculo de Mohr como una situación de rotura.....	51
Tabla No. 2.6 Parámetros de suelo del AMSS obtenidos mediante ensayos de corte directo. ...	52
Tabla No. 2.7 Parámetros de suelo del AMSS obtenidos mediante ensayos triaxiales.....	53
Tabla No. 2.8 Parámetros del suelo de los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla.	53
Tabla No. 2.9 Información general que es requerida para el desarrollo del estudio geotécnico	57
Tabla No. 2.10 Datos básicos que son requeridos para el desarrollo del estudio geotécnico....	58
Tabla No. 2.11 Métodos de reconocimiento directos (sondeos y pozos a cielo abierto)	65
Tabla No. 2.12 Relaciones para el cálculo del factor de corrección por sobrecarga CN	69
Tabla No. 2.13 Ensayos de laboratorio, adecuados para determinar las propiedades más usuales del suelo	71
Tabla No. 3.1 Clasificaciones adoptadas en el procedo de estandarización de clasificaciones de la base de datos.....	92
Tabla No. 3.2 Factores de corrección aplicados al N de campo	95
Tabla No. 3.3 Análisis cuantitativo del total de puntos de sondeos hasta la profundidad de 10 m.	103
Tabla No. 4.1 Apartados recomendados en informes geotécnicos	128
Tabla No. 4.2 Lista de revisión del contenido mínimo en informes geotécnicos.....	131
Tabla No. 4.3 Profundidades recomendadas en función del ancho del edificio y el número de pisos.....	137
Tabla No. 4.4 Número, profundidad y espaciamientos mínimos de exploraciones geotécnicas.	139
Tabla No. 4.5 Tipo de construcción	140
Tabla No. 4.6 Grupo de terreno	140
Tabla No. 4.7 Número mínimo de sondeos mecánicos y porcentaje de sustitución por pruebas continuas de penetración.....	141
Tabla No. 4.8 Profundidades mínimas de reconocimiento orientativas	142
Tabla No. 4.9 Clasificación de la magnitud de la obra de normativa geotécnica costarricense.	143
Tabla No. 4.10 Requisitos mínimos para la exploración de campo.....	143
Tabla No. 4.11 Clasificación por categoría de edificación en edificios y casas	144
Tabla No. 4.12 Complejidad del proyecto.....	145
Tabla No. 4.13 Número mínimo de sondeos y profundidad de los mismos	146
Tabla No. 4.14 Nivel mínimo de protección sísmica de Guatemala.....	147
Tabla No. 4.15 Número mínimo de sondeos y profundidad mínima sugerida	148
Tabla No. 4.16 Lineamientos mínimos en estudios geotécnicos propuestos por literaturas y normativas geotécnicas	149
Tabla No. 4.17 Lineamientos recomendados para edificaciones por profesionales en el área de geotecnia.....	150
Tabla No. 4.18 Métodos de análisis de estabilidad de taludes.....	163

Tabla No. 4.19 Resumen de requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para taludes, recomendados por diferentes normativas.....	167
Tabla No. 4.20 Número de puntos de reconocimiento recomendados en situaciones normales para taludes	167
Tabla No. 4.21 Lineamientos recomendados por profesionales en el área de taludes	168
Tabla No. 4.22 Número de puntos de reconocimiento recomendados en situaciones normales para muros de retención	174
Tabla No. 4.23 Cálculo del incremento de esfuerzos bajo una zapata aislada con dimensiones $B=L=1.20$ m sometida a un esfuerzo de 15 T/m^2	181
Tabla No. 4.24 Número de puntos de reconocimiento recomendados en situaciones normales para muros de retención	193
Tabla No. 4.25 Cuadro resumen de requerimientos mínimos en edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención.....	198
Tabla No. 5.1 Porcentajes de zonas sueltas, medias y densas a las profundidades de 2 y 5 m en la zona en estudio.....	201
Tabla No. 5.2 Cuadro comparativo del comportamiento de la humedad en la época seca y lluviosa.....	205
Tabla No. 5.3 Porcentajes de tipos de suelos presentados en el mapa de características geotécnicas a la profundidad de 2 y 5 m.....	209
Tabla No. 5.4 Herramienta de evaluación de estudios de suelos	213
Tabla No. 5.5 Resultados obtenidos de la revisión de los estudios geotécnicos a partir de la lista de chequeo	221
Tabla No. 5.6 Análisis de resultados de lineamientos y normativas geotécnicas para edificaciones de menos de 3 niveles.....	223

INTRODUCCIÓN

El trabajo consiste en la elaboración del mapa de características geotécnicas de los municipios de Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla y de una propuesta de requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para muros de retención, taludes y edificaciones de menos de tres niveles.

Se presenta una base teórica que permite tener un panorama general relacionado a los mapas (sobre todo orientado a los mapas geotécnicos), se describirá la geología, estratigrafía y características geotécnicas de los suelos del área en estudio. Por otra parte, se desarrolla la temática del estudio geotécnico y sus fases, dentro de las cuales, el trabajo se enfoca en la definición de la campaña geotécnica y la interpretación de resultados (informe geotécnico).

Se describe la aplicación de la metodología realizada para la elaboración del mapa de características geotécnicas, haciendo énfasis en las fuentes de información, el procedimiento y las herramientas informáticas que se utilizaron en su elaboración.

Además, se define el contenido mínimo que deben contener los informes geotécnicos y una propuesta de la cantidad, profundidad y espaciamiento de las perforaciones en una campaña geotécnica, orientado a edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención.

Finalmente, se analizan los resultados obtenidos de la investigación, abarcando todas las temáticas antes mencionadas; dicho análisis conllevará a la presentación de las conclusiones y recomendaciones del trabajo de graduación.

CAPÍTULO I
CONSIDERACIONES
GENERALES

1.1. ANTECEDENTES

La zona de Santa Tecla y Antigua Cuscatlán ha sufrido en el pasado el impacto de diversos fenómenos, destacando los sismos y deslizamientos: Ejemplo de esto es lo que tuvo lugar en la Colonia "Las Colinas" donde un alud de 150 mil metros cúbicos de tierra se desprendió de la Cordillera del Bálsamo, sepultando cerca de 200 casas y con ellas muchas personas, Las zonas cercanas a esta cordillera actualmente presentan un gran desarrollo socio-económico, que se refleja en el crecimiento urbanístico e industrial; sin embargo, debido a lo mencionado anteriormente, esta zona presenta muchos riesgos debido a sus condiciones geomorfológicas

La geología de los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla, está definida en parte por materiales que son producto de la erupción del Plan de la Laguna, además tiene intercalaciones de erupciones del volcán de San Salvador (con mayor espesor en esta zona, debido a su cercanía) y de piroclastos de caldera de Ilopango. La edad de los materiales del depósito de Plan de la Laguna se estima que es de 820 A.C. (Amoroli y Dull, 1998), y se encuentran subyacentes al depósito de Tierra Blanca Joven (430 D.C).

Los suelos procedentes se localizan en dos partes estructurales distintas: La porción norte, se encuentra en la zona del relleno del Graben Central, mientras que la parte sur yace sobre la parte elevada (perteneciente a las laderas de estratovolcanes antiguos o paleo volcanes de la Formación Bálsamo) que está

sometida a procesos erosivos intensos, debido a la pendiente y a las altas precipitaciones de esta zona.¹

Dado el desarrollo que posee esta región, es necesario conocer las características de los suelos presentes, que permita tener una visión amplia de las zonas aptas para la construcción, lo que puede plasmarse en un mapa geotécnico.

Los mapas geotécnicos constituyen un método en ingeniería geológica para presentar cartográficamente información geológico-geotécnica con fines de planificación, uso del territorio, construcción y mantenimiento de obras de ingeniería; aportan datos sobre las características y propiedades del subsuelo de una determinada zona para evaluar su comportamiento y prever los posibles problemas geológicos y geotécnicos. De manera general, los mapas geotécnicos pueden ser mapas de evaluación del terreno o mapas de caracterización geotécnica.²

Según Coelho (1980), el primer intento de realizar una representación cartográfica de las condiciones geotécnicas parece haber surgido en 1913 en la exposición técnica de Leipzig. Gwinner, en 1954 y 1956, realizó la primera tentativa de integrar los datos sobre las propiedades físicas y comportamiento mecánico de suelos en un contexto geológico. La mayor parte del desarrollo de

¹ TESIS: "ESTUDIO GEOTÉCNICO DE LA ERUPCIÓN FREATOMAGMÁTICA DEL PLAN DE LA LAGUNA". El Salvador: Universidad José Simeón Cañas.

² González de Vallejo, L.I., 2002, INGENIERÍA GEOLÓGICA. Prentice Hall

la cartografía geotécnica se llevó a cabo en los países europeos, desde la década de los 50.

Los mapas geotécnicos deben considerar: una descripción y clasificación geotécnica de suelos y rocas, propiedades físicas y mecánicas de los materiales, condiciones hidrogeológicas y distribución del agua, condiciones y procesos geomorfológicos.

Los mapas geotécnicos difieren de los geológicos en que los primeros presentan información descriptiva de los materiales, edades y procesos geológicos, datos cuantitativos sobre las estructuras y medio geológicos, propiedades físico-mecánicas de los materiales e información interpretativa para su futura aplicación en vulcanología, petrografía, geoquímica, geofísica, geología estructural, geotécnica o ingenieril, entre otros.

En nuestro país actualmente existen mapas geológicos, geomorfológicos, topográficos y de riesgos, entre otros; pero no se cuenta con mapas geotécnicos de ninguna región, de ahí la importancia de elaborar un mapa de características geotécnicas en una de las zonas con mayor desarrollo en infraestructura en el país: El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS); con el propósito de utilizar la información presentada en el mapa, como un criterio más para evaluar la factibilidad de construcción de obras civiles.

En la elaboración de estos recursos es necesario contar con suficiente información geotécnica que permita identificar y caracterizar los materiales presentes en una zona determinada, información que puede ser obtenida a partir de diferentes estudios de suelos.

Dentro del AMSS existen diferentes instituciones tales como la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS) que es la entidad encargada de aprobar las diferentes construcciones en el área, así como el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), donde se puede encontrar información sobre las características de los materiales existentes, a partir de los estudios realizados y presentados a estas, para los diferentes proyectos que se han ejecutado y que puede servir de base para la elaboración de este tipo de mapas.

En el país, para determinar las características geotécnicas de un lugar donde se proyecta desarrollar una estructura, se solicita un estudio de suelos que debe describir las características de los mismos y la profundidad de apoyo de los cimientos, así como condiciones que de alguna manera afectará a la estructura. Sin embargo, no se tienen normativas, que dejen claro el tipo de estudio que se debe realizar según el tipo de proyecto, así como el número de sondeos, profundidad mínima, separación entre ellos, tipo de ensayo para la determinación de las características requeridas de los materiales, etc.

En El Salvador se cuenta con la “Norma Técnica para Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes” (mayo 1997), en la cual se establecen algunos requisitos que deben tomarse en cuenta al realizar un estudio geotécnico y diseño de la campaña de exploración. Esta norma estipula que antes de realizar los reconocimientos en la zona en estudio, se debe realizar una inspección del lugar para obtener información preliminar del tipo de suelo que existe tanto en el sitio en donde se construirá la obra de ingeniería como en sus alrededores. Sin embargo, esta norma es de carácter general, dejando a criterio del especialista el diseño de la campaña geotécnica, así como de los ensayos mínimos que deben realizarse.

Por lo expuesto se puede determinar la necesidad de establecer lineamientos mínimos que deberían exigirse en los estudios de suelos que se requieran para cualquier proyecto de ingeniería, tomando en cuenta su importancia y las condiciones de los suelos en la zona, y que sirvan como propuesta de requerimientos mínimos a exigir por las instituciones mencionadas.

Por otra parte, la creación de mapas de características de suelos en una zona, permitiría a las entidades encargadas de evaluar la factibilidad de ejecución de un proyecto, prever los posibles riesgos o problemas que se puedan presentar y de esta forma tomar la decisión más adecuada desde el punto de vista de funcionalidad y seguridad.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En El Salvador, en los últimos años han ocurrido eventos desfavorables debido a fenómenos naturales que han demostrado la vulnerabilidad de algunas zonas, y que han generado daños a gran parte de la población. Entre estas zonas se encuentran los Municipios de Santa Tecla y Antiguo Cuscatlán, las cuales han experimentado los efectos de dichos eventos.

Santa Tecla ha recibido durante las últimas décadas un gran flujo de nuevos habitantes, produciéndose un crecimiento urbanístico acelerado. Paulatinamente, la ciudad se fue convirtiendo en un referente de desarrollo y crecimiento a nivel nacional, a pesar de los diferentes eventos catastróficos ocurridos por los efectos de los sismos en el pasado (como ejemplo: el terremoto de 2001), que evidenció la vulnerabilidad a la que se encuentra expuesta esta zona.

En Antiguo Cuscatlán, el riesgo por deslizamiento en el área urbana afecta sólo algunos sectores en forma puntual por existir cambios de nivel o por su cercanía a quebradas existentes. El Plan de la Laguna por su peculiar conformación de ser un cráter volcánico con escarpadas paredes que lo envuelven, presenta señalamientos de riesgo por deslizamiento.

Actualmente, en el país se cuenta con información de las diferentes formaciones geológicas existentes, sin embargo, dicha información es demasiado general en cuanto a que no brinda mayor detalle de las

características y propiedades del suelo en zonas específicas. Una forma de conocer tales propiedades, es mediante la realización de estudios geotécnicos, los cuales se encuentran registrados para el Área Metropolitana de San Salvador, en la OPAMSS y en otras entidades gubernamentales como MOP y MARN, información que puede servir de base para la elaboración de diferentes tipos de mapas.

En otros países, se ha optado por la elaboración de mapas geotécnicos o de ingeniería geológica, en donde se representa información geotécnica para ser utilizada en la planificación de proyectos de construcción y mantenimiento de obras de ingeniería. Esta puede ser una alternativa para solucionar la ausencia de este tipo de mapas en el país, elaborando un mapa de características geotécnicas a partir de la síntesis de un conjunto de datos provenientes de estudios geotécnicos, los cuales pueden ser procesados para analizar las características relevantes de los materiales del suelo. Este análisis puede permitir posteriormente establecer criterios para el diseño de una campaña geotécnica, como un aporte a la normativa vigente del país, la cual es muy limitada para definir dicha campaña, dejando la responsabilidad de su diseño al especialista.

Por tanto, se pretende realizar una propuesta de requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para muros de retención, taludes y edificaciones de menos de tres niveles. Estos requerimientos, podrían ser utilizados por

entidades gubernamentales para elaborar posteriores estudios referentes a la regulación y zonificación de los suelos en el AMSS.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Elaborar un mapa de características geotécnicas de los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla y establecer los requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para muros de retención, taludes y edificaciones de menos de tres niveles.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Organizar los registros existentes en entidades gubernamentales sobre estudios geotécnicos realizados en los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla para crear una base de datos.
- Determinar la información necesaria que contendrá la base de datos que servirá para la generación del mapa de características geotécnicas.
- Procesar la información geotécnica que contendrá la base de datos, mediante la realización de correcciones necesarias y el cálculo de parámetros del suelo.
- Elaborar un mapa de características geotécnicas de los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla utilizando el software de modelación de mapas ArcGIS u otros que estén disponibles.

- Realizar una recopilación de los lineamientos en que se basan las normativas nacionales e internacionales en el área geotécnica para la planificación de campañas de reconocimiento del suelo.
- Seleccionar las normativas geotécnicas que se utilizarán para la elaboración de la propuesta de requerimientos mínimos que deben contener los estudios de suelos considerando características geológicas similares.
- Establecer los requerimientos mínimos que deben cumplir los estudios geotécnicos para proyectos de ingeniería aplicados a los elementos: muros de retención, taludes y edificaciones de menos de tres niveles.

1.4. ALCANCES

- La investigación comprende la recopilación de información para generar una base de datos, de los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla, la cual debe contener la información mínima que un estudio geotécnico requiere, información que se encuentra registrada en la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS) u otras entidades gubernamentales como MOP y MARN, a través de la cual se elaborará un mapa de características geotécnicas, haciendo uso del software de modelación de mapas ArcGIS u otros que estén disponibles, con el cual se pretende representar parámetros que

identifiquen las propiedades existentes del suelo en función de las interpretaciones estratigráficas del mismo.

- El estudio comprende además, el establecimiento de lineamientos y requerimientos mínimos que deben contener los estudios geotécnicos para los distintos proyectos en obras de ingeniería, aplicados a los elementos: muros de retención, taludes, y edificaciones de menos de tres niveles; se pretende que dichos lineamientos estén apoyados en las normativas locales e internacionales y que permitan además, reforzar las limitaciones que posee la normativa técnica en nuestro país en cuanto al diseño de una campaña geotécnica.

1.5. LIMITACIONES

- La propuesta de requerimientos mínimos en estudios geotécnicos se elaborará únicamente para los elementos: muros de retención, taludes, y edificaciones de menos de tres niveles.
- El contenido del mapa de características geotécnicas depende de la información presentada en estudios de suelos, en cuanto a profundidad y a ubicación de reconocimientos realizados en estos.
- Tomando en cuenta las limitantes, disponibilidad o accesibilidad de ArcGIS, se explorará el uso de diferentes softwares para realizar interpolaciones y modelaciones.

- El tiempo planificado y calidad de producto para el desarrollo del trabajo de graduación depende directamente de la disponibilidad y tipo de la información proporcionada por las entidades gubernamentales.
- Debido a la limitación de los recursos financieros, la información presentada en los estudios geotécnicos no se podrá comprobar, razón por la cual no se realizarán ensayos de laboratorio que permitan validar las propiedades existentes del suelo en las zonas de interés.

1.6. JUSTIFICACIÓN

El trabajo comprende la elaboración de un mapa de características geotécnicas para los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla, cuyo objetivo es mostrar información sobre las propiedades fundamentales que posee el suelo. Se realizará principalmente, debido a la ausencia de este tipo de mapas en dichos municipios, los cuales actualmente presentan un desarrollo socioeconómico importante en el país. Además, se considera una necesidad, debido a la vulnerabilidad y la presión urbanística a la que se encuentran expuestas estas zonas, las cuales han sido afectadas por diferentes fenómenos naturales en el pasado, dejando en evidencia la necesidad de un adecuado ordenamiento territorial en la región.

Un mapa de características geotécnicas tendría muchas aplicaciones para el Área Metropolitana de San Salvador. Este serviría principalmente como herramienta de planificación y control, permitiendo una mejor distribución en

cuanto al uso de suelos y ayudando a determinar de manera más eficiente la factibilidad de ejecutar un proyecto; además se espera que sirva como base para investigaciones posteriores, que identifiquen zonas problemáticas o de alto riesgo y conocer de forma aproximada las características de los materiales presentes en la zona.

De esta manera, otro de los aportes que se espera conseguir con el mapa es contar con una guía preliminar, que junto con la revisión de normativas geotécnicas, permita determinar lineamientos para el diseño de una campaña geotécnica. Este tipo de información es valiosa, ya que en el medio se cuenta con especificaciones limitadas para realizar un estudio de suelos, dejando al criterio del especialista la definición de este.

Es por esto, que se elaborará una propuesta de requerimientos mínimos en estudios geotécnicos, la cual puede ser utilizada posteriormente por instituciones gubernamentales encargadas de brindar trámites o permisos, para realizar una regulación de dichos estudios, en función de la zona y del tipo de obra civil a construir, lo que se realizará para muros de retención, taludes y edificaciones de menos de tres niveles.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene como objetivo presentar de manera sistemática parte del marco teórico, que constituye el trabajo de graduación, el cual comprende en primer lugar, conocer los tipos de mapas y su aplicación en la Ingeniería Civil, así como también, se presentará la base teórica referida a mapas geotécnicos, la cual permitirá conocer los aspectos más importantes sobre estos que sirvan como herramienta para su posterior elaboración en el capítulo III.

Se describirá, además, la condición tectónica regional y su influencia en el marco tectónico de El Salvador, la geología y estratigrafía que comprende el área en estudio, la cual está cubierta en gran parte por formaciones constituidas por materiales de origen volcánico.

Por otra parte, se estudiará algunas generalidades sobre el estudio geotécnico y sus fases, de las cuales, posteriormente en el capítulo IV se profundizará en la tercera y cuarta fase, donde se realizará una recopilación de diferentes lineamientos que proponen literaturas y normativas para la determinación de la cantidad, profundidad y espaciamiento de las perforaciones en una campaña geotécnica, aplicados a edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención; además, se evaluará el contenido que deben presentar los informes geotécnicos (cuarta fase).

2.2. MAPAS Y SU APLICACIÓN EN INGENIERIA CIVIL

2.2.1. GENERALIDADES

Para el ser humano siempre ha sido necesario representar la superficie terrestre y los elementos situados sobre ella, de esta inquietud por conocer el mundo que les rodea surgieron los mapas; creados y apoyados primeramente sobre teorías filosóficas, los mapas constituyen hoy en día una fuente importante de información.

La cuestión esencial en la elaboración de un mapa, es que la expresión gráfica debe ser clara, sin sacrificar por ello la exactitud. El mapa es un documento que tiene que ser entendido según los propósitos que intervinieron en su preparación.

Los elementos que debe contener un mapa de manera general son: título, fuente, orientación, escala y leyenda

2.2.2. MAPAS RELACIONADOS A LA INGENIERÍA CIVIL EN EL SALVADOR

Existen una gran cantidad de mapas de todo tipo, pero solo algunos de ellos cuentan con aplicaciones prácticas en la ingeniería civil, a continuación, se muestran ejemplos en la **Tabla No. 2.1** de este tipo de mapas en nuestro país:

Mapa	Descripción	Aplicaciones en Ingeniería Civil
Mapa topográfico	Contiene información en detalle de los accidentes geográficos naturales y artificiales de la superficie del suelo y curvas de nivel, en ellos se detallan el relieve, la forma y latitud de las montañas y cerros.	Los mapas topográficos se usan ampliamente para múltiples propósitos, que incluyen la selección de emplazamientos industriales, la planificación de autopistas o colonias, el recorrido de líneas eléctricas y telefónicas o de tuberías, entre otros.
Mapa geológico	Mapa temático que representa las rocas y estructuras geológicas que afloran en la superficie terrestre	Útil en la exploración minera y de aguas subterráneas, construcción de obras civiles, planeación, y ordenamiento territorial
Mapa geomorfológico	Mapa temático que representa las formas del relieve según su génesis y dinámica en el tiempo, las dimensiones, los tipos y sus relaciones con la estructura.	Es de gran utilidad en la planificación y ordenación urbana, además para la construcción de carreteras, canales, presas y embalses, puertos y para la explotación minera.
Mapa hidrológico	Información del recurso agua elaborada con el fin de brindar información para su mejor aprovechamiento, extracción, manejo y representación de las condiciones que guarda el recurso hídrico superficial	Se emplean como herramienta en anteproyectos de infraestructuras hidráulicas a nivel regional y nacional, tales como puentes, canales y presas.

Tabla No. 2.1 Mapas relacionados a la ingeniería civil en El Salvador

Fuente: Autores.

Se cuenta con otros tipos de mapas en nuestro país, pero en este apartado solo se han mostrado estos en forma ilustrativa. Además, existen otros mapas que son de mucha utilidad en el área de la geotecnia, como lo son los mapas

geotécnicos, los cuales no se tienen en el país. Estos se estudiarán a continuación.

2.3. MAPAS GEOTÉCNICOS

2.3.1. DEFINICIÓN DE MAPAS GEOTÉCNICOS

Un mapa geotécnico es un tipo de mapa geológico que brinda una representación generalizada de todos los componentes del ambiente que son significativos para la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de obras de ingeniería civil; además, aporta datos sobre las características y propiedades del suelo y del subsuelo de una determinada zona para evaluar su comportamiento y prever los problemas geológicos y geotécnicos.³

Estos documentos no pueden reemplazar una investigación para una obra concreta, pero son una ayuda insustituible para la planificación de investigaciones *in situ* e interpretación de los resultados de ensayo de campo y laboratorio que permitan realizar un diseño racional de la cimentación.

2.3.2. CLASIFICACIÓN DE MAPAS GEOTÉCNICOS

Existen diversas clasificaciones de mapas geotécnicos, una de estas es la propuesta por UNESCO-IAEG ⁴(1976), que los clasifica de acuerdo a su objetivo, contenido y escala (Ver **Tabla No. 2.2**)

³ Commission on Geological Maps of the International Association of Engineering Geology. (1976). ENGINEERING GEOLOGICAL MAPS. Francia. p. 11.

⁴ IAEG: International Association of Engineering Geology

Criterio	Tipo de mapa
Objetivo	<p>-Específico: Proporciona información sobre un aspecto determinado de la ingeniería geológica o para un objetivo concreto.</p> <p>-Múltiple o general: Proporciona información referente a diversos aspectos de la ingeniería geológica, para variados objetivos y usos geotécnicos.</p>
Contenido	<p>-Temático o analítico: Aporta detalles o evalúa un componente determinado del medio geológico (grado de meteorización, grado de fracturación de macizos rocosos, etc.)</p> <p>-Integrado: Hay dos tipos: 1) aporta las condiciones geotécnicas descriptivas de los principales componentes del medio geológico, 2) permite la zonificación del territorio en unidades geotécnicamente homogéneas.</p> <p>-Auxiliar: presenta datos concretos de algún aspecto geológico o geotécnico.</p> <p>-Complementario: proporciona información básica sobre algún aspecto geológico, geomorfológico, hidrogeológico, etc.</p>
Escala	<p>Gran escala: mayor a 1:10,000</p> <p>Media escala: 1:10,000 a 1: 100,000</p> <p>Pequeña escala (regional): menor a 1:100,000</p>

Tabla No. 2.2 Clasificación de los mapas geotécnicos en función de su objetivo, contenido y escala
Fuente: González de Vallejo, L. (2002). INGENIERÍA GEOLÓGICA. Prentice Hall. p. 377

Los mapas geotécnicos a pequeña y media escala suelen ser elaborados por instituciones gubernamentales o centros de investigación, los mapas locales a escalas mayores de 1:10.000 son elaborados por especialistas en geotecnia o ingeniería geológica y, dependiendo del contenido, en geología estructural, geomorfología, hidrogeología, etc.

De forma simplificada, los mapas geotécnicos pueden ser de evaluación geotécnica del terreno o de caracterización geotécnica. (González de Vallejo, 2002)

✓ **Mapas de evaluación geotécnica del terreno**

Son mapas cualitativos con clasificaciones generales, zonas problemáticas, aptitud del terreno para diversos usos, etc.; los más habituales incluyen una interpretación de la cartografía geológica (1:50.000 a 1:100.000) y características geotécnicas de formaciones superficiales (1:25.000 a 1:100.000), datos sobre recubrimientos, suelos, aluviales, etc.; caracterización cualitativa (a veces cuantitativa) y zonificación general somera.

✓ **Mapas de caracterización geotécnica**

Estos mapas pueden incluir la siguiente información:

- Caracterización global del terreno, se realiza a escalas entre 1:25.000 y 1:50.000, valorando geotécnicamente las unidades en su conjunto, con datos de propiedades e indicadores de calidad.
- Zonificación geotécnica para proyectos de ingeniería, a escalas entre 1:5.000 y 1:25.000, con información cuantitativa según su aplicación (cimentaciones, taludes, excavaciones, materiales para construcción, etc.).
- Cartografía geotécnica de detalle, a escalas entre 1:100 y 1:2.000, con información y datos geotécnicos para una obra concreta.

2.3.3. CONTENIDO DE LOS MAPAS GEOTÉCNICOS

El contenido y el detalle de la información que contenga un mapa de características geotécnicas, así como el grado de complejidad del mismo, depende de los siguientes factores:

- La escala y extensión.
- Los objetivos concretos que se persigan.
- La importancia de los diferentes factores geológico-geotécnicos y sus relaciones.
- La información disponible, datos y representatividad.
- Las técnicas de representación.

La información básica que debe incluir un mapa geotécnico, independientemente del tipo que sea, es la siguiente:

- Topografía y toponimia.
- Distribución y descripción litológica de las unidades geológicas.
- Espesor de suelos, formaciones superficiales y rocas alteradas.
- Discontinuidades y datos estructurales.
- Clasificación geotécnica de suelos y rocas.
- Propiedades de suelos y rocas.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Condiciones geomorfológicas.
- Fenómenos geodinámicos.

- Investigaciones previas existentes.
- Riesgos geológicos.

Se detallarán en la **Tabla No. 2.3**, los elementos más importantes:

Elementos básicos de un mapa geotécnico	Descripción
Topografía	Para la realización de una cartografía geotécnica se debe disponer de la información geológica básica sobre un plano topográfico. En caso de no existir base topográfica a la escala requerida, ésta debe ser realizada por métodos convencionales o a partir de fotografía aérea.
Clasificación geotécnica de suelos y rocas	Los parámetros geotécnicos a representar en las cartografías geotécnicas dependen de la escala, de la finalidad del mapa y de la disponibilidad de la información con que se cuente. En los trabajos que así lo requieran, las unidades cartográficas se caracterizan con más detalle a partir de investigaciones in situ, ensayos en laboratorio y análisis de muestras.
Condiciones hidrogeológicas	Los aspectos hidrogeológicos son de especial importancia en aquellos mapas geotécnicos enfocados a la planificación y uso del territorio, explotación de recursos hídricos o selección de emplazamientos para obras o actuaciones que tengan relación directa con las condiciones hidrogeológicas.
Condiciones geomorfológicas	Los aspectos geomorfológicos y la interpretación de la topografía son de gran importancia en lo referente a la caracterización física del territorio, ya que son útiles para explicar el historial de desarrollo de laderas, así como para detectar procesos de deslizamiento en las mismas.
Fenómenos geodinámicos	Los fenómenos geodinámicos son el resultado de

	<p>procesos geológicos activos en la actualidad; los mapas geotécnicos deben reflejar el carácter dinámico del medio y sus implicaciones con las actuaciones que se proyecten sobre el terreno.</p>
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla No. 2.3 Información básica que debe incluir un mapa geotécnico general

Fuente: Commission on Geological Maps of the International Association of Engineering Geology. (1976).
ENGINEERING GEOLOGICAL MAPS. Francia.

El contenido del mapa de características geotécnicas que va a desarrollarse en este estudio, se limitará a la información que proporcionan los estudios de suelos brindados por la institución gubernamental OPAMSS comprendidos en el período 2000 al 2010 y de bibliografía existente del lugar.

2.3.4. SIMBOLOGÍA Y REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS

Debido a la complejidad geológica que existe en diferentes zonas y a las diferentes aplicaciones y finalidades de los mapas geotécnicos, no existe un procedimiento que sea estándar en donde se indique el tipo de datos que deben contener, así como la forma de representación de estos. Sin embargo, de manera general, debe representarse en el mapa, la información sobre las características y propiedades geotécnicas de los suelos y rocas, delimitándolas de forma homogénea con respecto de alguna propiedad, zonificándolas geotécnicamente y asignándoles valores cuantitativos.

En la actualidad, existen diferentes aplicaciones informáticas y sistemas de información geográfica (SIG) que permiten el uso de herramientas de interpolación y análisis automático de las propiedades del suelo, para la representación de dichas zonas homogénea. Se retomará este tema en el

capítulo III, mediante la aplicación de software para la elaboración del mapa de características geotécnicas.

De manera general, los mapas geotécnicos deben contener los siguientes elementos:

✓ Leyenda

En la leyenda se debe detallar y aclarar la información contenida en el mapa, puede ser amplia y explícita. Además, incluye cuadros de clasificación y datos complementarios. En la hoja del mapa, puede incluirse también, junto a la leyenda, mapas sintéticos auxiliares o complementarios a escala pequeña (mucho menor que la del mapa geotécnico). En la **figura No. 2.1** se muestra un ejemplo de leyenda en un mapa geotécnico específico integrado.

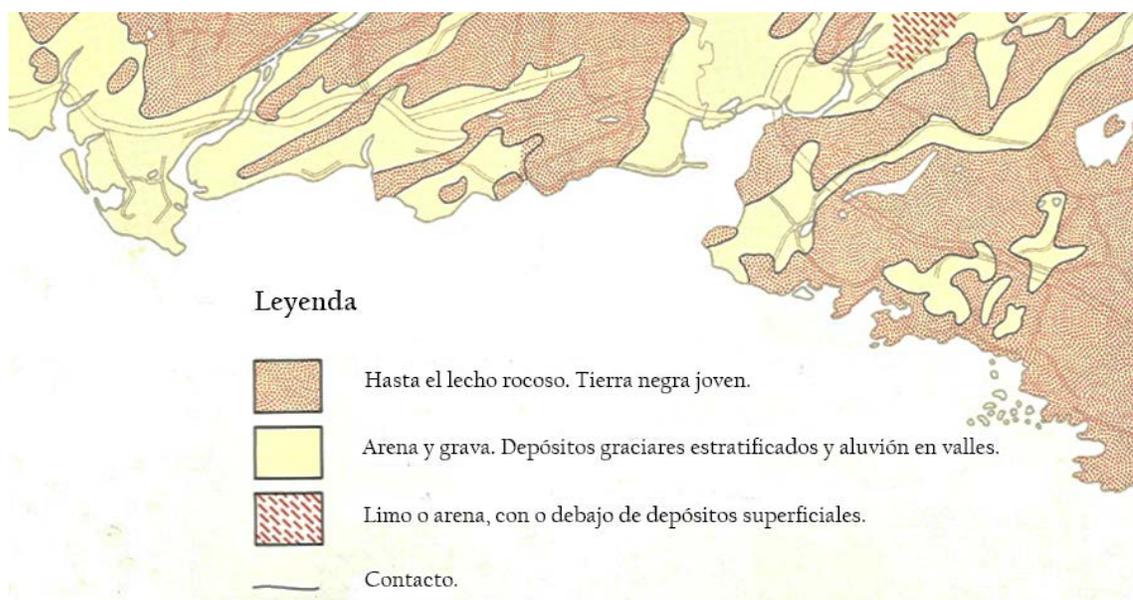


Figura No. 2.1 Mapa geotécnico de la llanura costera y geología superficial del corredor noreste de Washington D.C. a Boston.

Fuente: Commission on Geological Maps of the International Association of Engineering Geology. (1976). ENGINEERING GEOLOGICAL MAPS. Francia. p. 52

✓ Memoria

Acompañan las hojas del mapa, en esta se amplían y detallan los contenidos del mapa y de la leyenda, puede contener los resultados de reconocimientos e investigaciones realizadas *in situ*, los datos contenidos, las metodologías y criterios empleados en la elaboración del mapa. Además, es frecuente que se incluya las clasificaciones geológicas-geotécnicas de los materiales, hojas de resultados de ensayos y fotografías de los mismos.

La representación en el mapa de los parámetros geotécnicos obtenidos en ensayos puede hacerse de la siguiente manera: (Ver Figura No. 2.2).

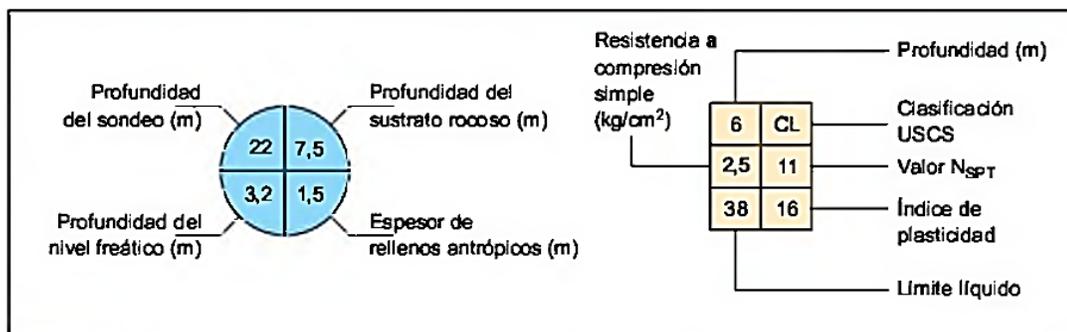


Figura No. 2.2 Ejemplo de diagramas para representación de datos geotécnicos puntuales de sondeos o ensayos.

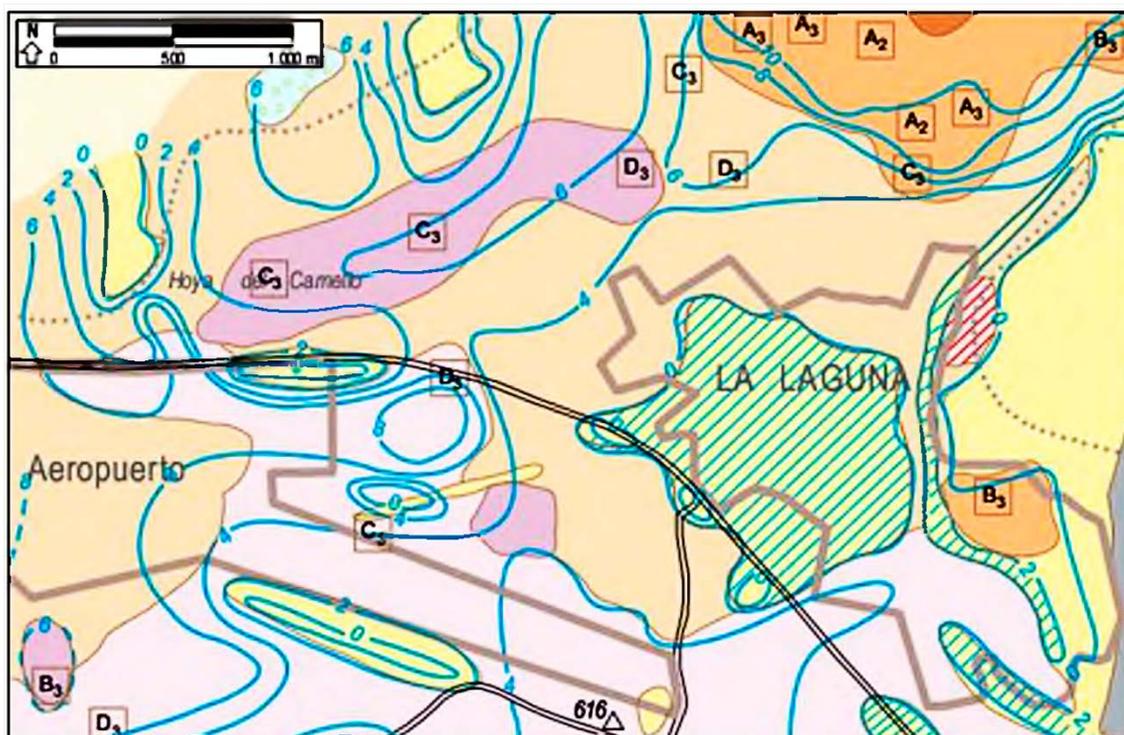
Fuente: González de Vallejo, L. (2002). INGENIERÍA GEOLÓGICA. Prentice Hall. p. 408

2.3.5. APLICACIONES DE MAPAS DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Las aplicaciones de un mapa de características geotécnicas son muy variadas, principalmente en la planificación del territorio, en obras de ingeniería e infraestructura civil.

Los mapas realizados para la planificación del territorio son mapas generales integrados y estos contienen información sobre diversos aspectos geológico-geotécnicos para variadas aplicaciones en la planificación de proyectos de ingeniería geológica en sus diferentes escalas. Generalmente, incluyen información sobre los factores con incidencia constructiva, necesaria para conocer los problemas relacionados con cimentaciones, excavaciones, estabilidad del terreno, recursos naturales, reservas de agua y emplazamiento de residuos.

A continuación, se presenta un ejemplo de mapa para planificación urbana a escala media (**Figura No. 2.3**), en el cual se han establecido zonas geológico-geotécnicas en base a la litología, geomorfología y clasificación geotécnica.



CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA		CARACTERÍSTICAS DE HINCHAMIENTO
ZONA	DESCRIPCIÓN	Expansividad y presiones de hinchamiento
1	 Arcillas arenosas de baja plasticidad (CL), marrón oscuro y rojizas, firmes, con esporádicos cantos de basalto y lapillis	<input type="checkbox"/> A Muy expansivo
2	 Arcillas limosas de baja plasticidad (CL-ML), marrón oscuro, firmes, con gravillas de piroclastos y cantos de basalto en laderas	<input type="checkbox"/> B Expansivo
3	 Arcillas arenosas de baja plasticidad (ML), marrón rojizo, firmes	<input type="checkbox"/> C Ligeramente expansivo
4	 Arcillas limosas de alta plasticidad (MH), marrón rojizo y gris azulado, firmes a blandas, con intercalaciones de finas vetas de arenas amarillentas	<input type="checkbox"/> D No expansivo
5	 Arcillas limosas y arenosas de alta plasticidad (MH), marrón rojizo, firmes y ocasionalmente blandas, con algunas gravas	Subíndice 1 $\approx < 2,3 \text{ kg/cm}^2 > 1,6 \text{ kg/cm}^2$ Subíndice 2 $\approx < 1,6 \text{ kg/cm}^2 > 0,8 \text{ kg/cm}^2$ Subíndice 3 $\approx < 0,6 \text{ kg/cm}^2 > 0,2 \text{ kg/cm}^2$
6	 Arcillas de alta plasticidad (CH), marrón oscuro, firmes a blandas con cantos de basalto	LÍNEAS DE ISOPACAS
7	 Cantos y bloques con arenas, limos y arcillas limosas (GM, GP, GC, ML, CL) en barrancos	 Zona de afloramientos rocosos o con recubrimientos máximos de 2 m
8	 Alternancia de basaltos inalterados, muy fisurados y escorias en coladas de 1 a 2 m de espesor, con oquedades de tamaño variable	 Isopaca
9	 Lapillis de tamaño entre 20 y 3 mm, debidamente soldados y cenizas, acumulados en conos de Zinder	Equidistancia entre isopacas: 2 m
		OBSERVACIONES
		El presente mapa no deberá ser empleado como sustitución de las investigaciones geotécnicas que los proyectos de construcción requieran en cada caso.

Figura No. 2.3 Mapa geotécnico general correspondiente a una zona de Tenerife, España (Leyenda simplificada: escala original 1:15.000)

Fuente: González de Vallejo, L. (2002). INGENIERÍA GEOLÓGICA. Prentice Hall. p. 387

Además de la planificación, un mapa geotécnico puede utilizarse en el estudio de viabilidad para el trazado y construcción de obras lineales (carreteras, vías de ferrocarril, etc.), así como también en puentes y presas.

Es por esto que, debido a la variedad de aplicaciones y al contenido de un mapa geotécnico en la ingeniería geológica, es importante conocer la geología y estratigrafía de los materiales que constituyen los suelos en el AMSS y

particularmente en el área de estudio, así como también, el marco tectónico regional y su influencia con el sistema de fallas en el país, lo cual se describe a continuación.

2.4. CONDICIÓN TECTÓNICA, DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

En este apartado se desarrollará una descripción de la tectónica a nivel regional y su influencia en el marco tectónico de El Salvador. Posteriormente, se expone la geología y estratigrafía que comprende el área en estudio, la cual está cubierta en gran parte por formaciones constituidas por materiales de origen volcánico, haciendo mención de los depósitos encontrados, dónde están ubicados y la era geológica en que se formaron.

2.4.1. TECTÓNICA REGIONAL

El vulcanismo en América Central resulta de la interacción de la triple convergencia de las placas de Norteamérica, Cocos y del Caribe (Ver **Figura No. 2.4**). La placa oceánica de Cocos se hunde (subduce) por debajo de las placas continentales norteamericana y del Caribe contribuyendo a que se forme el Arco Volcánico Centroamericano (CAVA, por sus siglas en inglés), que se extiende con una longitud de 1,100 km desde el sur de México hasta el norte de Panamá. (Ferrés, 2014).

Los edificios volcánicos que forman parte del CAVA se encuentran ubicados en el interior o en los bordes de una depresión tectónica tipo graben, el cual se extiende longitudinalmente subparalelo a la costa pacífica.

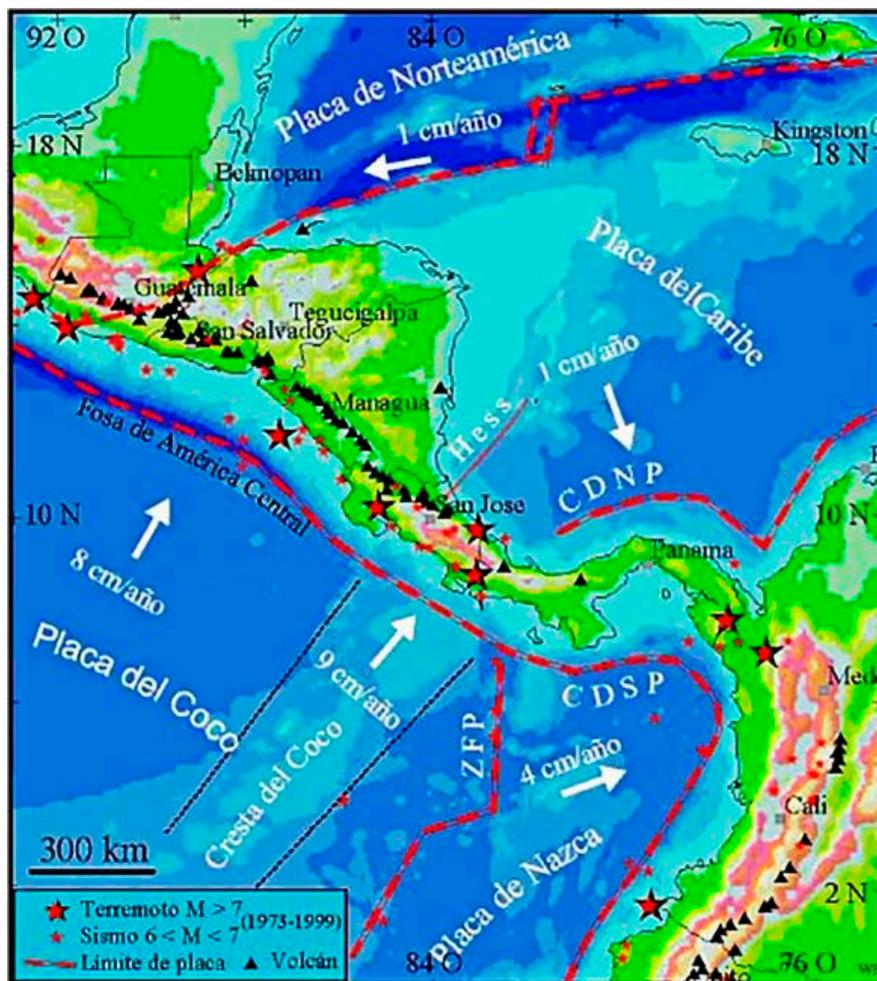


Figura No. 2.4 Configuración de las placas tectónicas en El Salvador.

Fuente: Escobar, Demetrio. (2005). MEMORIA TÉCNICA DEL MAPA DE ESCENARIOS DE AMENAZA DEL VOLCÁN DE SAN MIGUEL. El Salvador.

2.4.2. MARCO TECTÓNICO EN EL SALVADOR

Las erupciones volcánicas ocurridas en El Salvador han sido producto en su mayor parte por la interacción y fricción, que se produce entre la placa de Cocos y la Placa del Caribe ubicadas en la zona de convergencia oceánica-

continental frente a la costa pacífica del continente americano, denominada Fosa Mesoamericana (Tarbuck et al, 2005).

La estructura tectónica prominente en la región lo constituye el Graben Central Centroamericano, el cual tiene un ancho promedio de 10 a 20 km, aunque en El Salvador alcanza los 40 km. (Ver **Figura No. 2.5**).

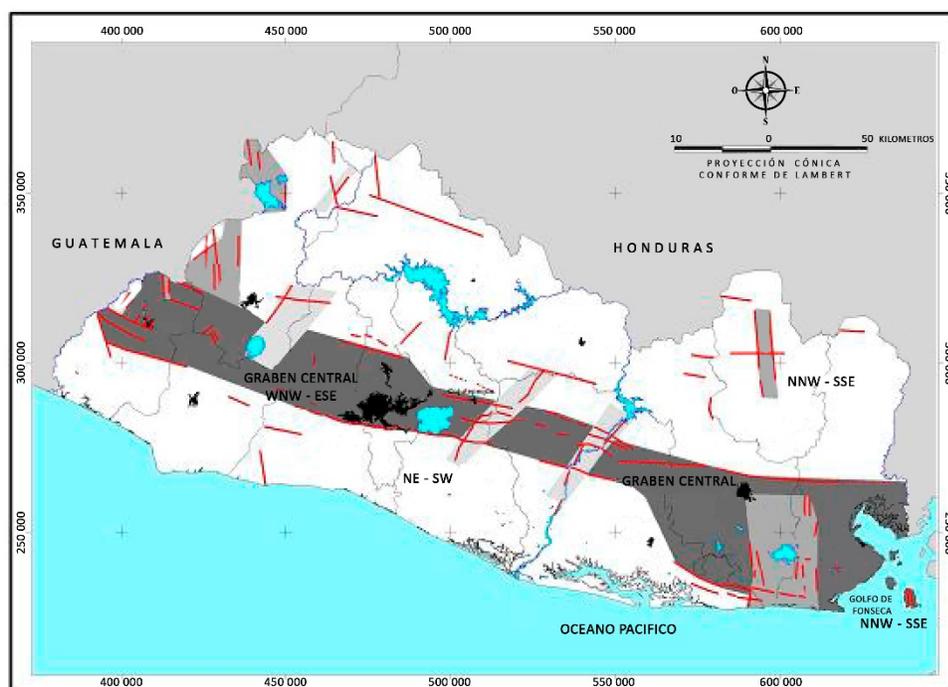


Figura No. 2.5 Sistemas de fallas asociadas a la formación y evolución del Graben Central en El Salvador.

Fuente: Hernández. W, 2004

Stoiber y Carr (1973), consideran que el CAVA está dividido en ocho segmentos estructurales controlados tectónicamente con diferentes características geológicas y geofísicas en cada uno de ellos; El Salvador está localizado en el cuarto segmento tectónico de Centroamérica que tiene una longitud de aproximadamente 240 Km. Según lo visto en la **Figura No. 2.5**, se permite

definir tres sistemas de fallas dominantes, donde cada una muestra las direcciones tectónicas principales. El sistema más importante en El Salvador es NWN-ESE, con rumbo aproximado de N70W; estas fallas definen los límites norte y sur del Graben Central, donde se ha desarrollado el frente volcánico activo y donde han ocurrido los terremotos más destructivos.

2.4.3. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Geológicamente el área de San Salvador y sus alrededores inmediatos está conformada por tres tipos diferentes de formaciones rocosas, todas ellas de origen volcánico: Formación Bálsamo, Formación Cuscatlán y Formación San Salvador.

Las antiguas datan del terciario superior (Plioceno), y las más jóvenes del Holoceno (Era Cuaternaria). Donde la formación Bálsamo del Terciario es la más antigua y está formada por una serie de lavas andesitas basálticas con intercalaciones de tobas de caída e ignimbritas intermedias, las cuales muestran paleosuelos rojizos bastante desarrollados entre períodos eruptivos con interrupciones importantes.

La formación Bálsamo está subyacente a la formación Cuscatlán constituida por importantes ignimbritas ácidas y lavas básicas intercaladas. La formación San Salvador, está representada por las tefras del volcán San Salvador, calderas de Ilopango y Coatepeque y el cráter de Plan de la Laguna (PL).

Para conocer los diferentes materiales que conforman cada una de las formaciones mencionadas anteriormente, ver la **Figura No. 2.6**, donde se presenta el mapa geológico del AMSS.

Plio-Pleistoceno	Formación Cuscatlan	c3 Efusivas-básicas-intermedias,	Holoceno	Formación San Salvador	s5a Efusivas básicas - intermedias
		c2 Efusivas ácidas y intermedias ácidas		s5b Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder)	
Holoceno	Formación Balsamo	b3 Efusivas básicas-intermedias	Qf	s3c	Cenizas volcánicas y tobas de lapilli
		b2 Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas, epiclastitas volcánicas subordinadas (estratos no diferenciados y edificios volcánicos)		s3a	Cenizas volcánicas y tobas de lapilli, sobre s4
		b1 Epiclastitas volcánicas y piroclastitas; localmente efusivas básicas e intermedias intercaladas.		s4	Tierra blanca: piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas
				s3a	"Tobas color café", sobre lavas
					Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café")
				s2	Efusivas básicas -intermedias, piroclastitas subordinadas
				s1	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, tobas ardientes; efusivas básicas -intermedias
					Cuerpos de agua
					Depósitos sedimentarios del Cuaternario
					Conos de deyección del Cuaternario

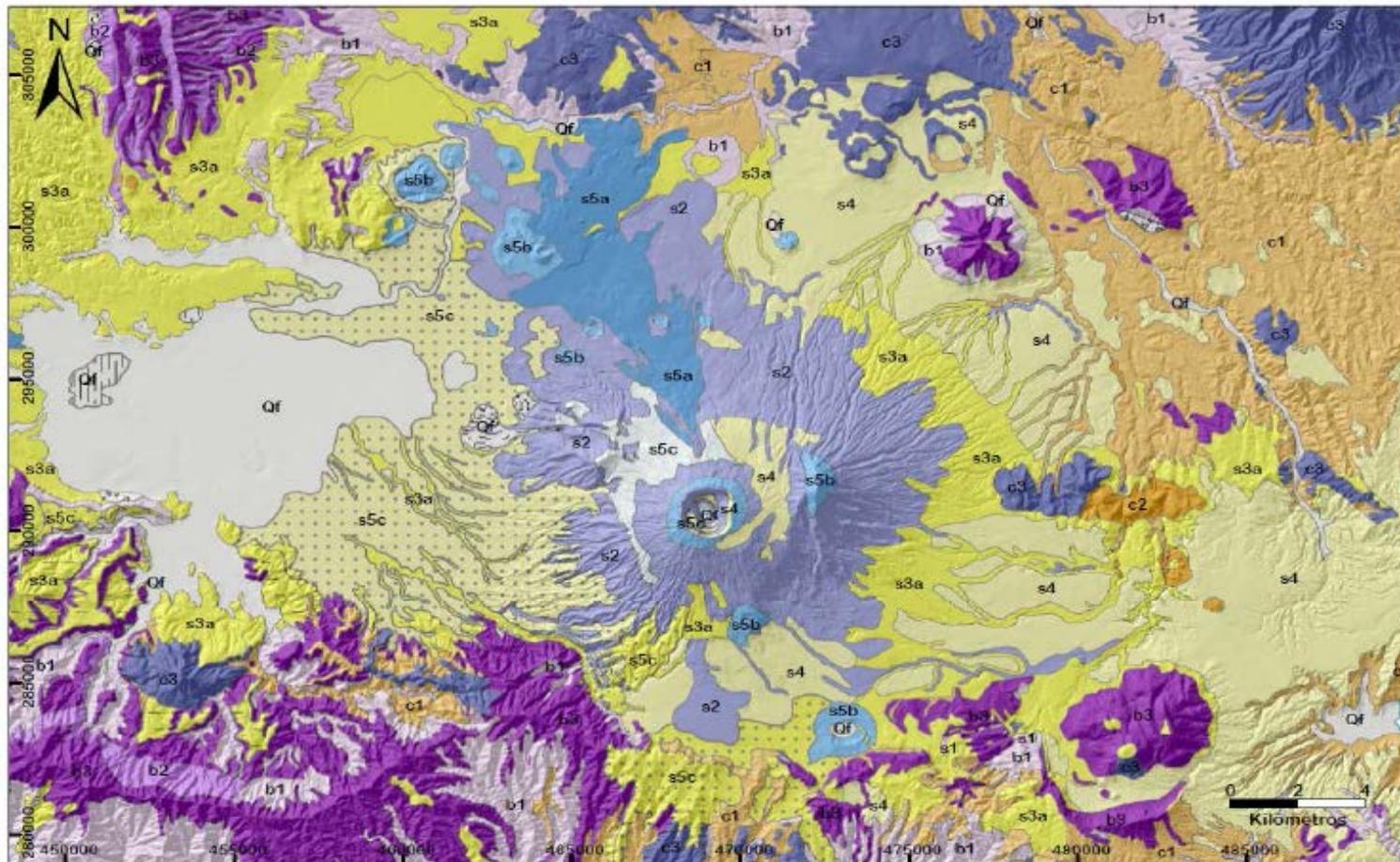


Figura No. 2.6 Mapa geológico del AMSS y sus alrededores, en base al Mapa Geológico 1: 100,000 de El Salvador

Fuente: Ferrés, Dolores. (2014). Tesis: "ESTRATIGRAFÍA, GEOLOGÍA Y EVALUACIÓN DE PELIGROS VOLCÁNICOS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO DE SAN SALVADOR". Universidad Nacional Autónoma de México, México.

La estructura del Graben Central juega un papel muy importante en la geología del país y, por ende, del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), puesto que esa depresión o graben, se ha formado a la vez con el surgimiento de la cadena volcánica y ha sido rellenada por los productos de esos volcanes. Las estructuras volcánicas, sus materiales piroclásticos y efusivos, las fallas geológicas y las condiciones climáticas (temperatura y precipitaciones), determinan la geomorfología y el carácter físico que tiene la geología en el AMSS.

A raíz de la presencia del Graben Central, de las estructuras volcánicas establecidas dentro de ese graben y del colapso caldérico del Volcán San Salvador, se pueden distinguir tres zonas geológicas en el AMSS, las cuales se describen a continuación:⁵

Zona Picacho: Está comprendida por la porción norte remanente del viejo edificio del volcán San Salvador. Los valles profundos en “V” son característicos e indicadores de lahares que se desprendieron de esa ladera y de manera recurrente se acumularon al pie de la misma, el último ocurrió en septiembre de 1982. Los ríos Urbina y Tomayate que corren de sur a norte y ubicados al oriente de esta ladera, se comportaron como barreras de las lavas que surgieron del antiguo edificio del San Salvador. Por otro lado, la zona del Picacho sirve a su vez de barrera para las lavas del cráter Boquerón.

⁵ Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). ASPECTOS GEOLÓGICOS QUE INFLUYEN EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EN LA RESPUESTA SÍSMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR. Documento sitio web: <http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00080/doc00080-contenido.pdf>

Zona Boquerón: Es la zona central comprendida entre la ladera del Picacho y la del Bálsamo. A lo largo de esta estrecha zona topográficamente más deprimida, se han canalizado las coladas lávicas y flujos piroclásticos del Boquerón y también del antiguo edificio San Salvador, cuyos desplazamientos han sido limitados por el río Acelhuate que ha servido como barrera. Las lavas del Boquerón no se encuentran en la zona del Picacho ni en la zona del Bálsamo. El sector comprendido entre Santa Tecla y las colonias San Benito-Escalón-Flor Blanca, por estar muy cercano al cráter Boquerón, cuentan con muchos flujos de lavas de las distintas erupciones del Boquerón, lo cual, favorece para la conducción y almacenamiento de agua subterránea. Debido a la presencia de esas lavas bajo las tefras TBJ, IB y G2⁶.

Zona del Bálsamo: Está ubicada en la parte sur y topográficamente más elevada del AMSS que comprende la cordillera homónima. Se comportó como barrera para las coladas lávicas del antiguo edificio del San Salvador y actualmente para las del Boquerón. Las coladas lávicas presentes en esta zona pertenecen a otros eventos mucho más antiguos que a la misma formación del complejo volcánico San Salvador. Esta zona por contener las formaciones más antiguas del AMSS, ha generado suelos rojizos, bastante desarrollados cuyas arcillas no han sido aún estudiadas y caracterizadas. Las cenizas de erupciones del Holoceno (10,000 años) de varios centros eruptivos, recubren esta cordillera, sin embargo, ante eventos de lluvias extremas o sismos importantes,

⁶ IB: Ignimbritas Boquerón

G2: Escorias andesítico-dacíticas del Boquerón denominadas G2 (Hernández, W. 2007)

en esta zona se producen deslizamientos rotacionales con daños recurrentes a las poblaciones, infraestructura vial, red eléctrica y otros servicios.

Las zonas descritas anteriormente pueden observarse en la **Figura No. 2.7**.

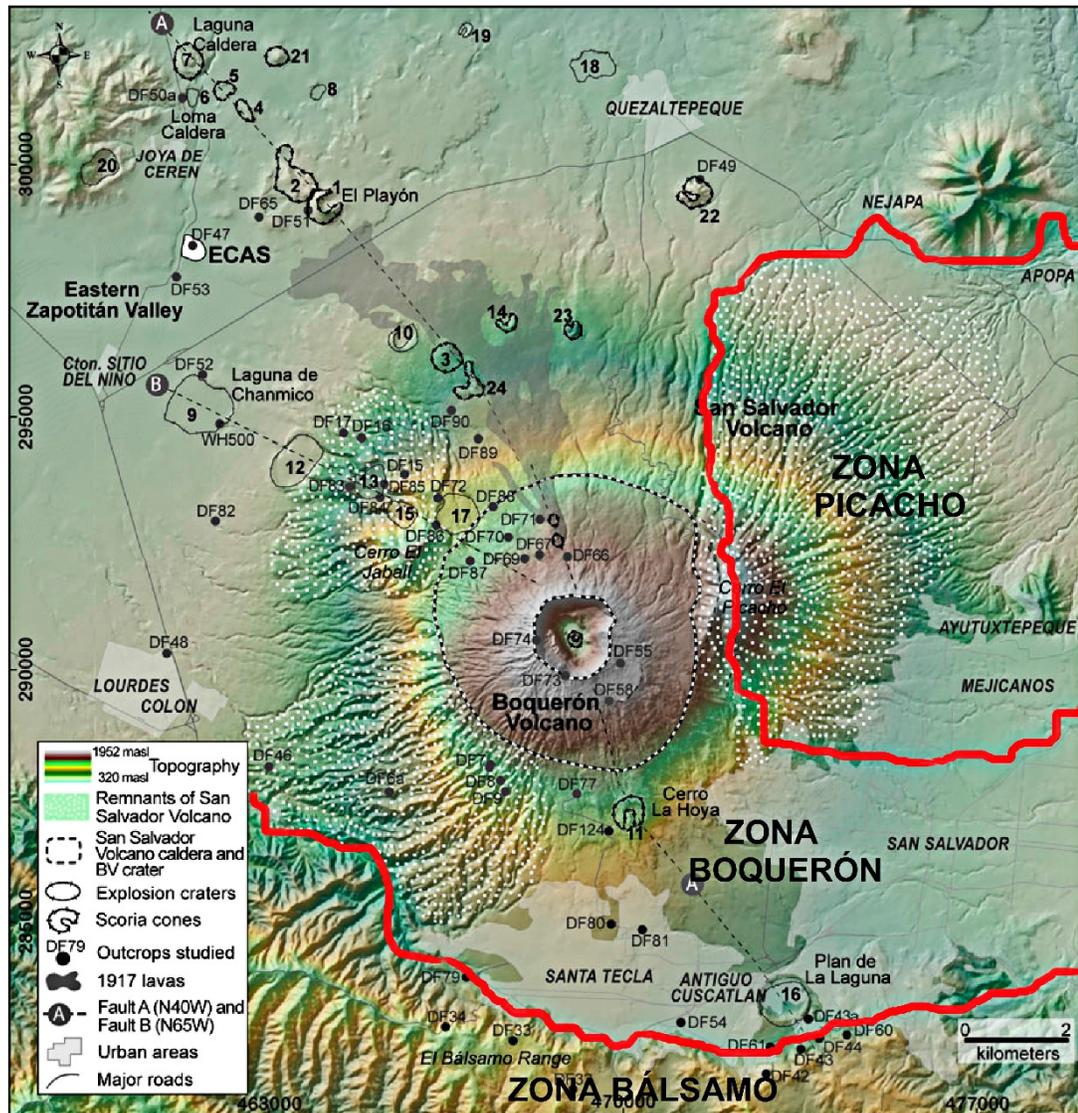


Figura No. 2.7 El modelo de elevación digital muestra las tres zonas geológicas en su cercanía al volcán de San Salvador.

Fuente: Ferrés et al. "THREE THOUSAND YEARS OF FLANK AND CENTRAL VENT ERUPTIONS OF THE SAN SALVADOR VOLCANIC COMPLEX (EL SALVADOR) AND THEIR EFFECTS ON EL CAMBIO ARCHEOLOGICAL SITE: A REVIEW BASED ON TEPHROSTRATIGRAPHY". Editorial J. McPhie.

2.4.4. ESTRATIGRAFÍA DEL AMSS

Los diferentes materiales presentes en el AMSS, han sido originados por productos de las diversas erupciones que se han dado a lo largo del tiempo, provenientes de tres fuentes principales de actividad: Volcán de San Salvador, el Volcán de Ilopango (caldera)⁷ y del Volcán del Plan de La Laguna.

Todos estos materiales consisten principalmente de intercalaciones de depósitos primarios y retrabajados, donde sobresalen las series de cenizas volcánicas, las tobas de pómez y las lavas andesíticas y basálticas.

2.4.4.1. Complejo Volcánico San Salvador (CVSS)

El CVSS está constituido por un estratovolcán compuesto, el Volcán Boquerón (VB) y veinticinco volcanes monogenéticos, dentro de los cuales se encuentra el maar Plan de la Laguna, cuyos depósitos pueden ser referentes para analizar la estratigrafía de la zona en estudio.

El edificio central del CVSS, (remanentes del antiguo Volcán San Salvador: Cerro el Picacho, Cerro Jabalí, y el VB), constituye el relieve más importante de la zona central de El Salvador, alcanzando una elevación de 1950 msnm en borde más elevado del cerro El Picacho.

Para comprender de mejor manera la estratigrafía marcada por eventos eruptivos del CVSS, puede observarse en la **Figura No. 2.8** un mapa

⁷ López Avalos, José Manuel (2008). Tesis: "APLICACIÓN DEL MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA PARA LA DETERMINACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P", Universidad de El Salvador, El Salvador.

sectorizado por secciones compuestas representativas, dentro de las cuales se encuentra la zona 2 a la que pertenece la zona en estudio (Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla) y para dicha zona se presenta la sección estratigráfica respectiva.

A continuación, se describe algunos materiales que son producto de eventos eruptivos del CVSS⁸:

G1: La erupción pliniana G1 denominada así por el Consorcio Salvador (1988), con fase inicial dacítica, es la más grande que se conoce del volcán de San Salvador. Los depósitos G1 están compuestos por pómez de caída vesiculado, de composición dacítico a andesítico, grisáceo, algo suelto, con moderada presencia de líticos oxidados y angulares. La secuencia G1 está interestratificada entre los depósitos de TB4, en la base y TB3 en el techo, por lo que su edad aproximada está entre 36 mil y 30 mil años.

G2: esta unidad corresponde a una erupción pliniana posterior del volcán de San Salvador y es bastante menor en volumen que G1. Está compuesta por escorias poco vesiculadas, por consiguiente, más densa, gris claro a gris pardo, mostrando mezcla de magmas, siendo rico en líticos basálticos rojizos densos y andesitas café amarillentas y líticos.

⁸ Ferrés, Dolores. (2014). Tesis: "ESTRATIGRAFÍA, GEOLOGÍA Y EVALUACIÓN DE PELIGROS VOLCÁNICOS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO DE SAN SALVADOR". Universidad Nacional Autónoma de México, México.

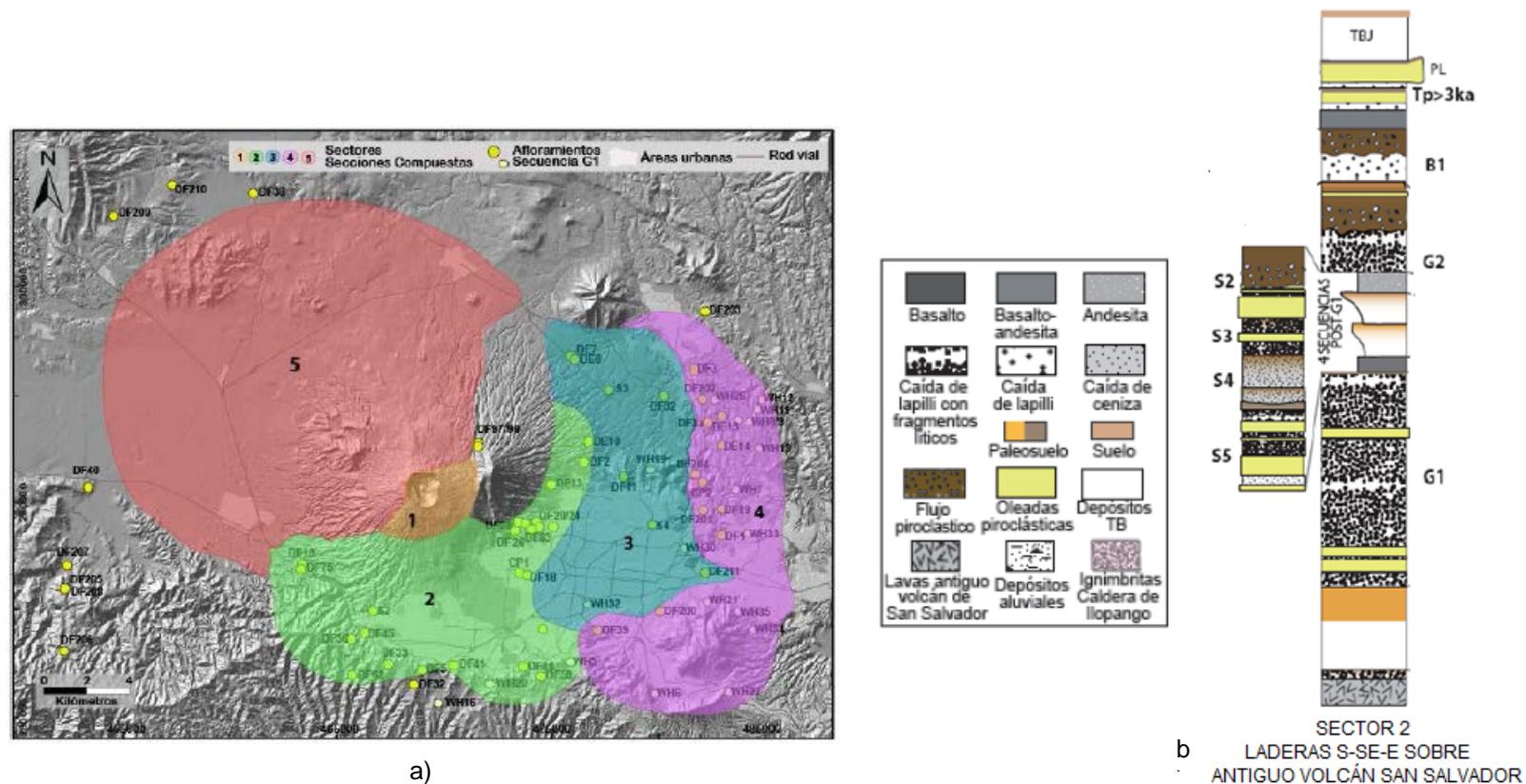


Figura No. 2.8 a) Mapa de sectores del CVSS caracterizado por secciones estratigráficas compuestas. b) Estratigrafía correspondiente al sector 2 del mapa.

Fuente: Ferrés, Dolores. (2014). Tesis: "ESTRATIGRAFÍA, GEOLOGÍA Y EVALUACIÓN DE PELIGROS VOLCÁNICOS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO DE SAN SALVADOR". Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Cuando presentan alteración muestran aspecto moteado evidenciado por un tono gris y beige, recordando la pómez del G1.

Ignimbrita Boquerón (IB): también producto del volcán de San Salvador; presenta poca consolidación, posee matriz de cenizas finas medianamente meteorizadas, en la que se encuentran fragmentos de escoria gris con meteorización baja, fragmentos de escoria juveniles de tamaños variados y líticos andesíticos con oxidación, además, muestra pequeños bolsones de escoria bastante vesicular, estando compuesta por dos flujos piroclásticos de color café oscuro mostrando una intercalación de delgadas oleadas piroclásticas (surges) de color café claro a pardo.

Talpetate: Dentro de estos depósitos hay tres tipos, de acuerdo a diferentes eventos eruptivos: Talpetate >3,000 años, el cual se encuentra sobre los depósitos de TBJ en la zona próxima del VB y sobre Plan de la Laguna en el sector SE del mismo. Además, el Talpetate I y II, los cuales se componen de unidades de lapilli y ceniza friable (desmenuzable).

Depósitos piroclásticos de la erupción de 1917: corresponde a la última erupción del Volcán Boquerón (VB), la cual tuvo una fase explosiva que generó una erupción que dispersó cenizas, afectando la ciudad de Santa Tecla (Lardé y Larín, 1978).

Plan de La Laguna (PL)⁹

La erupción del Plan de la Laguna corresponde a una erupción monogénica de origen freatomagmático, que tuvo lugar entre la ladera sur del complejo volcánico San Salvador y el borde sur del Graben Central. Se caracteriza por tener en la base lapilli andesítico, vesicular gris, superpuesto por oleadas; la parte intermedia laminada compuesta por cenizas de caída y oleadas; y el techo está formado por lapilli acrecional.

Debido a la irregularidad del terreno y a los efectos erosivos, estos depósitos se localizan en el sector de la cordillera del Bálsamo, sobre las escorias andesítico-dacíticas del Boquerón denominadas G2 (Hernández, W. 2007) y cuando están erosionadas yacen sobre pómez de caída TB4. En la parte más distal los productos piroclásticos aparecen sobre los suelos rojizos de las lavas meteorizadas de la formación Bálsamo.

El área de cobertura de la erupción del Plan de la Laguna es de 74 km² en la que incluyen los municipios de Antigua Cuscatlán, Nuevo Cuscatlán y parte de Santa Tecla, donde los productos fueron depositados hasta una distancia de 11 km.

⁹ Marroquin, Karla. (2007). Tesis: "CARACTERIZACIÓN DEL DEPÓSITO PIROCLÁSTICO PROVENIENTE DE LA ERUPCIÓN DEL PLAN DE LA LAGUNA". Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, El Salvador.

2.4.4.2. Caldera de Ilopango

Esta caldera se desarrolló en diversas fases eruptivas, de las cuales se desconocen las dataciones de las erupciones de las tres fases iniciales (Meyer-Abich, 1956); sin embargo, se conoce sobre la última fase que comprende materiales de composición ácida provenientes de cuatro erupciones explosivas plinianas, cuyos productos son la TB4, TB3, TB2 y TBJ. Dichos productos se describen a continuación:

Cenizas Volcánicas: conocidas locamente como “Tierra Blanca”, que son productos piroclásticos con características fricciantes en los que predomina la pómez, sus granos tienen dimensiones similares y su textura es rugosa, la distribución granulométrica varía, pero básicamente se puede clasificar como limo arenoso (ML) o arena limosa (SM) de muy baja plasticidad. Los espesores varían de unos pocos metros al pie del volcán de San Salvador, hasta alcanzar grandes espesores en los alrededores del Lago de Ilopango. Estos productos piroclásticos pueden dividirse en TB4, TB3, TB2 y TBJ¹⁰

TB4: tiene una composición riolítica; su espesor cerca de la caldera alcanza los 7 m y decrece gradualmente hacia el oeste a aproximadamente 3 m en Santa Tecla (Hernández et al, 2010). La unidad consiste de depósitos moderados de pómez gruesa con capas delgadas de cenizas finas en la parte de arriba y debajo de dichos depósitos.

¹⁰ Lexa et al. (2011). Documento: GEOLOGY AND VOLCANIC EVOLUTION IN THE SOUTHERN PART OF THE SAN SALVADOR METROPOLITAN AREA. Editor P. Hradecký.

TB3: representa los productos de una erupción freatomagmática relativamente pequeña. Se compone de depósitos de cenizas finas con cantidades variables de lapilli acrecional y flujos piroclásticos finos a gruesos.

TB2: Se compone de depósitos de pómez de composición dacítica de color beige a blanca (Lexa et al, 2011), mal graduada, con abundantes minerales oscuros representados por hornblenda. El techo presenta un paleosuelo de delgado espesor, de color café oscuro.

Tierra Blanca Joven (TBJ): se compone de siete subunidades con características físicas variables relacionadas a los diferentes mecanismos eruptivos (Hernández, 2004). Estas se presentan en la **Figura No. 2.9**.

Representó la última erupción ultraplíniana cuyos depósitos piroclásticos TBJ (Hernández, 2004), consisten principalmente de fragmentos de vidrio volcánico que forman cenizas de arena fina y tamaño limo (grandes cantidades), fragmentos de pómez y líticos (tamaño grava, arena y grava); polvo volcánico y cristales en pequeña cantidad (tamaño arena y limo), cuyas cenizas de caída cubrieron completamente todo el territorio actual de El Salvador y se extendieron por una centena de kilómetros.

Los flujos piroclásticos de este evento también cubren extensas áreas de los departamentos de San Salvador, La Libertad, La Paz y Cuscatlán.

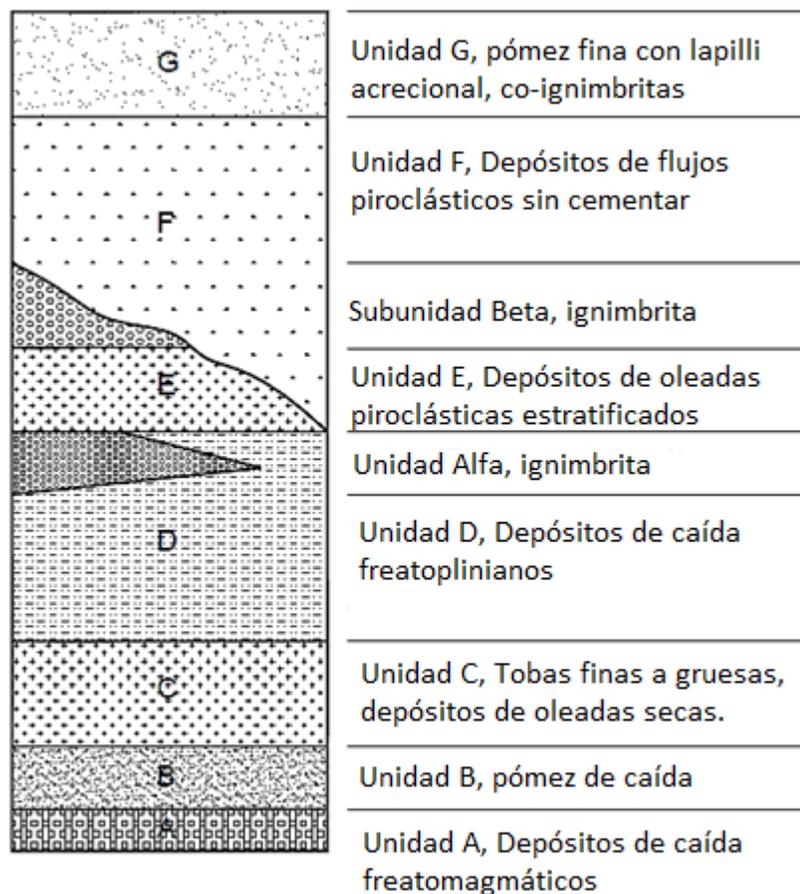


Figura No. 2.9 Estratigrafía de la TBJ

Fuente: Lexa et al. (2011). GEOLOGY AND VOLCANIC EVOLUTION IN THE SOUTHERN PART OF THE SAN SALVADOR METROPOLITAN AREA. Editor P. Hradecký.

En la **Figura No. 2.10** se muestran algunos estratos descritos anteriormente, los cuales provienen del CVSS y Caldera de Ilopango.

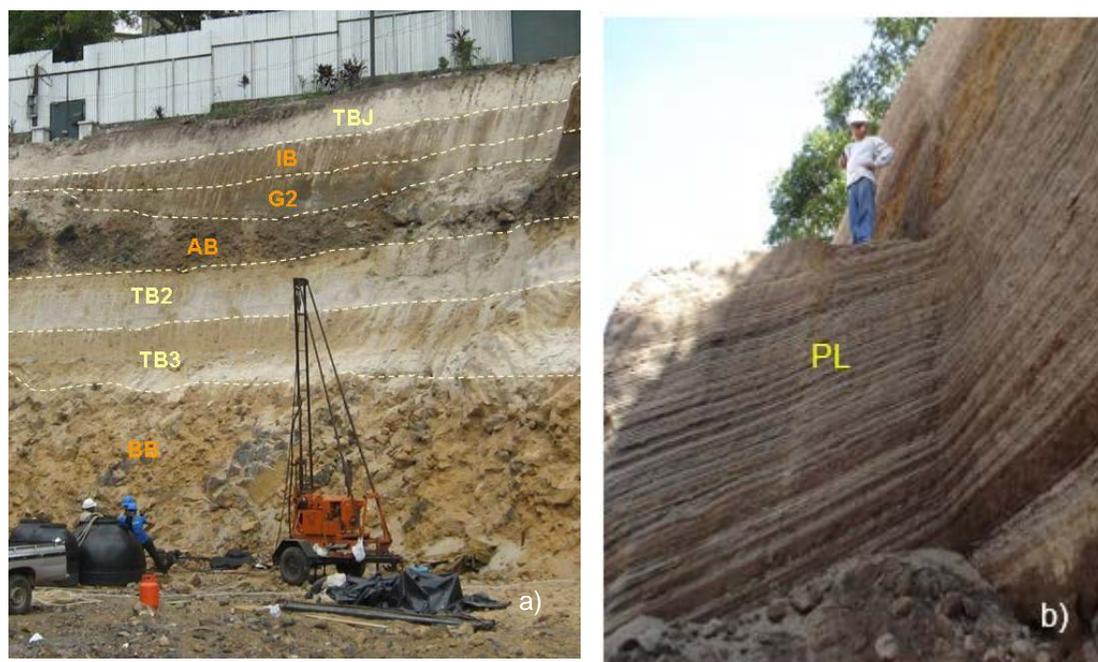
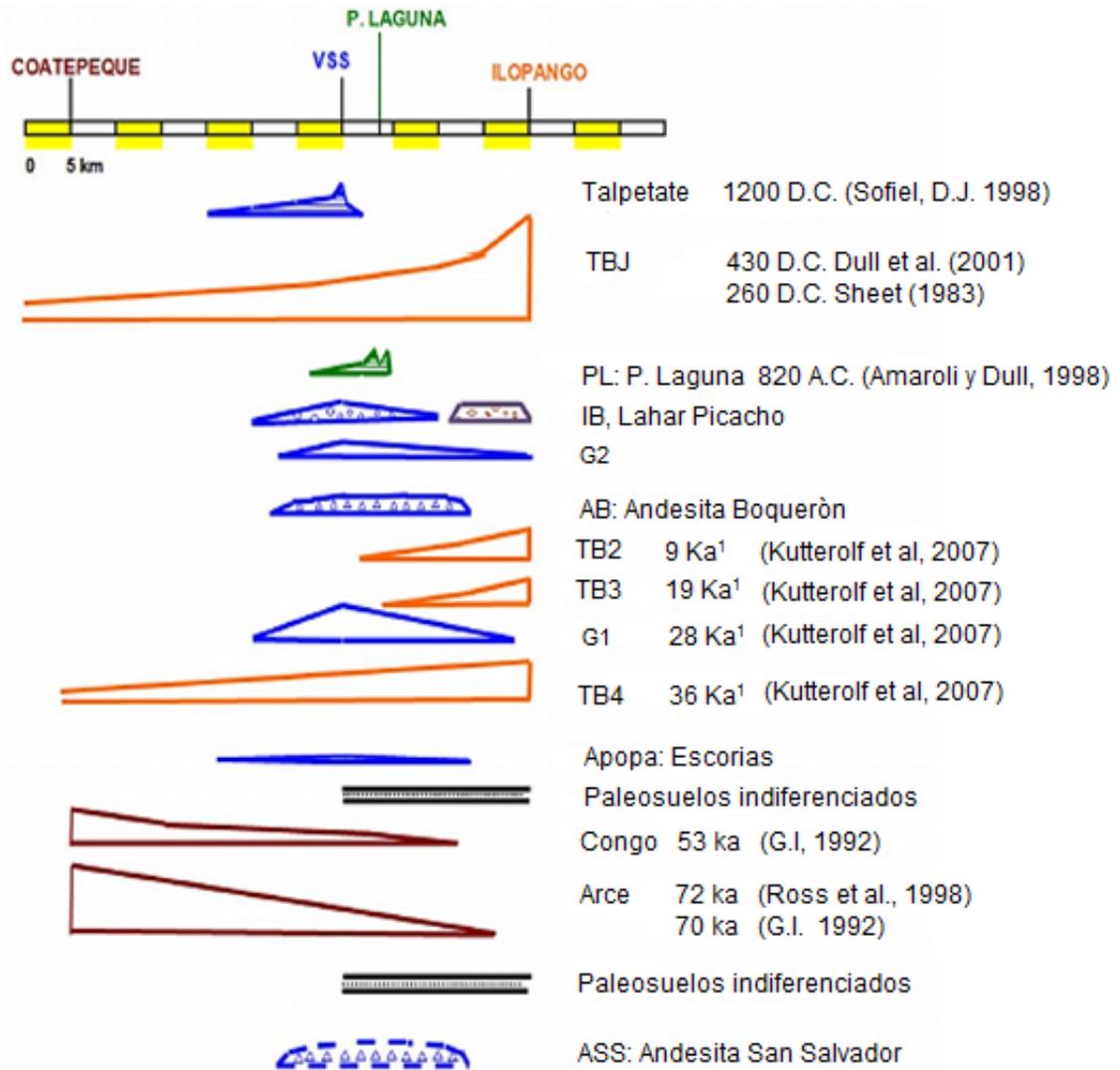


Figura No. 2.10 a) Representación de depósitos provenientes del CVSS y de Caldera de Ilopango en Zona Rosa, San Salvador. b) Depósito de Plan de la Laguna en Santa Elena.

Fuente: Hernández, Walter. (2008). ESTRATIGRAFÍA DEL AMSS. Congreso Geológico de América Central, San José, Costa Rica.

A continuación, se presenta un esquema (ver **Figura No. 2.11**) que ordena en forma relativa los productos de las distintas erupciones, indicando la fuente de emisión y la distribución espacio-temporal de estos en el AMSS. El gráfico muestra el orden de cada depósito y su fuente de origen.

En el esquema, el borde oriental de Ilopango se utiliza como referencia de punto de partida de sus tefras, mientras que el borde occidental se utiliza para Coatepeque y el cráter para el complejo volcánico San Salvador y Plan de la Laguna.



Ka¹ :Edad estimada por razón de sedimentación de cenizas en fondo marino

W. Hernández, 2007

Figura No. 2.11 Secuencia estratigráfica (superior) del relleno del Graben Central en San Salvador. Muestra la relación espacio – temporal de los distintos depósitos volcánicos explosivos y efusivos asociados a sus respectivos centros de emisión.

Fuente: (Hernández, 2007)

2.5. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS SUELOS DEL AMSS

El suelo, considerado como un agregado natural de granos minerales, es un material muy complejo y de gran diversidad y para conocer las propiedades más importantes desde el punto de vista de ingeniería geológica, se hace necesario la clasificación e identificación de los suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), que es el más utilizado para tal identificación, a partir de características granulométricas y plásticas del suelo.

A partir de dicha clasificación, es posible caracterizar el suelo mediante sus propiedades físicas como mecánicas.

2.5.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Dentro de las propiedades físicas se tiene: la composición o clasificación, peso específico, contenido de humedad, porosidad, relación de vacíos, consistencia, compacidad, textura, color, etc. Algunas de ellas son descritas en la **Tabla No.**

2.4.

En cuanto a la clasificación geotécnica de los suelos, en el AMSS estos son variables predominando los siguientes: Limo orgánico (OL), Arena limosa (SM), Limo arenoso (ML), Arena mal graduada (SP), Limo arenoso orgánico (ML-OL), Arena bien graduada (SW), Grava mal graduada (GP), Arcilla arenosa (CL), Arena arcillosa (SC), entre otros.

Propiedades físicas	Descripción
<p>Contenido de humedad (w)</p> $w (\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$ <p>Dónde:</p> <p>$W_s = \text{peso de los sólidos del suelo}$</p> <p>$W_w = \text{peso del agua}$</p>	<p>Se conoce como contenido de agua o humedad de un suelo, la relación entre el peso de agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida.</p>
<p>Peso específico (γ)</p> $\gamma = \frac{W}{V}$ <p>Dónde:</p> <p>$W = \text{peso total de la muestra de suelo}$</p> <p>$= W_s + W_w$</p> <p>$V = \text{volumen total del suelo}$</p>	<p>Es el peso de suelo por volumen unitario y suele llamársele también peso húmedo. Es una de las propiedades físicas más importantes de un suelo, pues con este se determina, por ejemplo, la presión de tierra o la presión producida por sobrecargas.</p>
<p>Relación de vacíos (e)</p> $e = \frac{V_v}{V_s}$ <p>Dónde:</p> <p>$V_v = \text{volumen de vacíos}$</p> <p>$V_s = \text{volumen de sólidos del suelo}$</p>	<p>Es la relación del volumen de vacíos al volumen de sólidos del suelo.</p> <p>La relación puede variar teóricamente de 0 ($V_v = 0$) a ∞ (valor correspondiente a un espacio vacío). En la práctica no suelen hallarse valores menores de 0.25 (arenas muy compactas con finos) ni mayores de 15, en el caso de algunas arcillas altamente compresibles.</p>
<p>Porosidad (n)</p> $n = \frac{V_v}{V}$ <p>Dónde:</p> <p>$V_v = \text{volumen de vacíos}$</p> <p>$V = \text{volumen total del suelo}$</p>	<p>Es la relación del volumen de vacíos entre el volumen de la muestra de suelo.</p> <p>Esta relación puede variar de 0 (en un suelo ideal con solo fase sólida) a 100 (espacio vacío). Los valores reales suelen oscilar entre 20% y 95%.</p>
<p>Grado de saturación (S)</p> $S (\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100$ <p>Dónde:</p> <p>$V_w = \text{volumen de agua}$</p> <p>$V_v = \text{volumen de vacíos}$</p>	<p>Es la relación del volumen de agua en los espacios vacíos entre el volumen de vacíos.</p> <p>Varía de 0 (suelo seco) a 100% (suelo totalmente saturado).</p>

Consistencia		
Valores de "N"	Consistencia	
0-1	Muy blanda	Esta propiedad, la poseen únicamente los suelos cohesivos y en el medio es determinada cualitativamente a partir del N golpes de campo del ensayo de penetración estándar, SPT. Sin embargo, es importante tomar en cuenta el alcance que tiene el ensayo SPT para suelos cohesivos (resulta principalmente adecuado para suelos no cohesivos), ya que sus resultados pueden no ser completamente fiables para la aplicación de correlaciones en este tipo de suelo. Es por esto, que se hace necesario la realización de ensayos de laboratorio a partir de muestras obtenidas en campo
2-4	Blanda	
5-8	Media	
9-15	Consistente	
16-30	Muy consistente	
Compacidad		
Valores de "N"	Compacidad	
0-4	Muy suelto	La compacidad de un suelo es otra forma de expresar la porosidad, ya que, si la porosidad es menor, la estructura del suelo es más compacta y viceversa. La compacidad natural de un depósito de suelo granular ejerce una influencia significativa en sus propiedades mecánicas y, por ende, en el comportamiento del suelo como material de apoyo para una cimentación. (Tamez, 2001).
5-10	Suelto	
11-30	Mediana	
31-50	Muy densa	

Tabla No. 2.4 Propiedades físicas del suelo.

Fuente: Juárez Badillo, E. (2005). MECÁNICA DE SUELOS, Tomo 1 Fundamentos de Mecánica de Suelos. Editorial Limusa, México.

En el AMSS, puede encontrarse suelos con diferentes categorías de compacidad o consistencia, para los suelos granulares o cohesivos, respectivamente. Los suelos "muy sueltos" o "blandos" pueden ser arenas limosas o limos arenosos retrabajados por el hombre o por procesos naturales de erosión, los cuales han perdido su compacidad natural y en algunos lugares, pueden ser arcillas o suelos contaminados con orgánicos.

Los suelos intermedios están constituidos por cenizas volcánicas (SM y ML), pómez, materiales gravosos, arenas medianamente densas y todos los demás

productos de origen volcánico; sin embargo, las arenas limosas (SM) pueden presentar estratos con una compacidad “muy densa”, a consecuencia de los procesos geológicos. (Aguilar, 1984)

Los suelos “muy consistentes” o “muy densos”, generalmente están asociados a tobas volcánicas o a los flujos de lava originados por el volcán de San Salvador.

2.5.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas están relacionadas con la resistencia que opone el suelo a las deformaciones debido a las modificaciones en el estado tensional del suelo. Esto puede determinarse a partir de la resistencia al corte, el cual es un factor muy importante para poder realizar análisis posteriores en aplicaciones de estabilidad de obras civiles.

Las propiedades mecánicas de suelos que van a describirse a continuación son la resistencia al corte de los suelos con sus parámetros: ángulo de fricción interna (φ), y la cohesión (c), los cuales son de importancia en aplicaciones ingenieriles.

- **Resistencia al corte de los suelos**

El criterio de rotura de los suelos más difundido en El Salvador, es el propuesto por Coulomb, quien admitió que, en primer lugar, los suelos fallan por esfuerzo cortante a lo largo de planos de deslizamiento. (Ver **Tabla No. 2.5**)

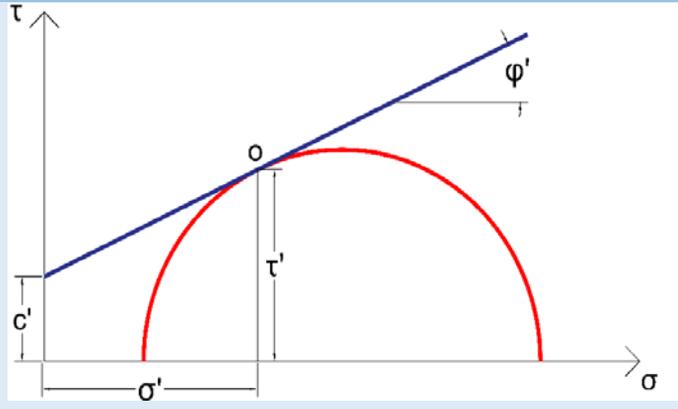
Círculo de Mohr	Ecuación
	$\tau = c + \sigma \tan \varphi$ <p>dónde:</p> <p>τ =resistencia al corte del suelo a favor de un determinado plano σ =esfuerzo normal actuando sobre el mismo plano c =cohesión φ =ángulo de fricción interna</p>

Tabla No. 2.5 Estado tensional representado por el círculo de Mohr como una situación de rotura.

Fuente: autores.

- **Ángulo de fricción interna**

Este ángulo es análogo al ángulo de fricción de dos cuerpos que se deslizan, en cuyo caso, este ángulo se conoce como ángulo de fricción interna y $\tan(\varphi)$, que es el coeficiente de fricción. Depende de varios factores como el tamaño y la forma de los granos, la distribución de tamaños y la densidad.

- **Cohesión**

Es una medida de la cementación o adherencia entre partículas de suelo y es usada en mecánica de suelos para representar la resistencia al cortante producida por la cementación. Representa la ordenada en el origen de la envolvente de rotura, por tanto, es la máxima resistencia tangencial movilizable en un plano cualquiera cuando el esfuerzo normal efectivo en dicho plano es nulo y es mayor a medida que aumenta dicho esfuerzo normal.

A continuación, se presenta información de algunos parámetros del suelo, a partir de datos obtenidos en el AMSS, los cuales han sido determinados por ensayos triaxiales y de corte directo (Ver **Tabla No. 2.6, 2.7 y 2.8**)

Ubicación	Tipo de suelo	Propiedades físicas y mecánicas del suelo			
		w	γ_m	φ	c
		%	$\frac{g}{cm^3}$	grados	$\frac{kg}{cm^2}$
Santa Tecla	Limo arenoso, (ML)	33.9	1.44	21.4	0.205
Santa Tecla	Limo arenoso, (ML)	38.5	1.51	21.8	0.20
Calle a Huizúcar	Arena pomítica (SP)	22.7	0.80	46.9	0.0
Calle a Huizúcar	Toba	7.5	1.20	21.8	1.10

Tabla No. 2.6 Parámetros de suelo del AMSS obtenidos mediante ensayos de corte directo.
Fuente: Landaverde, Miguel. (2007). "RECOPIACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS",
Departamento de Geotecnia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador

Ubicación	Tipo de suelo	Propiedades físicas y mecánicas del suelo						
		w	S_s	e	γ_d	γ_m	φ	c
		%			$\frac{g}{cm^3}$	$\frac{g}{cm^3}$	grad	$\frac{kg}{cm^2}$
Boulevard Orden de Malta, Antiguo Cuscatlán (A.C)	Arcilla limosa	42.6	2.50	0.88	1.02	1.46	45.0	1.0
Boulevard Orden de Malta, A.C.	Arcilla arenosa	29.4	2.71	0.93	1.41	1.82	23.0	1.1
Boulevard Orden de Malta, A.C.	Limo arenoso	48.2	2.48	1.56	0.97	1.44	45.0	1.0
Boulevard Orden de Malta, A.C.	Arcilla	40.0	2.80	1.25	1.25	1.75	35.6	0.80
Santa Elena, A.C.	Arena limosa	18.2	2.79	1.40	1.16	1.37	23.8	0.25
Santa Elena, A.C.	Arena limosa	25.3	2.30	0.93	1.17	1.47	31.3	0.1
Santa Elena, A.C.	Limo arenoso	34.1	2.57	1.12	1.21	1.62	13.7	0.68
Santa Elena, A.C.	Limo arenoso	60.5	2.40	1.52	0.96	1.54	32.3	0.54
AMSS	Arena arcillosa	25.4	2.56	1.05	1.25	1.57	20.2	0.75

AMSS	Arcilla arenosa	27.1	2.65	1.03	1.24	1.58	36.9	0.50
AMSS	Limo arenoso	44.7	2.54	1.74	0.93	1.34	-	0.22
AMSS	Arena limosa	25.7	2.47	1.70	0.91	1.15	44.3	0.55
Calle a Huizúcar	Arena limosa	21.1	-	-	1.74	2.11	43.5	0.71
Calle a Huizúcar	Limo arenoso	19.0	-	-	1.21	1.44	20.4	1.03
Calle a Huizúcar	Arcilla arenosa	33.1	-	-	1.51	2.01	1.0	0.30
Calle a Huizúcar	Limo arenoso	33.6	-	-	1.60	2.14	10.2	0.50
Calle a Huizúcar	Limo arenoso	22.1	-	-	1.64	2.00	12.5	0.20
Calle a Huizúcar	Arena limosa	26.9	-	-	1.56	1.98	34.7	1.60
Calle a Huizúcar	Limo arenoso	22.1	-	-	1.42	1.73	23.2	0.48
Calle a Huizúcar	Limo arenoso	20.7	-	-	1.34	1.62	25.5	2.55
Calle a Huizúcar	Limo arenoso	22.1	-	-	1.56	1.90	20.5	0.35
Calle a Huizúcar	Arena limosa	23.1	-	-	1.46	1.80	16.0	0.73
Calle a Huizúcar	Limo arenoso	22.3	-	-	1.37	1.68	16	0.73
Calle a Huizúcar	Arena limosa	32.4	-	-	1.50	1.99	13.6	1.41

Tabla No. 2.7 Parámetros de suelo del AMSS obtenidos mediante ensayos triaxiales.

Fuente: Landaverde, Miguel. (2007). "RECOPIACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS", Departamento de Geotecnia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador

Tipo de suelo	W	e	G_w (%)	γ_h T/m ³	γ_s T/m ³	G_s	ϕ (°)	C Kg/cm ²	q_{adm} Kg/cm ²	Observación
SM	32.83	1.70	49.24	1.27	0.80	2.44	24.3	0.23	0.40	M, C
ML	28.65	1.27	57.27	1.38	1.08	2.41	28.4	0.33	0.50	M, C

Tabla No. 2.8 Parámetros del suelo de los municipios de Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla.

Fuente: Aguirre, Gil. (1996), Tesis: "MANUAL DE FUNDACIONES DE LAS ESTRUCTURAS SEGÚN TIPOS DE SUELOS Y CONDICIONES DEL TERRENO". Universidad de El Salvador, El Salvador.

De la **Tabla No. 2.8:**

M: Malo para cimentar

C: Mejorar su capacidad de soporte mediante la restitución y compactación con suelo natural y sano.

2.6. DEFINICIÓN Y OBJETIVO DEL ESTUDIO GEOTÉCNICO

Un estudio geotécnico es el conjunto de actividades que permiten obtener la información geológica y geotécnica del terreno, necesaria para el

dimensionamiento de las cimentaciones de un proyecto de construcción. El estudio geotécnico se realiza previamente al proyecto de una obra civil y tiene por objeto determinar la naturaleza y propiedades prevalecientes del terreno, fundamentales para definir el tipo y condiciones de cimentación.

Los estudios geotécnicos nos permiten definir las dimensiones y la tipología de las cimentaciones de un proyecto, de tal forma que las cargas soportadas por estructuras de contención o transmitidas por las cimentaciones y excavaciones no pongan en peligro la obra estructural, generando situaciones de inestabilidad de las propias estructuras por deficiencia de capacidad de carga del terreno. Por otra parte, un estudio geotécnico de calidad permite anticipar posibles problemas de construcción relacionados o no con el agua (profundidad del nivel freático, filtraciones, erosiones internas, entre otros), determinar el volumen de obra y la maquinaria adecuada para su ejecución, el tipo de materiales que han de ser excavados etc.

2.7. FASES DEL ESTUDIO GEOTÉCNICO

Las actividades y los objetivos de un reconocimiento geotécnico, así como su extensión y nivel de información resultante, dependen directamente del tipo de proyecto u obra a realizar, y de las características del terreno donde se sitúa, por tanto, el desarrollo de un reconocimiento geotécnico debería ser un proceso dinámico, no dimensionado rígidamente "a priori", sino, más bien, mediante una serie de aproximaciones sucesivas donde la necesidad y extensión de cada

etapa fuera consecuencia de la extensión y resultados de las realizadas previamente.

Debido a esto, es prácticamente imposible proporcionar reglas universales para el diseño y desarrollo de una campaña de reconocimiento, puesto que las condiciones del subsuelo son variables. Sin embargo, el esquema de la **Figura No. 2.12** contempla las fases que comprende un estudio geotécnico:

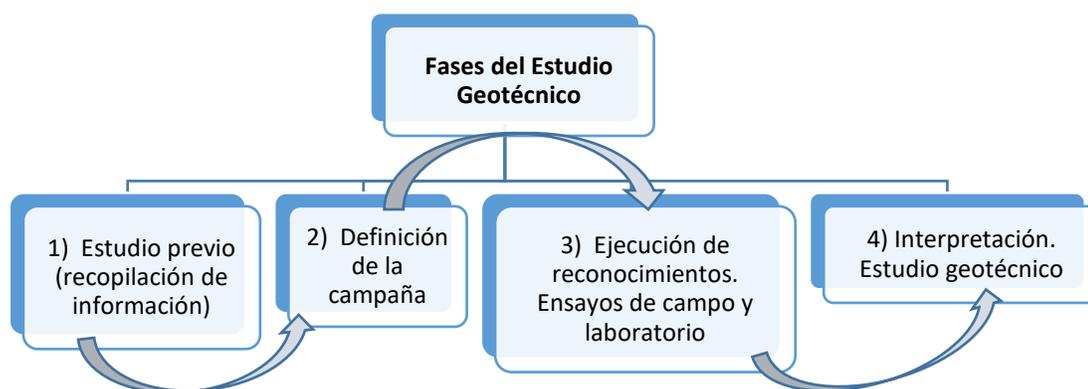


Figura No. 2.12 Esquema de las fases de un estudio geotécnico

Fuente: Mendoza, Lesly. (2016), Guion de clases: RECONOCIMIENTO DEL TERRENO Y PROPIEDADES GEOTÉCNICAS, Cimentaciones, T.E. Universidad de El Salvador, El Salvador.

2.7.1. ESTUDIO PREVIO (RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN)

Para el planteamiento y desarrollo del estudio geotécnico debe partirse de información sobre los antecedentes de la zona, estudios anteriores, problemática observada, etc. Su objeto es tener un conocimiento previo de las características de la obra a proyectar y de las condiciones del terreno donde se ubicará.

La información recopilada puede clasificarse en información general, datos básicos y documentación oficial publicada. (Ortiz, 1989). Esta se describe a detalle en la **Tabla No. 2.9** y **Tabla No. 2.10**, donde aparecen expuestos los

antecedentes e información previa; como es lógico, no siempre es necesaria la determinación de todos ellos. Para su mejor comprensión, se han agrupado en tres grandes conjuntos:

2.7.1.1. Información general

Se obtiene mediante consultas a expertos y habitantes, encuestas y visitas al terreno; el costo de su obtención es, en general, reducido. Es aconsejable procurar su conocimiento en todos los casos, ya que puede resultar muy valiosa para la correcta interpretación de los problemas existentes.

Esta información abarca aspectos muy diversos que se muestran en la **Tabla No. 2.9.**

Aspecto	Descripción	Producto
Experiencia local	Esta permite tener antecedentes de cimentación (superficial o profunda) en obras similares a la que se proyectará, sobre todo si han existido problemas, ya que esto dará un parámetro para definir de manera general, en la campaña geotécnica la profundidad a explorar. Es de igual interés, los usos previos del terreno y su historia anterior, por ejemplo, la existencia y el tipo de construcciones anteriores, rellenos o excavaciones en dicho terreno.	-Tipos comunes de cimentación -Profundidad del reconocimiento -Tipos de construcciones
Condiciones del entorno	Consiste en observar el estado de estructuras colindantes, que presenten agrietamientos o asentamientos significativos o no. Además, es importante, observar otros	-Presencia de suelos arcillosos -Arboles inclinados indican movimiento en

	aspectos del entorno como: tipo de suelos, afloramientos rocosos e inclinación de árboles.	la masa de suelo
Antecedentes geológicos	El propósito principal de los estudios geológicos es determinar la naturaleza de los depósitos subyacentes en el lugar de la investigación, ya que con este estudio se pueden determinar los tipos de suelo y roca que probablemente se encontrarán y seleccionar los mejores métodos para las exploraciones del subsuelo.	-Presencia de rocas, tipos de suelos, suelos erosionables
Datos hidrogeológicos	Niveles freáticos y pozos artesianos, sus oscilaciones, la existencia de pozos o captaciones de agua, etc.	-Presencia y profundidad del nivel freático -Pozos o captaciones cercanas a la zona.

Tabla No. 2.9 Información general que es requerida para el desarrollo del estudio geotécnico
Fuente: Autores

2.7.1.2. Datos básicos

Son necesarios para la redacción del proyecto. Se extraen de los estudios previos al proyecto. Conviene tenerlos definidos previamente, aunque no suele ser el caso más frecuente. Se pueden señalar como más importantes los que se mencionan en la **Tabla No. 2.10**.

Aspecto	Descripción	Producto
Topografía	Esta permite conocer las pendientes de la zona, y saber si será necesario realizar análisis de taludes.	-Pendientes del terreno -Conocer la regularidad del relieve.
Información de la obra	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de estructura (sistema de marcos de concreto o acero estructural, paredes estructurales, sistema mixto, 	-Conocer en qué zonas se concentran las cargas que transmitirá la

	<p>prefabricados, etc.)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ El destino de la estructura. ▪ Número de niveles y las cargas estimadas que se transmitirá. ▪ Disposición estructural en planta. ▪ Asentamientos admisibles ▪ Movimientos de tierra (excavaciones o rellenos) previstos en el terreno 	<p>estructura</p> <p>-Definir de manera tentativa la profundidad de los reconocimientos</p>
Servicios básicos	<p>-Disponibilidad de agua, electricidad que puedan afectar al desarrollo de los reconocimientos.</p> <p>-Ubicación de servicios afectados (agua, gas, luz, teléfono, alcantarillado, etc.)</p>	<p>-Conocer la distribución de las redes de servicios básicos.</p>

Tabla No. 2.10 Datos básicos que son requeridos para el desarrollo del estudio geotécnico

Fuente: Autores.

2.7.1.3. Documentación oficial publicada

Normalmente esta es fácil de obtener en los organismos encargados de su publicación y actualización. Son útiles, pero no indispensables en muchos tipos de edificación. Entre esta documentación se encuentran mapas geológicos, hidrológicos, geomorfológicos, fotografías aéreas, etc.

A partir de la información recopilada en el estudio previo se puede tener el conocimiento de los diferentes aspectos a tomar en cuenta, junto con la revisión de normativas, para la definición de la campaña geotécnica.

2.7.2. DEFINICIÓN DE LA CAMPAÑA GEOTÉCNICA

La definición de la campaña geotécnica consiste en definir en función del tipo de proyecto y de las características del terreno el número de puntos a

reconocer, profundidad a alcanzar en cada punto, distribución espacial, extensión y tipología de los reconocimientos¹¹ para lograr el fin buscado. Estos aspectos son descritos a continuación:

1) Número mínimo de reconocimientos:

Este criterio es definido en base al tipo de estructura que se proyectará, así como también, en función de la importancia de la edificación y la naturaleza del terreno. Como criterio general, se puede decir que a mayor variabilidad del subsuelo mayor número de sondeos se deben realizar.

2) Distancias máximas entre puntos de reconocimiento

La distancia entre los reconocimientos depende de la heterogeneidad del terreno y de la importancia de la obra. Por ello, aunque se pueden dar recomendaciones generales, el criterio del técnico es fundamental para definir en cada caso la campaña necesaria.

La heterogeneidad de un terreno depende fundamentalmente de su origen geológico y morfológico. A partir de estas características puede considerarse que la información obtenida en un determinado punto es válida para un área circundante.

El espaciamiento se reduce si se necesitan datos adicionales, o se aumenta si el espesor y la profundidad de los diferentes estratos son aproximadamente los

¹¹Reconocimientos: conjunto de las tareas de investigación destinadas a la obtención de muestras del subsuelo que permitan identificar suelos o rocas presentes, y a la realización de ensayos in situ sobre el terreno. (Herrera, 2012).

mismos en todos los sondeos. Este espaciamiento debe ser menor en las áreas que serán sometidas a cargas pesadas y mayor en las áreas menos críticas.

3) Profundidad de puntos de reconocimientos

Para obtener la información necesaria y poder predecir el asentamiento de una estructura, los sondeos deben penetrar todos los estratos que puedan consolidarse notablemente por efecto de las cargas. Para estructuras pesadas muy importantes, como grandes puentes y edificios muy altos, esto significa que los sondeos deben llegar hasta la roca; sin embargo, para estructura pequeñas, la profundidad se puede estimar por características geológicas, por los resultados de investigaciones previas en la misma área y teniendo en cuenta la extensión y peso de la estructura.

Según algunos autores, la profundidad de los sondeos debe ser tal que el incremento de esfuerzos en el suelo debido al peso de la estructura ($\Delta\sigma$), sea menor que el 10% del esfuerzo inicial (σ'_0) en el suelo debido a su propio peso. Lo anterior es válido en los casos en que se trate de un terreno sensiblemente homogéneo en profundidad.

En el **Capítulo IV** se estudiará a detalle esta temática, mediante la revisión de diferentes normativas que brinden lineamientos que permitan definir la cantidad, espaciamiento y profundidad de reconocimientos; esto se realizará específicamente para edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención.

2.7.3. EJECUCIÓN DE RECONOCIMIENTOS, ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO

Dentro de la ejecución de la exploración de campo existen dos etapas: investigación preliminar e investigación definitiva. En dicha investigación, se puede utilizar diferentes métodos de reconocimiento, en función de las condiciones del suelo, para posteriormente, realizar los ensayos de laboratorio requeridos. Tal como se desarrolla a continuación:

2.7.3.1. Investigación Preliminar

También conocida como exploración preliminar; su objetivo principal es conseguir información precisa referente a las condiciones reales del suelo en el sitio, detectar zonas críticas del suelo y la probable existencia de nivel freático desfavorable a la obra. Deben averiguarse la profundidad, el espesor, la extensión y la composición de cada estrato de suelo, la profundidad de la roca y la profundidad del agua subterránea.

En esta fase de la investigación es necesario, casi sin excepción, recurrir a la perforación y a la toma de muestras. Una programación cuidadosa de ella permite obtener información específica y confiable con la menor cantidad posible de recursos. La principal dificultad en esta programación radica en determinar la ubicación, el espaciamiento y la profundidad de las perforaciones.

Dependiendo de las condiciones encontradas en esta investigación preliminar, se procede o no a realizar la investigación definitiva. Esto significa que si con

las exploraciones realizadas inicialmente, se determina que el suelo es apto para cimentar sobre el mismo, y no se han encontrado zonas problemáticas que modifiquen la ubicación de los reconocimientos, entonces la investigación preliminar es suficiente y para ese proyecto en particular puede convertirse en la investigación definitiva. En caso contrario, debe realizarse una investigación a detalle, la cual se describe a continuación:

2.7.3.2. Investigación Definitiva

Esta debe realizarse cuando en la exploración preliminar se encuentre condiciones complejas del suelo que no se habían previsto en la definición de la campaña geotécnica y es de suma importancia pues los datos del suelo y de la roca son obtenidos en esta etapa y son necesarios para un proyecto definitivo. Además, cuando a las condiciones del suelo no se les ha dado la debida atención, el estimar el comportamiento del mismo basándose sólo en los datos de la exploración preliminar puede conducir a un proyecto exageradamente seguro o a correr graves riesgos por futuras dificultades.

La investigación detallada generalmente se centra en aquellos estratos que la investigación exploratoria señaló como críticos. Hay dos caminos posibles para obtener los datos necesarios.

- Hacer pruebas del suelo en el propio lugar mediante métodos de reconocimientos del suelo.

- Obtener muestras representativas de óptima calidad para las pruebas de laboratorio.

A continuación, se describen los métodos de reconocimiento del suelo y los ensayos de laboratorio a realizar a partir de las muestras obtenidas en campo.

2.7.3.3. Métodos de reconocimiento

El reconocimiento del terreno debe consistir en la suma de una serie de reconocimientos específicos, debidamente coordinados, de manera que cada pieza de información se complemente con las demás. Para este reconocimiento pueden utilizarse desde la básica inspección visual, (muy utilizada en la caracterización de macizos rocosos), hasta técnicas de campo o laboratorio más o menos sofisticadas y que se agrupan en dos conjuntos: métodos indirectos y directos.¹²

La clasificación de los métodos de reconocimiento del terreno se muestra en la

Figura No. 2.13

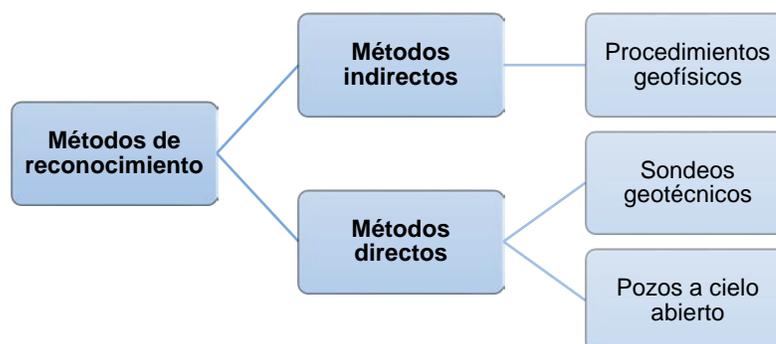


Figura No. 2.13 Métodos de reconocimiento en la campaña geotécnica

Fuente: Herrera Herbert, Juan. (2012). "UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE SONDEOS EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS". Universidad Politécnica de Madrid, España.

¹² Herrera Herbert, Juan. (2012). "UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE SONDEOS EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS". Universidad Politécnica de Madrid, España.

El reconocimiento del terreno se puede realizar utilizando uno o varios métodos, de modo que se consigan los objetivos del estudio. Los métodos geofísicos son los más representativos de los indirectos y estos suelen realizarse como estudios complementarios de algunos métodos directos, o cuando el tipo de proyecto así lo requiera. Entre estos métodos se encuentran los gravimétricos, eléctricos, de refracción sísmica, electromagnéticos, etc.

Además de los métodos geofísicos están los métodos directos, los cuales son comúnmente utilizados en el medio en estudios geotécnicos. Es por esto que se describirán en la **Tabla No. 2.11**, la cual abarca el contenido y las técnicas específicas que suelen utilizarse en los reconocimientos geotécnicos, así como su aplicación o uso en la cimentación.

Método	Técnica	Uso	Limitaciones
Pozos a cielo abierto	Las calicatas, zanjas, rozas, pozos, etc., consisten en excavaciones realizadas mediante medios mecánicos convencionales, que permiten la observación directa del terreno a cierta profundidad, así como la toma de muestras y la realización de ensayos in situ	son uno de los métodos más empleados en el reconocimiento superficial del terreno, y dado su bajo coste y rapidez de realización, constituyen un elemento habitual en cualquier tipo de investigación in situ.	Profundidad menor a 4m, la presencia de agua limita su utilidad, el terreno debe poderse excavar con medios mecánicos.
Sondeos con barreno ASTM-1452	Barrenar mecánicamente o a mano extrayendo el material a intervalos regulares cortos	Identificación de los cambios en la textura del suelo por arriba del nivel freático, localización de agua	Tritura las partículas blandas, no penetra roca

		subterránea	
Prueba de Penetración Estándar ASTM D-1586	Hacer perforación, tomar muestras a intervalos con muestreador partido, hincando 50cm a intervalos de 20, 15 y 15 cm con una masa de 64 kg cayendo 76cm, hasta alcanzar la profundidad deseada o el rechazo.	Identificación de textura y estructura, apreciación de compacidad o consistencia en suelo o roca blanda.	Grava, vetas duras.
Sondeo Estático	Introducir en el suelo, forzándolo a una velocidad constante, un cono agrandado (cono holandés) colocado en el extremo de una barra; medir la resistencia a intervalos regulares.	Identificación de cambios significativos en compacidad o consistencia. Posible identificación del suelo por la relación entre la carga en la punta y la fricción lateral.	No penetra estratos duros, falsa información en grava.
Sondeo Dinámico	Hincar una barra con una punta agrandada, desechable, en el extremo, con un peso cayendo una altura fija, en incrementos de 15 a 30cm	Identificación de cambios significativos en la compacidad o consistencia de los materiales.	Información falsa en grava.
Muestreo continuo (suelo)	Forzar y/o rotar un tubo dentro del suelo hasta que la resistencia impida avanzar. Sacar detritos con aire o con agua.	Identificar textura en suelos coherentes, sin interrupción.	Gravas, vetas duras, falsa compresión en algunas arcillas

Tabla No. 2.11 Métodos de reconocimiento directos (sondeos y pozos a cielo abierto)

Fuente: Mendoza, Lesly. (2016). Guion de clases Capítulo III: ESTUDIO GEOTÉCNICO, Cimentaciones, T.E. Universidad de El Salvador, El Salvador.

2.7.3.4. Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

El ensayo de penetración estándar (ASTM D 1586¹³), es uno de los métodos de exploración del subsuelo más antiguos, y probablemente es el de mayor aplicación en a nivel mundial en el campo de la ingeniería geotécnica.

En resumen el ensayo de penetración estándar consiste en hincar en el subsuelo un muestreador estándar una longitud de 1.5 pies (18 pulgadas), impulsado por el impacto que le produce una masa de 140 Libras (63.50 kg), que es dejada caer desde una altura de 30 pulgadas (76.2 cm); la longitud de 50 centímetros se subdivide en tres tramos, llamados “incrementos”, el primer incremento (20 cm) refleja las alteraciones inducidas por un ensayo previo y/o la remoción e inserción del barrenaje, la longitud restante de 30 centímetros, conformada por los otros dos incrementos (de 15 cm cada uno), se utiliza para obtener la resistencia a la penetración del suelo N_{campo} , la cual corresponde a la suma de la cantidad de golpes aplicados para que el muestreador penetre dichos incrementos (Ver **Figura No 2.14**).

¹³ American Society for Testing and Materials, ASTM D 1586: Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT)

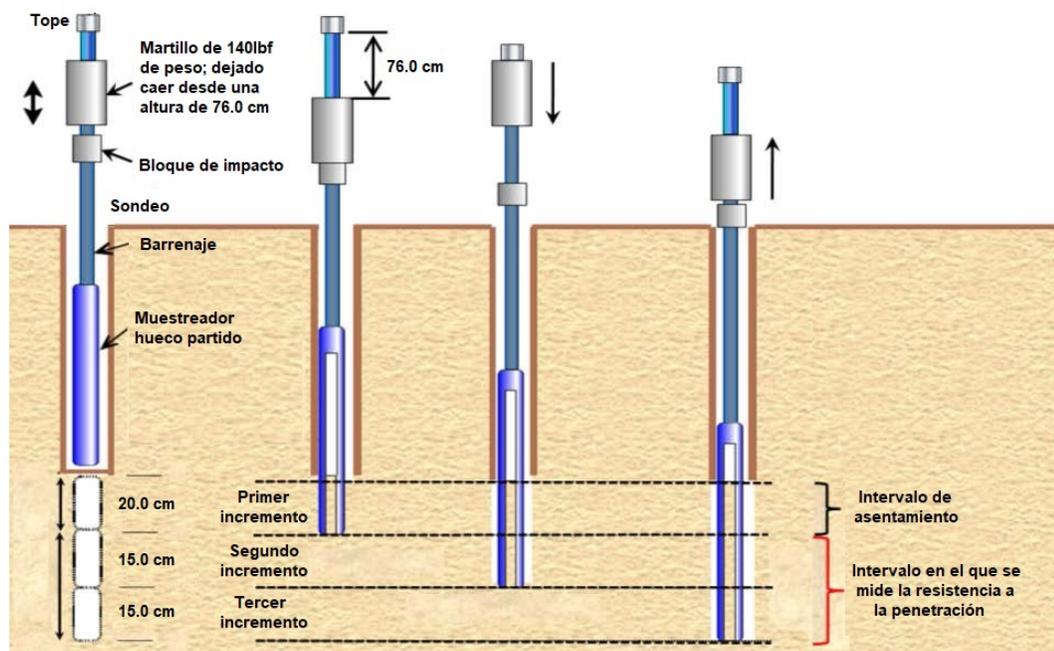


Figura No. 2.14 Secuencia de hincado del muestreador estándar y algunos elementos que intervienen en el ensayo SPT.

Fuente: Unidad de Investigación y Desarrollo Vial, Viceministerio de Obras Públicas (2012). PRÁCTICAS QUE INCIDEN EN LA CALIDAD DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO SPT. El Salvador.

Si el número de golpes necesarios para profundizar en cualquiera de estos intervalos de 15 cm es superior a 50, el resultado del ensayo deja de ser la suma indicada anteriormente para convertirse en rechazo (R).

Correcciones del valor de N de campo del SPT

✓ Factores de corrección por condiciones de campo

Es importante destacar que varios factores contribuyen a la variación del número de penetración estándar N a una profundidad dada, debido a ello es necesario aplicar algunas correcciones.

Entre estos factores se encuentran la eficiencia del martinete SPT, el diámetro de la perforación, el método de muestreo y la longitud de la barra (Skempton, 1986; Seed y colaboradores, 1985). Así pues, la corrección por los procedimientos de campo y con base en las observaciones parece razonable para estandarizar el número de penetración estándar como una función de la energía de entrada de hincado y su disipación alrededor del muestreador hacia el suelo circundante

✓ **Corrección por sobrecarga para suelos granulares**

En suelos granulares, el valor de N se afecta por la presión de sobrecarga efectiva, σ'_0 . Por esa razón, el valor de N_{60} obtenido en la exploración de campo ante presiones de sobrecarga efectiva diferentes se debe cambiar para que corresponda a un valor estándar de σ'_0 . Es decir,

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60}$$

Donde

$(N_1)_{60}$ = Valor de N_{60} corregido a un valor estándar de σ'_0 [100 kN/m² (200 lb/pie²)]

C_N = Factor de corrección

N_{60} = Valor de N obtenido de la exploración de campo

En el pasado se propuso una variedad de relaciones empíricas para C_N , algunas de estas se muestran en la **Tabla No. 2.12**. En las relaciones siguientes para C_N , observe que σ'_0 es la presión de sobrecarga efectiva y P_a = presión atmosférica (100 kN/m²).

Referencia	Factor de corrección c_n	
Liao y Whitman (1986)	$C_N = \left[\frac{1}{\left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)} \right]^{0.5}$	
Skempton (1986)	$C_N = \frac{2}{1 + \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)}$	para arena fina normalmente consolidada
	$C_N = \frac{1.7}{2 + \left(\frac{\sigma'_0}{P} \right)}$	para arena gruesa normalmente consolidada
	$C_N = \frac{1.7}{0.7 + \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)}$	para arena sobre consolidada
Seed y Colaboradores (1975)	$C_N = 1 - 1.25 \log \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)$	
Peck y colaboradores (1974)	$C_N = 0.77 \log \left[\frac{20}{\left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)} \right] \left(\text{para } \frac{\sigma'_0}{P_a} \geq 0.25 \text{ y } \frac{\sigma'_0}{P_a} \leq 1.0 \right)$	
Bazaraa (1967)	$C_N = \frac{4}{1 + 4 \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)} \left(\text{para } \frac{\sigma'_0}{P_a} \leq 0.75 \right)$	
	$C_N = \frac{4}{3.25 + \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)} \left(\text{para } \frac{\sigma'_0}{P_a} > 0.75 \right)$	

Tabla No. 2.12 Relaciones para el cálculo del factor de corrección por sobrecarga C_N
Fuente: Braja M. Das (2012). FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES, séptima edición.
Editorial Cengage Learning, México.

A continuación, se describen los diferentes tipos de pruebas que se realizan al suelo para determinar las propiedades existentes del mismo, según la finalidad del estudio, por medio de ensayos de laboratorio:

2.7.3.5. Ensayos de laboratorio

El hacer ensayos en el laboratorio se tiene la ventaja de que el medio ambiente, incluyendo los esfuerzos, se puede variar a voluntad, para analizar los cambios

producidos en las construcciones futuras. A pesar de que las pruebas de laboratorio permiten medir casi todas las propiedades del suelo necesarias, los resultados dependen de la calidad de las muestras del suelo, que puedan estar afectadas por las alteraciones que sufre durante la toma de muestras y que tanto éstas representan la totalidad del estrato. Con las muestras procedentes de la prospección geotécnica se realizan los ensayos de laboratorio, los cuales, según la finalidad del estudio, pueden ser de los tipos siguiente como lo muestra la **Tabla No. 2.13**

Propiedad	Ensayo
a) Estado y clasificación	
Humedad natural	Contenido de humedad
Pesos específicos	Peso específico de las partículas Peso específico aparente Peso específico aparente del suelo seco
Granulometría	Análisis granulométrico por tamizado o sedimentación
Plasticidad	Límites de Atterberg (Límite líquido, límite plástico y límite de retracción)
b) Resistencia	
Resistencia al corte	Compresión simple Corte directo Corte triaxial Molinete o veleta
c) Cambio de volumen	

Deformabilidad	Ensayo edométrico
Expansividad	Presión de hinchamiento nulo Hinchamiento libre Ensayo Lambe
d) Varios	
Componentes secundarios	Contenido en sulfatos Contenido en materia orgánica
Permeabilidad	Permeámetro de carga constante Permeámetro de carga variable
Análisis del agua freática	pH, sales solubles y elementos contaminantes

Tabla No. 2.13 Ensayos de laboratorio, adecuados para determinar las propiedades más usuales del suelo

Fuente: Rodríguez et al. (1989). CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES, cuarta edición. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid 1989.

Las pruebas in situ evalúan el comportamiento del suelo en el medio ambiente natural que lo rodea. En ellas se pueden integrar los efectos de muchas variables que son difíciles o imposibles de reproducir en el laboratorio y además las perturbaciones están limitadas a las producidas por la ejecución del ensayo. Para la mayoría de los proyectos las pruebas de laboratorio con muestras inalteradas son suficientes; en el caso en que las condiciones del suelo sean muy complejas, es indispensable hacer pruebas de ambos tipos. Las mediciones in situ pueden comprobar el trabajo de laboratorio y ampliar la variedad de condiciones que son posibles en el terreno.

2.7.4. INTERPRETACIÓN DEL ESTUDIO GEOTÉCNICO

Finalmente, el estudio concluye con la redacción del informe geotécnico. En este documento se plasman los resultados de la campaña geotécnica realizada, su interpretación y las conclusiones que se derivan de su análisis, generalmente se presentan en forma de recomendaciones para el proyecto y/o construcción de la obra que ha sido objeto de estudio. Estas indicaciones que deben incluirse en el estudio geotécnico deberán ser correspondientes a recomendaciones relativas al tipo de cimentación a proyectar, la profundidad de desplante y la capacidad de carga a dicha profundidad. Además, debe recomendarse los trabajos previos a realizar para preparar el terreno, la profundidad del nivel freático y las obras de protección necesarias de acuerdo con las condiciones particulares de dicho terreno.

CAPÍTULO III
ELABORACIÓN DE MAPA DE
CARACTERÍSTICAS
GEOTÉCNICAS

3.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo consta de dos partes importantes: la metodología de la investigación y su desarrollo. En la primera, se realizará una guía que permita determinar el procedimiento para la elaboración del mapa de características geotécnicas; y en la segunda parte, se describirá el desarrollo de cada una de las actividades.

Dentro de las actividades propuestas en la metodología se encuentran: la descripción del área de estudio, recolección de información, elaboración de la base de datos y el análisis de la información que esta contiene, revisión del contenido de la base de datos, selección de la información que contendrá el mapa, el procedimiento de la elaboración del mapa mediante el software ArcGIS y su representación.

En el desarrollo de la metodología, se ha tomado en cuenta cada una de las actividades antes mencionadas, de manera que la adecuada realización de las mismas, permitan cumplir con uno de los objetivos principales de este trabajo: la elaboración de mapa de características geotécnicas de los municipios de Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla.

3.2. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

Objetivo

Definir una guía metodológica que permita desarrollar de manera ordenada las actividades necesarias para la elaboración del mapa de características geotécnicas de los municipios de Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla.

Descripción del área en estudio

Se realizará una recopilación de información sobre el área en estudio, detallando características relevantes como: área, ubicación geográfica, población, desarrollo económico, urbanístico, entre otros, que permita comprender lo relevante de la realización de un mapa en la zona.

Se representará gráficamente a partir de mapas, la ubicación de la zona en estudio dentro del territorio de El Salvador, con el objetivo de mostrar la magnitud del alcance espacial del trabajo.

Recolección de información para la elaboración del mapa

La obtención de la información requerida para cumplir con los objetivos de esta investigación podría ser a través de:

- **Recolección y selección de estudios de suelos**

Consiste en la recopilación de estudios de suelos realizados por empresas privadas y del estado, pertenecientes al área definida como objeto de

estudio, requeridos en diferentes entidades públicas que puedan proporcionar la información necesaria, seleccionando los estudios de suelos que contengan la información requerida para la elaboración del mapa.

- **Información complementaria**

En esta parte de la investigación se pretende obtener información complementaria sobre el área de estudio que pueda servir como insumo para la elaboración del mapa o para la interpretación del mismo, ya sea información de la topografía, geomorfología, planimetría, ubicación, entre otros.

Elaboración de la base de datos

A partir de la información que se espera obtener de los estudios de suelos se elaborará una base de datos, mediante el uso de Microsoft Excel, cuyo fin es facilitar la organización e interpretación de la información.

La base de datos es un elemento fundamental en el proceso de la investigación, ya que permite el almacenamiento y registro de la información de forma ordenada, y es requerida para la generación del mapa de características geotécnicas.

Análisis de la información contenida en la base de datos

A partir de la base de datos elaborada, se hará una revisión de la información contenida, con el fin de uniformizar criterios. Esto, por el hecho que los estudios

son realizados por diferentes empresas y cada una de ellas tiene una forma de presentar los resultados.

Algunos de los criterios a evaluar podrían ser:

- Analizar que las clasificaciones de suelo estén de acuerdo al SUCS.
- Evaluar si en los estudios de suelo se ha corregido el valor de N_{campo} ; de lo contrario, se procederá a realizar las correcciones necesarias.
- Se estudiará la relación de N con algunas propiedades geotécnicas que presenten los diferentes estudios de suelo, y se buscará uniformizarlas.
- Se analizará la factibilidad de aplicar correlaciones entre el N del SPT con propiedades geotécnicas.

Revisión de registros de la base de datos

Para la detección de errores cometidos durante el procesamiento de la información, se puede hacer uso de algún software que permita dar a conocer estos errores y de esta manera, corregir la base de datos. Este proceso es posible realizarlo con ayuda del software gINT Logs.

Selección de la información que contendrá el mapa y su representación

A partir de la información registrada en la base de datos, se seleccionará la que se considere necesaria y que contribuya para la elaboración del mapa, pudiendo ser inicialmente la siguiente: N de campo, contenido natural de humedad y clasificación de suelos a las diferentes profundidades, para luego

generar mapas preliminares con el objetivo de interpretar dicha información, así como también, analizar su comportamiento y realizar posibles ajustes si es requerido, y determinar la profundidad o profundidades a la que posiblemente se realizará el mapa, a partir de los resultados generados y de la representatividad de la información con la que se cuenta.

Elaboración del mapa mediante la aplicación del software ArcGIS.

Se describirá el proceso aplicado para la elaboración del mapa, desde la importación de la base de datos hasta la realización de posibles interpolaciones con los diferentes parámetros geotécnicos, que permitirán generar capas que pasarán a formar el mapa de características geotécnicas.

En este apartado, se describirán, los ajustes realizados a la información que contendrá el mapa, en función de los requerimientos exigidos por los métodos de interpolación del software.

Representación de mapa

Se realizará el diseño final del mapa con la representación de sus elementos tales como: la escala, leyenda, orientación, título y otros elementos que se consideren necesarios para la adecuada interpretación del mismo.

3.3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

3.3.1. OBJETIVO DEL ESTUDIO

Elaborar un mapa de características geotécnicas de los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla, a partir de información obtenida de estudios geotécnicos de la zona en estudio.

3.3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio está formada por los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla, ambos pertenecientes al departamento de la Libertad y que forman parte del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Se eligieron debido a que ambos municipios han mostrado gran crecimiento y desarrollo urbanístico en las últimas décadas, y se cuenta con información de estudios de suelos del área, lo cual es de vital importancia para el desarrollo de esta investigación. En la **Figura No. 3.1** se muestra la ubicación del área de estudio.

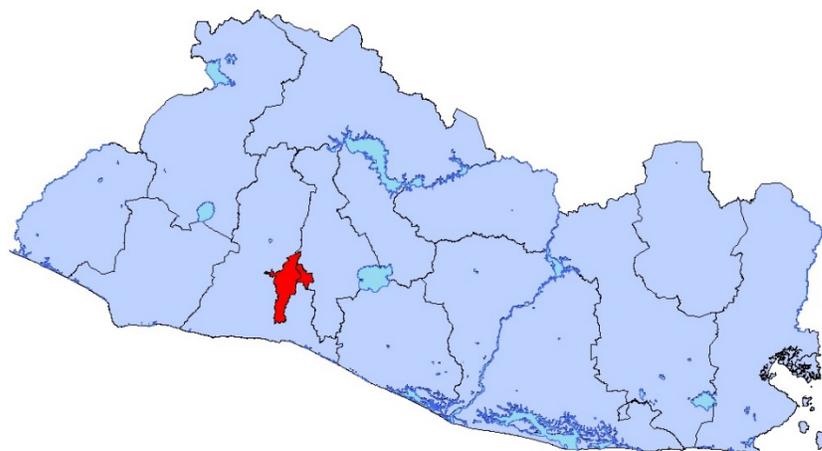


Figura No. 3.1 Ubicación del área de estudio.

Fuente: Autores.

En la **Figura No. 3.2** se muestra el área de estudio formada por los municipios de Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla representados por sus respectivos escudos.

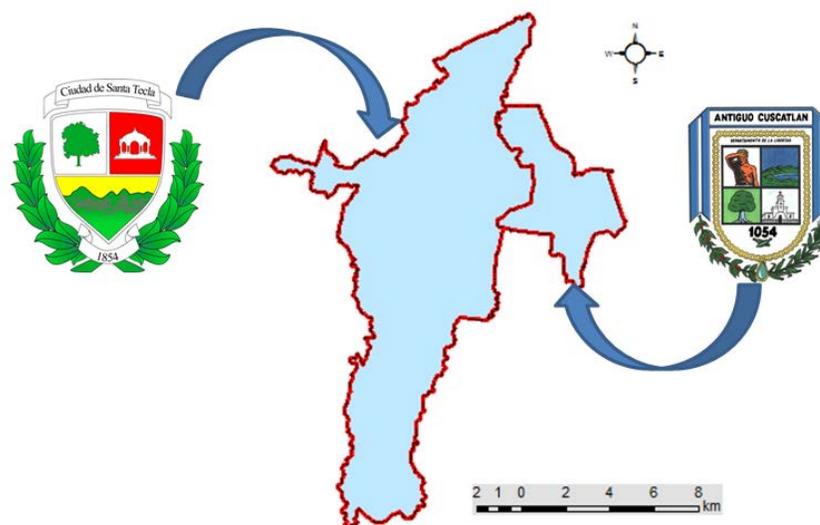


Figura No. 3.2 Área de estudio formada por Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla
Fuente: Oficina del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS)

En los siguientes apartados se describirá en forma breve información relevante sobre cada municipio.

3.3.2.1. Santa Tecla

La ciudad de Santa Tecla es la cabecera del departamento de La Libertad, pertenece al Área Metropolitana de San Salvador. Tiene una extensión territorial de 115.32 km² y una población estimada de 121,908 habitantes (según DIGESTYC para el año 2007).¹⁴

¹⁴ DIGESTYC: Dirección General de Estadística y Censos.

El municipio de Santa Tecla limita al norte con los municipios de Colón, San Juan Opico, Quezaltepeque y Nejapa; al Este por San Salvador, Antiguo Cuscatlán, Nuevo Cuscatlán, San José Villanueva y Zaragoza; al Sur por La Libertad y al Oeste, por Talnique y Comasagua.

La ciudad de Santa Tecla está ubicada en la planicie volcánica y fluvial poco inclinada del estratovolcán San Salvador. Esta planicie forma una división entre el Río Acelhuate y el Río Sucio, ya que este territorio forma una división hidrológica, aún no está erosionada o denudada. Algunas de las capas importantes de la planicie son los flujos lávicos, los cuales ahora han sido sepultados con tierra blanca.

En cuanto a la zona, cabe destacar que las laderas de las Colinas que forman el margen de la depresión salvadoreña, cerca de Santa Tecla tienen una diferencia de altura de 200 metros, siendo muy inclinadas. Las condiciones geológicas que presentan las rocas son de meteorización, y la alta inclinación provoca movimientos de ladera y erosión intensa; en el año 2001 un terremoto provocó en Santa Tecla una avalancha rocosa catastrófica¹⁵.

3.3.2.2. Antiguo Cuscatlán

Es un municipio perteneciente al departamento de La Libertad y que forma parte del Área Metropolitana de San Salvador. Tiene una población de 33,698

¹⁵ Fuente: OPAMS. (2006). Documento: "Elaboración de Cartografía Geomorfológica del Área Metropolitana de San Salvador".

habitantes (según DIGESTYC para el año 2007) y una extensión territorial de 19.24 km².

Antiguo Cuscatlán está ubicado al sureste del departamento de la Libertad, haciendo frontera entre este y el departamento de San Salvador. Colinda al sur con Nuevo Cuscatlán, Huizúcar y San Marcos, al este y norte con San Salvador y al oeste con Santa Tecla.

En cuanto a la administración, el Municipio se divide en cuatro distritos: Distrito Ceiba de Guadalupe, Distrito Plan de la Laguna, Distrito Merliot, Distrito la Reforma. Dentro del Municipio conformado por los cuatro distritos mencionados anteriormente, se ubican además tres zonas industriales: Zona Industrial Merliot, Zona Industrial Santa Elena, Zona Industrial Plan de la Laguna. Existen también aproximadamente 105 colonias, 8 comunidades y 1 caserío.

A continuación, se describirá el proceso que se ha seguido para la elaboración del mapa de características geotécnicas. Este proceso se esquematiza en la **Figura No. 3.3.**



Figura No. 3.3 Esquema de proceso de la elaboración de mapa de características geotécnicas
Fuente: autores

3.3.3. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA

Esta etapa es de suma importancia para el desarrollo del trabajo, ya que de esta depende en gran parte, que los resultados sean los esperados. Es por esto que se requirió realizar la recolección de información confiable, la cual para este caso se ha realizado en dos partes: una referente a la recolección de estudios de suelos (información geotécnica) y otra de información complementaria.

3.3.3.1. Recolección y selección de estudios de suelos

Para la realización de este trabajo se necesitó primeramente tener acceso a información referente a las condiciones del subsuelo del área de estudio, en este caso, los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla. Para ello, se

solicitó el apoyo de la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), la que proporcionó información sobre estudios de suelos, del área, que se encuentran comprendidos dentro del periodo 2000 al 2010.

El número de estudios disponibles fue de 543, los que se encontraban en forma física, por lo se procedió a su escaneo, guardándolos de forma digital en formato PDF para posteriormente extraer la información requerida y formar con ella una base de datos.

3.3.3.2. Información complementaria

Para la elaboración del mapa de características geotécnicas, es necesario contar, además de la información geotécnica, con algunas herramientas y recursos SIG, que permitan entre otras cosas, localizar la ubicación de los estudios de suelo. Entre estas herramientas, se tienen los archivos en formato “shapefile”, correspondientes a la planimetría, ejes viales de la zona en estudio y los puntos de ubicación de los estudios de suelo. (Ver **Figura No. 3.4**).

Se cuenta, además, con las curvas de nivel a cada 10 metros que se utilizaron para asignar la elevación de cada punto o sondeo al momento de ubicarlos geográficamente. Por otra parte, se consiguió acceso a un mapa de sombras, el cual será utilizado para la representación y análisis del mapa de características geotécnicas.

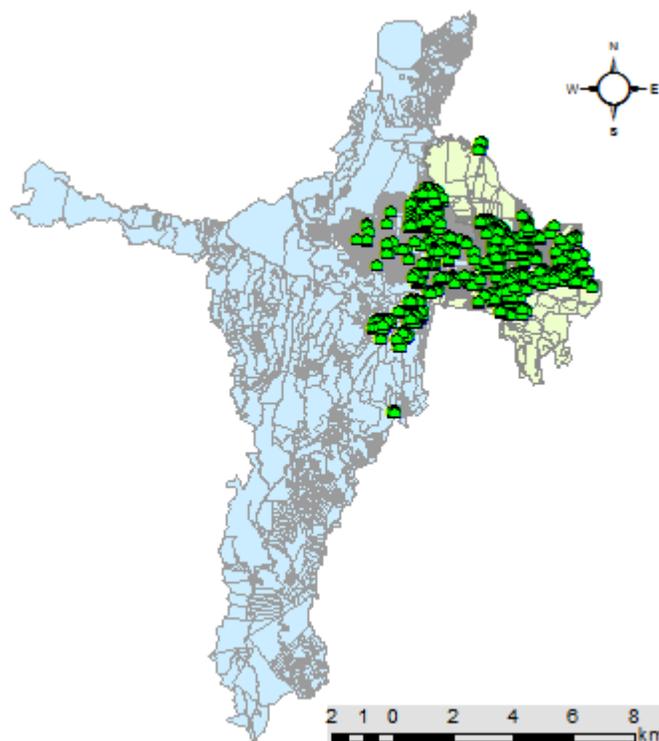


Figura No. 3.4 Planimetría, ejes viales de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla y puntos de localización de estudios de suelos.

Fuente: Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS)

En la **Figura No. 3.4** puede observarse la ubicación de los puntos, los cuales cubren gran parte del municipio de Antigua Cuscatlán; mientras que para el caso de Santa Tecla se concentra más en la zona urbana. Para garantizar la confiabilidad de los resultados, el mapa se realizará en la zona donde se encuentran concentrados los puntos de estudio, es decir, que cubrirá solo la región de la que se tenga suficiente información.

3.3.4. ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS

El propósito de la base de datos es mostrar de forma ordenada, la información que proporcionan los estudios geotécnicos, por lo tanto para su elaboración, fue

necesario la identificación de los parámetros que aporten datos representativos y contribuyan a la elaboración del mapa, como son: La época (seca o lluviosa) en la que se realizó el estudio, ubicación de los sondeos referenciados en coordenadas Lambert, profundidad, número de golpes (N) de SPT, contenido natural de humedad, clasificación y descripción de los suelos. Estos parámetros se representaron en una tabla de Microsoft Excel a través de campos (columnas), para luego digitalizar dichos estudios en forma de registros o filas. En la **Figura No. 3.5** se muestra estos parámetros (Ver **Anexo A**, donde se presenta una ejemplificación de la base de datos con una mejor visualización) así como la información contenida en cada uno de ellos, y que son descritos a continuación:

Generalidades: la base de datos contiene en primer lugar, un espacio de información general de cada uno de los estudios, en donde se registra: la empresa que realizó el estudio de suelos, el municipio donde fue realizado, así como la obra que se proyecta construir.

Época: define el periodo en el que se realizó el estudio, este puede ser época lluviosa (mayo-octubre) o seca (noviembre-abril), la que es de suma importancia ya que está estrechamente relacionada con los cambios de humedad que puede presentar el suelo según el tiempo en que fue realizado.

ÉPOCA	X	Y	Z	Sondeo No.	H	N20	N15	N15	NCAMPO	N	HUMEDAD	ESTRATIGRAFÍA	DESCRIPCIÓN
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	0.50	2	1	1	2	2	22.00	SP	Arena mal graduada, gris oscuro, parcial saturada
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	1.00	2	10	11	21	21	17.00	SP	Arena mal graduada, gris oscuro, parcial saturada
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	1.50	9	5	5	10	10	27.00	SM	Arena limosa, café oscuro, parcial saturada
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	2.00	6	5	5	10	10	23.00	SM	Arena limosa, café oscuro, parcial saturada
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	2.50	10	7	9	16	16	30.00	ML	Limo arenoso, café oscuro, de media plasticidad, parcial saturado
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	3.00	18	12	13	25	25	33.00	ML	Limo arenoso, café oscuro, de media plasticidad, parcial saturado
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	3.50	11	8	8	16	16	38.00	ML	Limo arenoso, café oscuro, de media plasticidad, parcial saturado
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	4.00	9	6	9	15	15	35.00	ML	Limo arenoso, café oscuro, de media plasticidad, parcial saturado
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	4.50	12	12	14	26	26	31.00	SP	Arena pomítica café claro, saturada
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	5.00	19	16	19	35	35	40.00	MH	Limo arenoso café oscuro, de alta plasticidad, parcial saturado
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	5.50	50	26	24	50	50	47.00	MH	Limo arenoso café oscuro, de alta plasticidad, parcial saturado
Lluviosa	472424.1161	281997.7802	926.50	S1	6.00	50	>50		R	50	0.00	RPC	Rechazo a la penetración con punta cónica. Posible roca intemperizada

Figura No. 3.5 Ejemplo de la forma de cómo se ordenó la base de datos con información básica que proporcionan los Estudios Geotécnicos

Fuente: autores

Profundidad: los parámetros contenidos en la base de datos se presentan a cada 0.5 m y la profundidad máxima de los ensayos varía según las condiciones particulares del suelo, encontradas para cada sondeo.

Las coordenadas (en metros): definen la ubicación donde fue realizado el sondeo. Para ello se usa el sistema de El Salvador Conformal Conic (Lambert Conformal Conic).

N_{campo}: es la resistencia a la penetración del suelo, esta corresponde a la suma de la cantidad de golpes aplicados para que el muestreador penetre 30 cm en dos incrementos de 15 centímetros.

Contenido de Humedad Natural: representa los valores de la humedad para cada uno de los sondeos realizados, es determinado a cada una de las muestras, las cuales son extraídas a cada 0.5 m de profundidad.

Estratigrafía: los laboratorios de suelo cuentan con una amplia gama de clasificaciones, las cuales las adoptan en función de las condiciones particulares del suelo encontradas, con la digitalización de la base se presentaron 57 clasificaciones en total, sin embargo, estas requieren que sean uniformizadas según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos como se detalla en el **apartado 3.2.6**.

Descripción: resume las condiciones del subsuelo detectadas a intervalos de 0.5 m para cada una de las perforaciones realizadas a una determinada profundidad. En esta se define la presencia de materia orgánica, el porcentaje

de grava y porcentaje de arena, así como el límite líquido, índice de plasticidad, coeficiente de uniformidad (Cu) y coeficiente de curvatura (Cc), cabe mencionar que estas descripciones varían en función del laboratorio de suelo que realiza el ensayo.

3.3.5. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN LA BASE DE DATOS

Luego de haber realizado la digitalización de los estudios geotécnicos en la base de datos, se revisó la información y se tomaron los siguientes criterios:

3.3.5.1. Estandarización de clasificaciones de suelo

En cuanto a las clasificaciones de suelo, se elaboró una lista de todas las presentadas en los estudios para analizarlas y determinar si estas corresponden al SUCS. Al realizar esto, se observó que muchas de estas no cumplían con lo que especifica este sistema, por lo que se vio la necesidad de estandarizarlas a partir de clasificaciones que se adapten de manera más adecuada al SUCS.

Los casos que se consideraron fueron los siguientes:

- Las simbologías que incluyen gravas, por ejemplo: OL+G, para este tipo de clasificaciones, se decidió excluir la notación “G” y en este caso en particular reportar solamente como OL, ya que en la hoja de registros se reporta el contenido de gravas.

- Para las clasificaciones reportadas por los laboratorios de suelo, con una triple notación y con contenido de ripio, estas fueron clasificadas como “ripio”.
- Otro de los criterios empleados es por ejemplo: cuando se tenía la clasificación SM-ML (al igual que esta se presentaron otros casos: SC-ML, SC-CH, SW-ML, etc.), se decidió establecer el suelo que posiblemente podría predominar a esa profundidad, esto se realizó, apoyándose de la descripción presentada en la hoja de registros de cada estrato (Ver **Figura No. 3.7**) y de los perfiles de suelo generados por los estudios geotécnicos, como se muestra en la **Figura No. 3.6**; para ello, se hizo una evaluación del estrato superior e inferior a la clasificación SM-ML (para este caso en particular) y en función de este análisis se estableció si el suelo predominante para este estrato era posiblemente una Arena limosa (SM) o un Limo arenoso (LM).

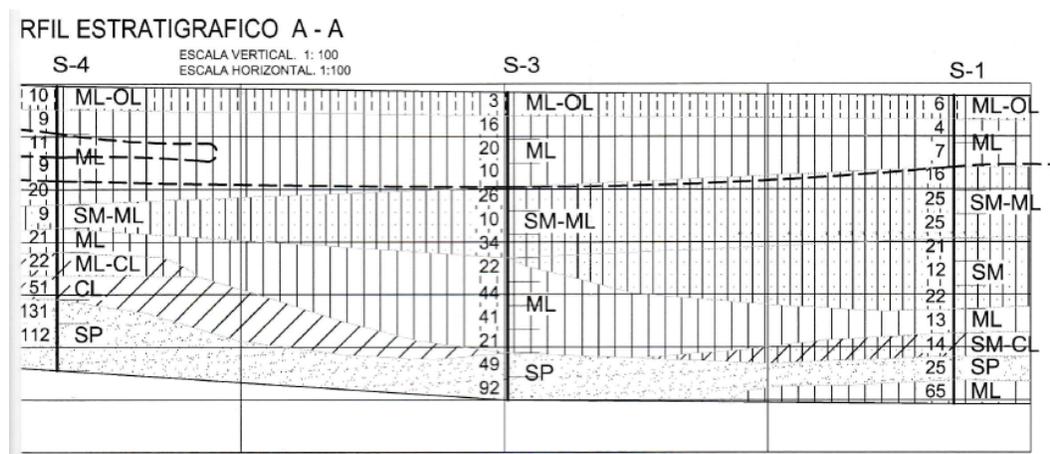


Figura No. 3.6 Perfil estratigráfico del suelo

Fuente: Estudio de suelos

Sondeo No.	H	ESTRATIGRAFÍA	TRATIGRAFÍA PROI	DESCRIPCIÓN
S1	1.50	ML	ML	Limo arenoso, café claro, arenas finas a medias, grumos con humedad fuera de lo normal, 40% de arena (ML)
S1	2.00	SM-ML	ML	Arena limosa, café claro, arenas gruesas a finas, grumos con humedad fuera de lo normal, 50% de arena (SM-ML)
S1	2.50	SM-ML	ML	Arena limosa, café claro, arenas gruesas a finas, semisaturados, 50% de arena (SM-ML)
S1	3.00	SM-ML	ML	Arena limososa, café claro, arenas gruesas a finas, semisaturados, 50% de arena (SM-ML)
S1	3.50	SM	SM	Arena limosa, café claro, arenas gruesas a finas, pómez tamaño máximo ¾", 60% de arena (SM)
S1	4.00	SM-ML	SM	Arena limosa, café claro, arenas gruesas a finas, pómez tamaño máximo ¾", semisaturados, 50% de arena (SM-ML)
S1	4.50	SM	SM	Arena limosa, café claro, arenas gruesas a finas, pómez tamaño máximo ¾", semisaturados, 60% de arena (SM)
S1	5.00	ML	ML	Limo arenoso, café claro, arenas finas a medias, semisaturados, 40% de arena (ML)
S1	5.50	SM-CL	SM	Arena limosa, gris café oscuro, arenas gruesas a finas, finos plásticos, grumos tamaño máximo ¾", 60% de arena (SM-CL)
S1	6.00	SP	SP	Arena malgraduada, gris café oscuro, arenas gruesas a finas, gravas tamaño máximo ¾", 95% de arena (SP)
S1	6.50	ML	ML	Limo arenoso, café claro, arenas finas a medias, 20% de arena

Figura No. 3.7 Hoja de registros

Fuente: Estudio de suelos

Cabe mencionar, además, que existen algunos estratos en los cuales hay presencia de material orgánico, sin existir en tales hojas de registro, una determinación cuantitativa de su contenido y al analizarlos, se observó que la mayoría de empresas hacen referencia a este tipo de material incluyéndolo en el símbolo de la clasificación, por tanto, se ha considerado mantenerlos de esta manera en el proceso de estandarización de las mismas.

En la **Tabla No. 3.1** se hace un listado de los símbolos de clasificación junto con las tramas y colores que se han adoptado en la base de datos.

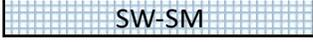
GW 	SM 	ML 
GC 	SW 	OL 
GP 	SC 	CH 
GM 	SP 	OH 
SM-OL 	SP-SM 	MH 
SW-SM 	ML-CL 	CL 
SC-OL 	ML-OL 	RIPIO 

Tabla No. 3.1 Clasificaciones adoptadas en el proceso de estandarización de clasificaciones de la base de datos.

Fuente: autores

Además de los símbolos expresados en la **Tabla No. 3.1**, existen otros que no son precisamente clasificaciones de suelo, pero que brindan información sobre las condiciones del suelo que se encuentran al realizar un ensayo SPT. Esto se refiere a la Penetración con Punta Cónica (PPC) y al Rechazo a la Penetración con Punta Cónica (RPC), lo cual corresponde a estratos que son muy resistentes. Por tanto, se ha considerado mantenerlos como tal en la base.

3.3.5.2. Corrección de N de campo

Como se explicó previamente en el capítulo II, se hace necesario la corrección del N_{campo} debido a las variaciones que establece el método de ensayo ASTM

D1586-11 “Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils”¹⁶. Sin embargo, al analizar la información, se determinó que muy pocas empresas dedicadas a la realización de estudios de suelos corrigen estos valores. Por tanto, se ha procedido a aplicar los factores de corrección por las condiciones en que se realiza el ensayo; estos factores se expresan mediante la siguiente ecuación:

$$N_{60} = \frac{N\eta_H\eta_B\eta_S\eta_R}{60}$$

Dónde:

N_{60} = número de penetración estándar, corregido por las condiciones en el campo.

N = número de penetración medido o de campo

η_H =eficiencia del martillo (%)

η_B =corrección por el diámetro de la perforación

η_S =corrección por el muestreador

η_R =corrección por longitud de la barra.

Para uniformizar el nivel de eficiencia con la cual se determina el N_{campo} , la ingeniería geotécnica ha definido que los valores de resistencia a la penetración que se obtienen a partir del SPT, deben corresponder al 60% de la ETM y este valor es llamado “ N_{60} ” y es por esto en la fórmula anterior se aplica en el denominador, el factor de 60.

¹⁶ ASTM D1586-11 Sección 9: “Variaciones en valores N_{campo} de 100% o más han sido observadas al emplear diferentes aparatos y perforadores para el ensayo de penetración en perforaciones adyacentes en la misma formación de suelo”

Además de los factores anteriores, la norma ASTM D6066-96¹⁷ establece que el valor N_{campo} debe ser normalizado a su correspondiente $(N_1)_{60}$, para efectos de análisis del potencial de licuefacción de los suelos, así como para evaluar otro tipo de propiedades geotécnicas, específicamente para suelos granulares, excluyendo los suelos cohesivos debido a lo errático que es predecir el comportamiento geotécnico de los suelos de grano fino.

Para tomar en consideración este efecto, esta norma sugiere que el valor N_{60} debe ser ajustado por un factor de corrección por confinamiento (C_N) de la siguiente manera:

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60}$$

Es importante recalcar que esta corrección es válida únicamente para suelos con características granulares, específicamente para arenas o estratos que tengan una cantidad considerable de la misma. Es por esto que se ha considerado aplicar esta corrección para limos arenosos de baja plasticidad (ML), ya que en el AMSS predominan estos con características similares a una arena fina.

En la **Tabla No. 3.2** se presentan los valores correspondientes a los factores previamente descritos, en función de las condiciones generales del ensayo SPT

¹⁷ American Society for Testing and Materials, ASTM D6066-96 "Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential".

aplicables en el país, tomando en cuenta las recomendaciones de Seed et. al. (1985), Skempton (1986)¹⁸ y Peck et. al. (1974).

Factor	Criterio aplicado	Valor del factor	
Eficiencia energética del martillo (η_H)	Depende principalmente del tipo de martillo que se utilice; el más utilizado en el país es el martillo anular o tipo dona Para este tipo de martillo se estima que el equipo entrega una cantidad de energía aproximadamente de 45% de la energía teórica máxima.	45%	
Diámetro del tubo muestreador (η_B)	En el país usualmente se utiliza un diámetro externo del tubo de muestreo de 50.8 mm, tal como lo determina la norma ASTM D1586.	1	
Tipo de muestreador (η_S)	Se ha considerado un muestreador estándar en el ensayo SPT ya que es el más utilizado en el medio.	1	
Longitud de la barra (η_R)	Este factor varía dependiendo de la profundidad a la que se realice el ensayo.	Longitud, m	η_R
		>10	1.0
		6-10	0.95
		4-6	0.85
		0-4	0.75
Presión de confinamiento (C_N)	Se ha considerado aplicar la ecuación propuesta por Peck, ya que es una de las recomendadas por la norma ASTM D6066 y brinda restricciones debido a la presión efectiva.	$C_N = 0.77 \log_{10} \frac{20}{\sigma'}$ $\left(\frac{kg}{cm^2} \right)$ $0.25 \leq \sigma' < 1$	

Tabla No. 3.2 Factores de corrección aplicados al N de campo

Fuente: Modificado de Braja M. Das (2012). FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES, séptima edición. Editorial Cengage Learning

¹⁸Braja M. Das (2012). FUNDAMENTOS DE INGENIERA DE CIMENTACIONES. Séptima Edición. Editorial Cengage Learning, México

3.3.5.3. Uniformización de correlaciones de compacidad y consistencia

Los estudios geotécnicos en el país usualmente aplican tablas de correlaciones para la compacidad y consistencia con el N de campo, sin embargo, dichas propiedades al ser cualitativas varían dependiendo de la empresa que presente el estudio. Por lo tanto, se ha considerado tomar una correlación uniforme para todos los estudios que se han registrado, haciendo uso de los valores de consistencia y compacidad en función de N mostrados en la **Tabla No. 2.4** en el apartado de estas propiedades (**apartado 2.5**)¹⁹.

3.3.5.4. Correlación de N con otras propiedades geotécnicas

Existen ecuaciones empíricas que relacionan el valor de resistencia a la penetración N_{60} ó $N_{1(60)}$ que son aplicadas con el fin de obtener algunos parámetros que son utilizados durante la fase del diseño geotécnico de obras de ingeniería civil, como el ángulo de fricción interna y la capacidad de carga.

La utilización de estas correlaciones deberá realizarse tomando en consideración las condiciones particulares del proyecto, se recomienda que para su utilización una buena práctica es contrastar en aquellos casos que sea posible, la información estimada a partir de ensayos SPT con resultados de ensayos de laboratorio; esto con el objeto de emplear la correlación que más se ajuste a las particularidades del proyecto, tipos de suelos, entre otros. Por tal razón, en la base de datos no se ha considerado su uso puesto que con poca

¹⁹Correlación propuesta por: Vargas, Manuel. (1999). Ingeniería de Cimentaciones, fundamentos e introducción al análisis geotécnico. 2ª. Edición, Editorial Alfaomega, México.

frecuencia los estudios geotécnicos presentan resultados de ensayos de laboratorio, tales como pruebas triaxiales y corte directo.

3.3.6. REVISIÓN DE REGISTROS DE LA BASE DE DATOS

Posteriormente de haber realizado el análisis previo, se procedió a realizar una revisión de la información que se registró en la base de datos, con el objeto de detectar posibles errores que se pudiesen haber generado durante el proceso de digitalización y procesamiento. Para realizar esta metodología, se hizo uso de un software denominado gINT Logs, cuya licencia posee OPAMSS.

3.3.6.1. Software gINT Logs

Este software provee la centralización y administración de datos y reportes para todo tipo de proyectos geotécnicos. El programa automatiza y elimina la redundancia de entrada de datos incrementando así la productividad; permite al usuario mejorar el proceso de manejo de datos, con información interoperativa y reportes de subsuelo, estratigrafía, resultados de laboratorio y mucho más, mientras incrementa la precisión y eficiencia.

gINT Logs, además, ofrece una gestión avanzada de datos e informes de perforaciones y registros de perforaciones geotécnicas y puede reportar todo tipo de subsuelo en casi todos los formatos, incluyendo gráficos, fotos, mapas del sitio, leyendas y mucho más, es un software de gestión de datos subterráneos y elaboración de informes. Dentro de estas aplicaciones, el

software permite detectar posibles incongruencias de la información introducida, es por esto que se ha considerado utilizarlo.

3.3.6.2. Proceso de revisión con software

Se crearon tres hojas en Excel, referenciada a la base de datos para posteriormente exportarla al software gINT Logs. Estas hojas contienen información sobre la localización del sondeo; la descripción y clasificación de los estratos; los valores de N y las humedades.

En la primera hoja denominada "POINT" se encuentra los campos relacionados a la localización, los nombres de estos campos están adaptados a los identificadores que el software reconoce como tal. La característica de esta hoja es que a partir de ella es posible enlazar las otras dos hojas ya que contiene un identificador de localización con su profundidad final y coordenadas para cada sondeo del estudio geotécnico. Esto se muestra en la **Figura No. 3.8a**.

La segunda hoja se denominó "GEOL", pues contiene principalmente la descripción de cada uno de los estratos de los sondeos a cada 0.5 m, con la profundidad superior e inferior de cada uno de ellos. (Ver **Figura No. 3.8b**)

La tercera hoja llamada "ISPT", contiene los valores de N de todos los sondeos a cada 0.5 m, el contenido de humedad y la profundidad final de cada estrato, tal como se observa en la **Figura No. 3.8c**.

PointID	HoleDepth	Elevation	North	East	LOCA_STAR	LOCA_ENDD	LOCA_PURP	LOCA_REM
'Location Identifier	Final Depth	Local Ground Level	Local North	Local East	Start Date	End Date	Purpose	Remarks
'	m	m	m	m	dd/MM/yyyy	dd/MM/yyyy		
S1_0059-2004	6,00	830,00	472604,499	284111,001	14/11/2003	18/11/2003	Construcción de base Geotécnica	Seca
S2_0059-2004	1,50	830,00	472620,705	284113,316	14/11/2003	18/11/2003	Construcción de base Geotécnica	Seca
S2A_0059-2004	2,00	830,00	472618,660	284112,736	14/11/2003	18/11/2003	Construcción de base Geotécnica	Seca
S2B_0059-2004	2,00	830,00	472622,496	284113,636	14/11/2003	18/11/2003	Construcción de base Geotécnica	Seca
S3_0059-2004	5,50	830,00	472637,572	284117,946	14/11/2003	18/11/2003	Construcción de base Geotécnica	Seca
S4_0059-2004	5,00	830,00	472657,085	284125,883	14/11/2003	18/11/2003	Construcción de base Geotécnica	Seca
S5_0059-2004	6,00	830,00	472663,832	284119,004	14/11/2003	18/11/2003	Construcción de base Geotécnica	Seca

a)

PointID	Depth	GEOL_BASE	GEOL_DESC
'Location Identifier	Top Depth	Base Depth	Description
'	m	m	
S1_0059-2004	0,00	0,50	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada (SM)
S1_0059-2004	0,50	1,00	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada (SM)
S1_0059-2004	1,00	1,50	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada (SM)
S1_0059-2004	1,50	2,00	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada (SM)

b)

PointID	Depth	ISPT_NVAL	ISPT_WAT	ISPT_INC1	ISPT_INC2	ISPT_INC3
'Location Identifier	Top depth	Spt 'N' Value	Water Depth	Blows 1	Blows 2	Blows 3
'	m		%			
S1_0059-2004	0,00	11	18	3	3	8
S1_0059-2004	0,50	28	18	12	13	15
S1_0059-2004	1,00	35	23	16	17	18
S1_0059-2004	1,50	43	23	30	21	22
S1_0059-2004	2,00	32	23	16	15	17

c)

Figura No. 3.8 Plantillas en Excel que se exportaron a software gINT logs. a) Hoja POINT b) hoja GEOL c) hoja ISPT.

Fuente: autores

Luego de realizar el proceso de revisión de la base de datos en el software, este proporciona un reporte de errores, los cuales fueron los siguientes:

- Duplicación de datos en la hoja POINT: este error se genera ya que en esta hoja solo se admite la profundidad máxima del sondeo.
- Tipo de valor introducido incorrecto: existen campos en los que solo se admiten valores numéricos, por ejemplo, para los valores de N. Un caso común de error según el software, son las expresiones “>50”, ya que en la mayoría de estudios se presenta para indicar que en ese estrato, el número de golpes sobrepasa a los 50, por lo que indica rechazo. Sin embargo, el software solo admite valores numéricos y no alfanuméricos para este campo.
- Falta de un registro en la hoja POINT: al realizar el procedimiento de colocar la profundidad máxima para cada sondeo, por error, se borró uno de los sondeos del estudio, por lo que el software, no reconoce ninguna clave que relacione este sondeo con las demás hojas de la base de datos.

Posteriormente, se realizaron las respectivas correcciones, de manera que la base quedara apta para empezar con el proceso de elaboración de mapas.

3.3.7. SELECCIÓN DE LA INFORMACIÓN QUE CONTENDRÁ EL MAPA

Para la elaboración del mapa, se seleccionó en primer lugar la información que contendrá el mismo, a partir de los registros de la base de datos, de la cual se definió la siguiente: N de campo, humedad y clasificación de suelos; con la cual se generaron mapas preliminares, con el fin de analizar e interpretar la información en base a la geología y formas del relieve que presenta el área de estudio, así como también para observar el comportamiento de las propiedades geotécnicas a diferentes profundidades para cada sondeo.

A continuación, se describen en detalle los criterios y ajustes empleados para la generación del mapa.

3.3.7.1. Delimitación de la zona de interés

Se decidió demarcar el área de interés por medio de regiones, esto con el objetivo de incluir la mayor información posible, donde se tuviese más concentración de puntos, para reducir la incertidumbre que pudiese presentarse con la realización de las interpolaciones y de esta manera obtener resultados con mayor grado de confiabilidad. Por tal razón, y tomando en cuenta las condiciones geológicas y topográficas, se generaron dos regiones: una de las áreas limitadas, es una zona topográficamente deprimida, ubicada entre la ladera del Picacho y la del Bálsamo; y la otra área, significativamente más pequeña, quedó definida por una porción de la zona del Bálsamo, la cual está topográficamente más elevada, como se observa en la **Figura No. 3.9**.

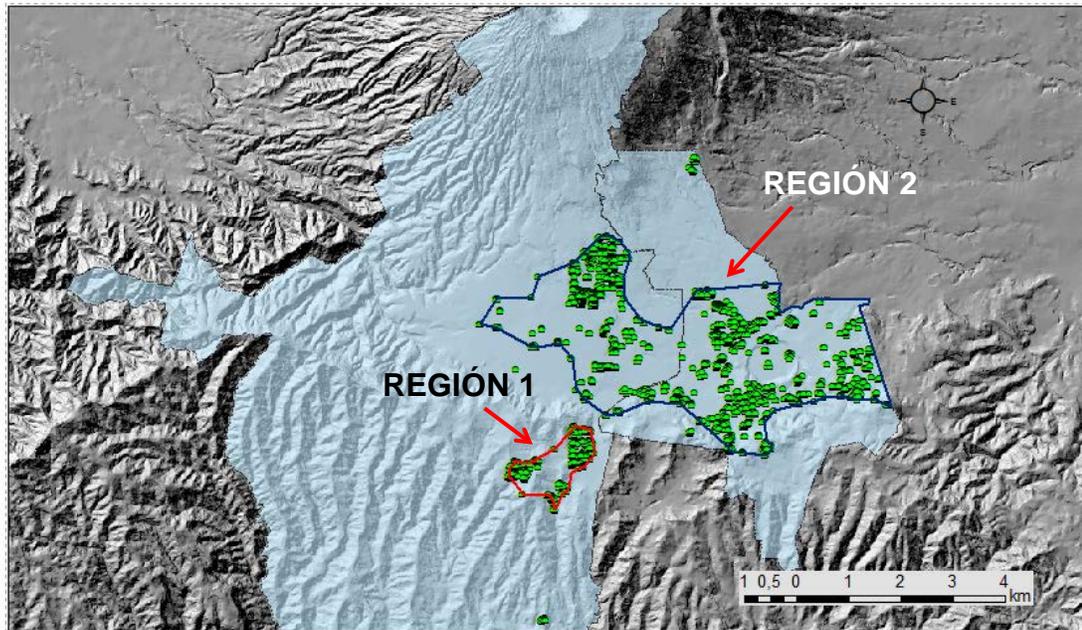


Figura No. 3.9 Regiones delimitadas para la generación del mapa.
 Región 1: ubicada en la zona Bálsamo. Región 2: ubicada entre la ladera del Picacho y la del Bálsamo.

Fuente: autores

3.3.7.2. Determinación de la profundidad en estudio

Se definió elaborar mapas a una profundidad de 2 y 5 m, esto con el criterio empleado que el promedio de profundidades para cimentaciones superficiales utilizadas para edificaciones de uno o dos niveles es de 1.5 m, por lo que se elaboró un mapa para compacidad, humedad y clasificación de suelos a una profundidad de 2 m.

Para la elaboración del mapa a 5 m, se realizó un análisis cuantitativo de la información existente a diferentes profundidades, con el objetivo de definir la elaboración del mapa a una profundidad máxima, entre las cuales se encontró que a medida la profundidad aumentaba, la cantidad de información era menor

y, por lo tanto, menos representativa. Esto se muestra en detalle en la **Tabla No. 3.3**

Profundidad (m)	Muestra (sondeos)	Suelos Granulares (sondeos)	%	Suelos Cohesivos (sondeos)	%
1	2880	2840	98.61	40	1.39
2	2739	2693	98.32	46	1.68
3	2439	2387	97.87	52	2.13
4	2032	1979	97.39	53	2.61
5	1579	1537	97.34	42	2.66
6	1143	1095	91.62	48	8.38
7	680	644	94.70	36	5.30
8	449	425	94.65	24	5.35
9	279	261	93.55	18	6.45
10	165	153	92.73	12	7.27

Tabla No. 3.3 Análisis cuantitativo del total de puntos de sondeos hasta la profundidad de 10 m.
Fuente: Autores

En base a este análisis, se decidió establecer como profundidad máxima 5 m, ya que el porcentaje de información a esta profundidad, genera resultados más característicos de la zona en estudio (más del 50% del total de sondeos).

Es por esto, que se elaborarán mapas a 2 m y 5 m para compacidad, humedad y tipos de suelo, con los siguientes criterios:

3.3.7.3. Mapa de compacidad

Se realizó el mapa de compacidad, que es específicamente para suelos granulares; no así, el mapa de consistencia (para suelos cohesivos), debido a que se determinó que, a una profundidad de 2 m, la muestra de suelos cohesivos es significativamente menor a la alcanzada por los suelos granulares,

ya que, de un total de 2739 sondeos realizados a esa profundidad, solamente 46 de ellos contienen suelos cohesivos. De igual manera ocurre con los suelos cohesivos para la profundidad de 5 m.

El mapa de compacidad se elaboró con el método de interpolación “Topo to Raster” (procedimiento que se describirá en el **apartado 3.3.8.2**), ya que, al intentar con otros métodos, estos no dieron resultados satisfactorios, mientras que la aplicación del método antes citado, proporcionó resultados más lógicos. Se elaboró a partir de los valores de N de campo, generando inicialmente un mapa con el criterio siguiente: para valores de N entre 0-4, se considera un suelo “Muy suelto”; entre 4-10, “Suelto”; entre 10-30, “Mediana”; entre 30-50, “Denso” y finalmente, para N mayor de 50, un suelo “Muy denso”. Sin embargo, se observó en el mapa que con esta clasificación asignada no era lo suficientemente representativo, por lo que se decidió simplificar el criterio anterior a la clasificación siguiente: para valores de N entre 0-10 se considera un suelo “Suelto”, entre 10-30 “Mediano”, y para mayores de 30, “Denso”. Obteniendo, así como resultado un mapa donde es posible identificar con mayor claridad las zonas donde probablemente el suelo esté más suelto o más denso según las condiciones particulares del mismo en el área de estudio.

3.3.7.4. Mapa de humedad

Se generó el mapa de humedad con el método “Topo to Raster”, tanto para la época seca como lluviosa, con el fin de evaluar su comportamiento según la

fecha en que fue realizado el ensayo, ya que se contó con tal información proporcionada por los estudios geotécnicos.

De acuerdo al mapa preliminar elaborado, se encontró un rango de contenidos de humedad desde el 5% hasta un 70%, debido a esto, se han clasificado y generado isolíneas con la herramienta “Contour” (como se explicará en el **apartado 3.3.8.2**) a cada 10 m, que facilitan la representación e interpretación del comportamiento de las humedades en función de su época y profundidad.

3.3.7.5. Mapa de tipos de suelos

Para elaborar el mapa de tipos de suelos, se realizaron pruebas con diferentes métodos de interpolación, de manera que se utilice el método que brinde resultados más confiables. Al hacer esto, se determinó que el método “kriging” era el más coherente y es el que se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y geología.²⁰ Dicho procedimiento se describirá posteriormente, en el apartado de la elaboración del mapa.

Primeramente, se partió de la información proporcionada por los estudios, específicamente de la clasificación adoptada por los laboratorios, sin embargo, al revisar el listado de esta, se encontró que había una cantidad extensa de clasificaciones y que, además, la mayoría no correspondían al SUCS, por lo que se estandarizaron como se explicó en el **apartado 3.3.5.1**. Sin embargo, dicha información no podría ser representada en el mapa debido a que se

²⁰ Página web oficial del software ArcGIS: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>

tornaba compleja y los resultados que se obtuvieron de los mapas preliminares no eran coherentes con la realidad, dado que se cuenta con 21 clasificaciones distintas de suelo; por tal razón, se volvió necesario reducirlas, obteniéndose al final un total de 5 clasificaciones para poder generar el mapa. Estas clasificaciones son: ML, SM, ARENAS (que engloban las SW y SP), GRAVAS (que incluyen las GW y GP) y SC.

Se hizo necesario asignar un código a cada tipo de suelo, ya que el programa para realizar las interpolaciones, no identifica información tipo texto, por lo que se estructuró de la forma siguiente: ML=1.5, SM=2.5, ARENAS=3.5, SC=4.5 y GRAVAS=5.5, de acuerdo a la cantidad representativa que se tiene de cada uno de estos suelos.

3.3.8. ELABORACIÓN DE MAPA MEDIANTE EL SOFTWARE ArcGIS.

El mapa de características geotécnicas se elaborará mediante las herramientas del software ArcGIS, por lo que se considera necesario, conocer sus características más importantes, las cuales se describen a continuación:

3.3.8.1. Software ArcGIS

ArcGIS es un sistema completo que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. A través de este software, es posible, además, crear una amplia variedad de mapas para diferentes aplicaciones.

Un mapa de ArcGIS muestra, integra y sintetiza completas capas de información geográfica y descriptiva de diversas fuentes. Para realizar esto, el software incluye ArcMap, que es la aplicación central utilizada en ArcGIS; es el lugar donde se visualiza y explora el conjunto de datos de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de un área de estudio, donde se asignan símbolos y se crean los diseños de mapa para imprimir o publicar.

3.3.8.2. Proceso de elaboración de mapa

- **Importación de la base de datos al Software**

El primer paso para la elaboración del mapa es la importación de la base de datos de Excel creada previamente, de manera que se tenga toda la información necesaria para el tratamiento de datos.

Para esto se utilizó la opción “Add Data” de la barra “Toolbar Options” y se seleccionó el archivo que contenía la base de datos. Posteriormente, se referenció mediante coordenadas los puntos contenidos en las hojas cargadas, seleccionando la opción “Display XY Data”. En esta etapa, es importante tomar en cuenta, elegir el sistema de coordenadas adecuado a la región en que se encuentre, en el caso de nuestro país, corresponde a “El Salvador Conformal Conic” (Lambert Conformal Conic).

Luego, la nube de puntos cargada de cada sondeo se convirtió a un formato .shp, mediante la opción “Export Data”. De la misma manera, se cargaron los demás archivos que se utilizarán para realizar procedimientos posteriores,

como son la planimetría de la zona en estudio y el mapa de sombras, así como se muestra en la **Figura No. 3.10**

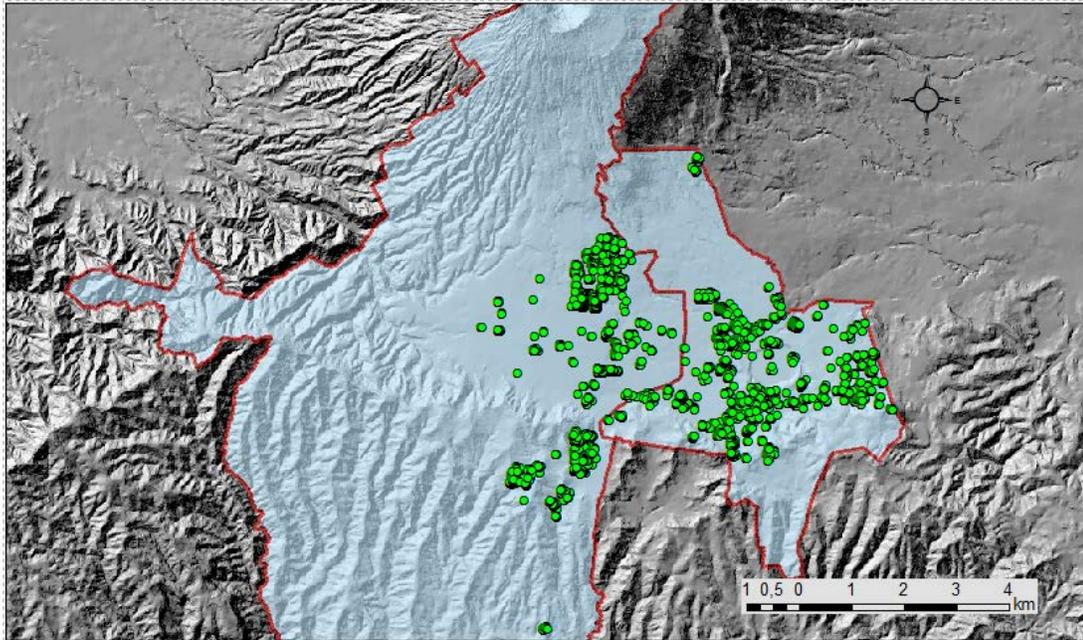


Figura No. 3.10 Puntos cargados al software ArcGIS delimitados en la zona de estudio
Fuente: autores

- **Delimitación del área de interés**

Posteriormente, de todos los puntos cargados, se seleccionaron aquellos sondeos con las profundidades en estudio (de 2 m y 5 m), para luego exportarlos a su respectivo archivo shapefile.

Luego, se trazaron polígonos para delimitar la zona, tomando en cuenta los criterios antes mencionados en el **apartado 3.3.7.1**.

- **Elaboración de mapa de compacidad**

El procedimiento que se siguió se detalla a continuación:

1. Luego de haber establecido el área de interés, se procedió a seleccionar los puntos de los sondeos a las profundidades de 2 y 5 m que corresponden a suelos granulares, para los cuales se han elaborado las interpolaciones, y así, representar en el mapa la compacidad de los suelos granulares. Para esto, se utilizó el método de interpolación “Topo to Raster” y en la **Figura No. 3.11** se muestran los datos que se introdujeron para realizar la interpolación: los valores de N de campo como tipo puntos y las regiones creadas previamente como límite (boundary). Todo el proceso que se describirá se ha realizado para ambas regiones.

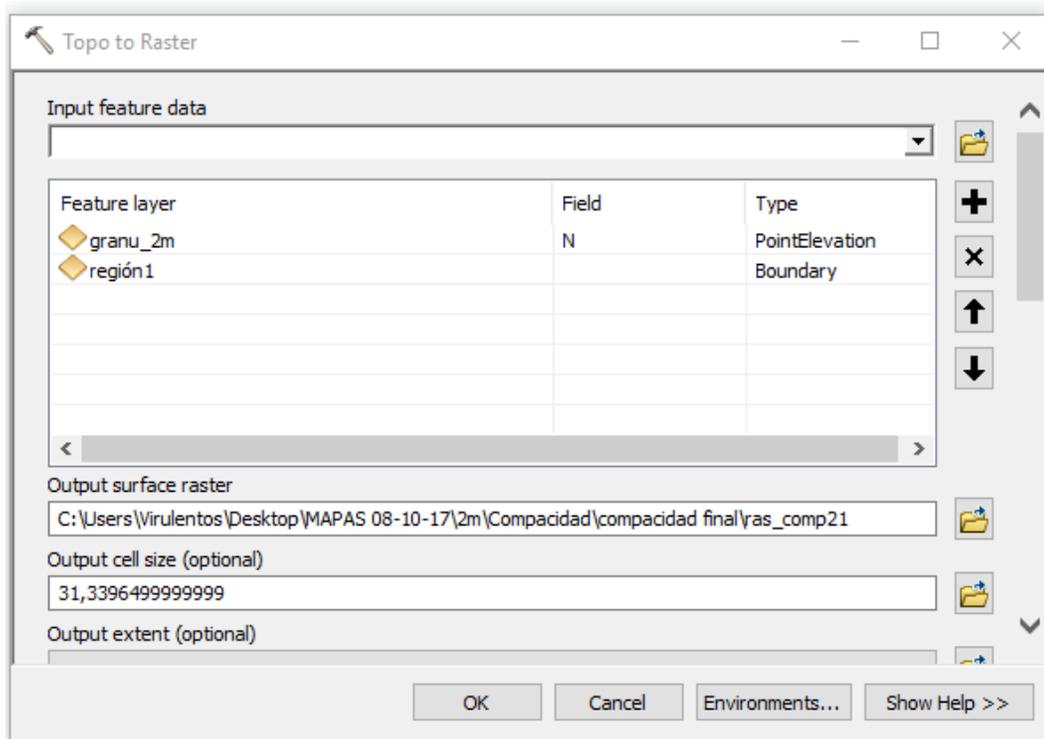


Figura No. 3.11 Método Topo to Raster para interpolación de compacidades
Fuente: ArcGIS

2. Al realizar tal interpolación, se hizo necesario reclasificar los valores de N para categorizar las compacidades de acuerdo al criterio tomado en el

apartado 3.3.7.3. Para esto, se utilizó la opción “Reclassify” de la caja de herramientas de ArcGIS.

De esta forma, se generaron códigos (GRIDCODE) del 1 al 3, correspondientes a suelos sueltos; suelos con compacidad mediana; y suelos densos, respectivamente. (Ver **Figura No. 3.12**)

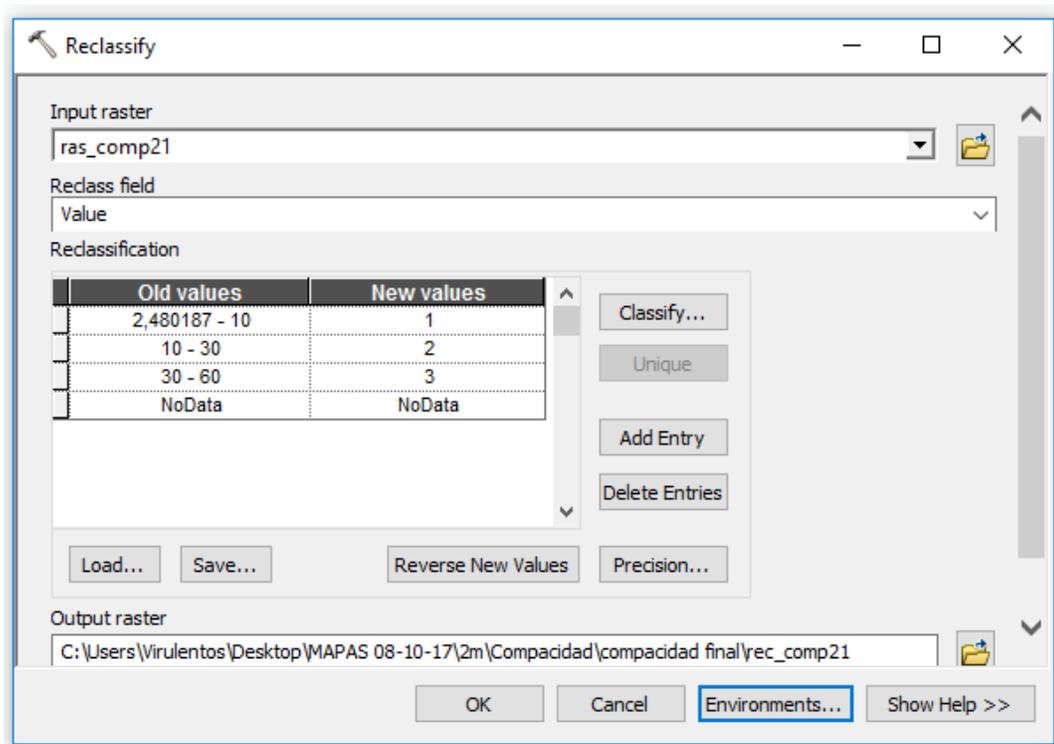


Figura No. 3.12 Reclassificación de los valores de N en el mapa de compacidades.
Fuente: ArcGIS

3. El siguiente paso realizado, fue la conversión de archivo raster a shapefile, mediante la opción “Raster to polygon” de la caja de herramientas. De esta manera, se logró acceder a la tabla de atributos del nuevo shape creado, a la cual se le agregó un campo nuevo tipo texto, denominado “Compacidad”, en donde se colocaron los valores cualitativos correspondientes para cada rango

de compacidades, en función del código asignado en la reclasificación (paso anterior). Esto se realizó seleccionando cada uno de los GRIDCODE y utilizando la herramienta “Field Calculator”. (Ver **Figura No. 3.13**)

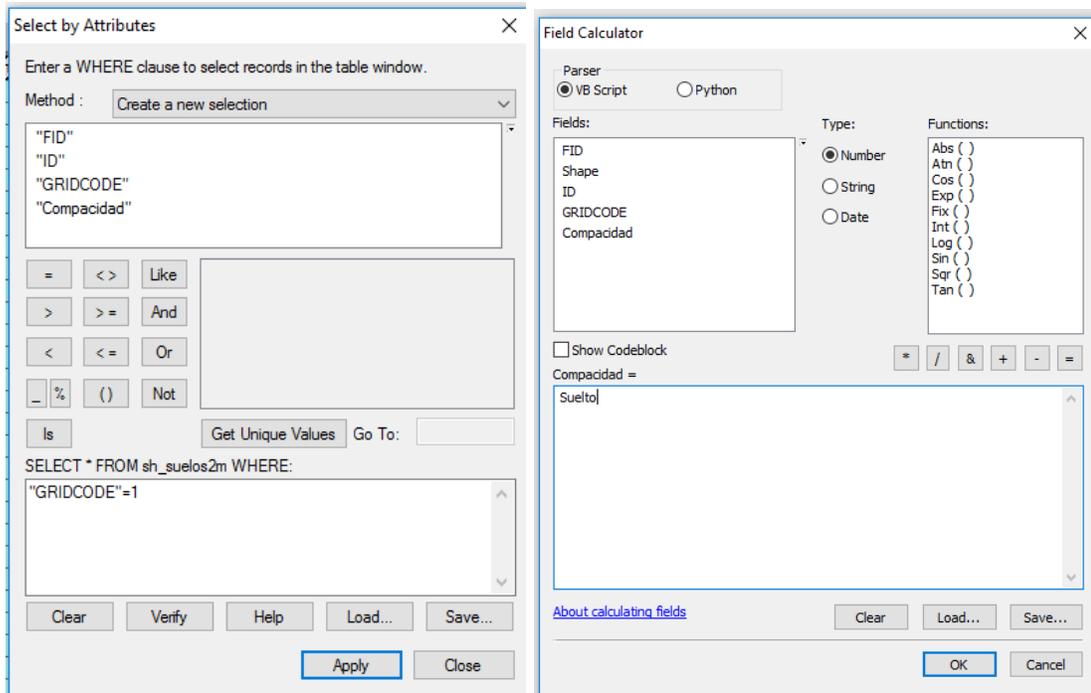


Figura No. 3.13 Asignación de compacidad a los polígonos del mapa en función del código de la reclasificación

Fuente: ArcGIS

4. Finalmente, se define el formato del mapa a 2 m y a 5 m, el cual se ha decidido representar cada tipo de compacidad, mediante diferentes colores, tal como se muestra en la **Figura No. 3.14** y **Figura No. 3.15**. Para cada uno de estos mapas, se ha agregado el Norte, la escala gráfica y su respectiva leyenda. (Ver **Anexo B**)

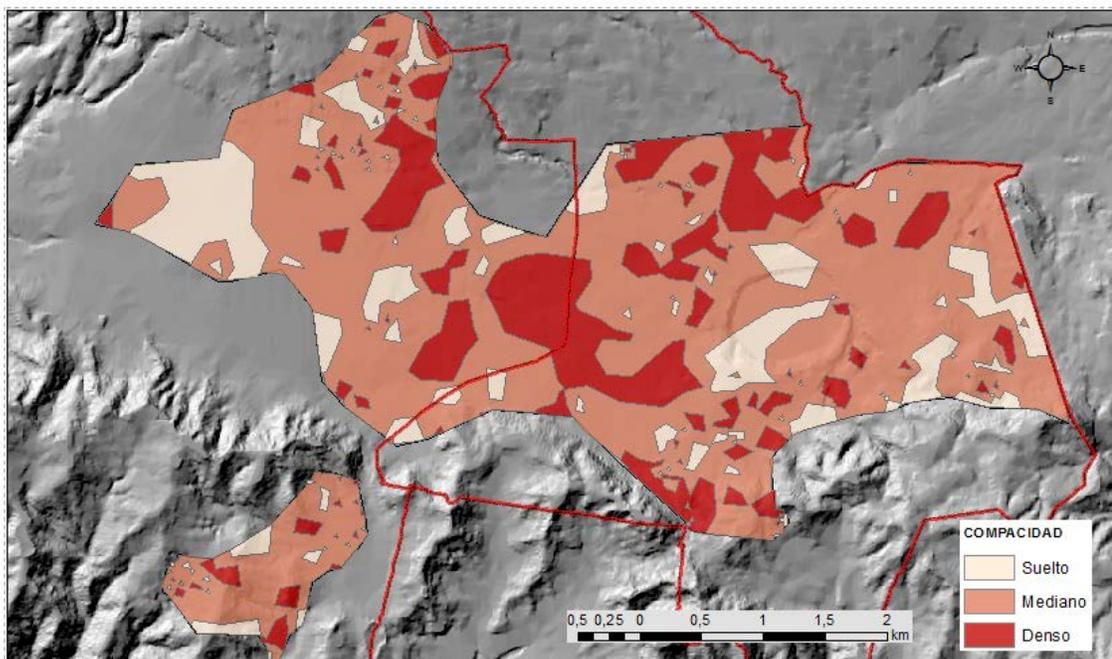


Figura No. 3.14 Mapa de compacidades a la profundidad de 2.00 m
Fuente: autores

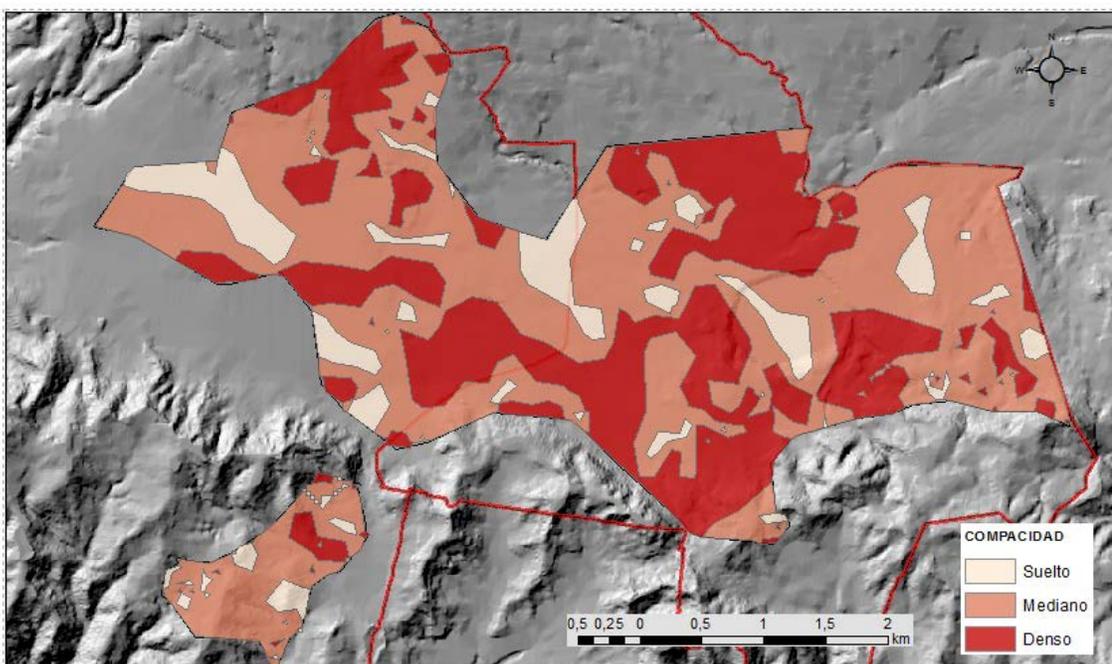


Figura No. 3.15 Mapa de compacidades a la profundidad de 5.00 m
Fuente: autores

- **Elaboración de mapa de humedad**

Los pasos que se siguieron se detallan a continuación:

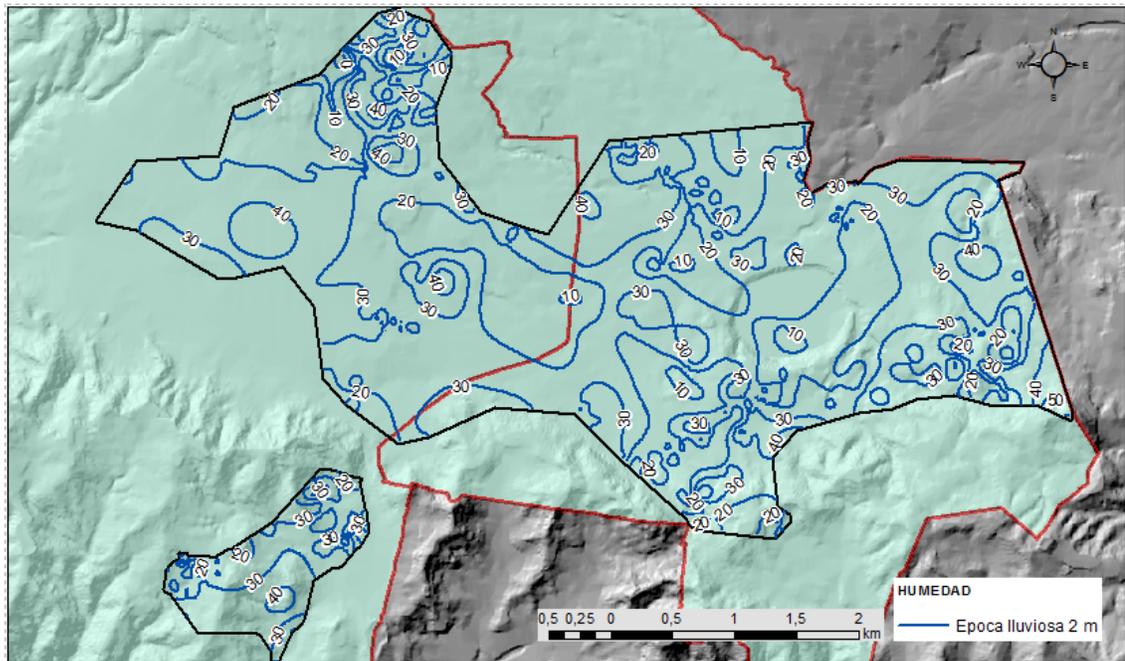
1. Para la elaboración del mapa de humedad, se seleccionó de la tabla de atributos, los puntos de los sondeos a la profundidad de 2 y 5 m con humedades en época seca y época lluviosa, y se realizaron archivos shapefile de puntos para cada época.

2. Luego, se realizaron interpolaciones con el método “Topo to Raster” siguiendo un procedimiento similar al descrito en el mapa de compacidad.

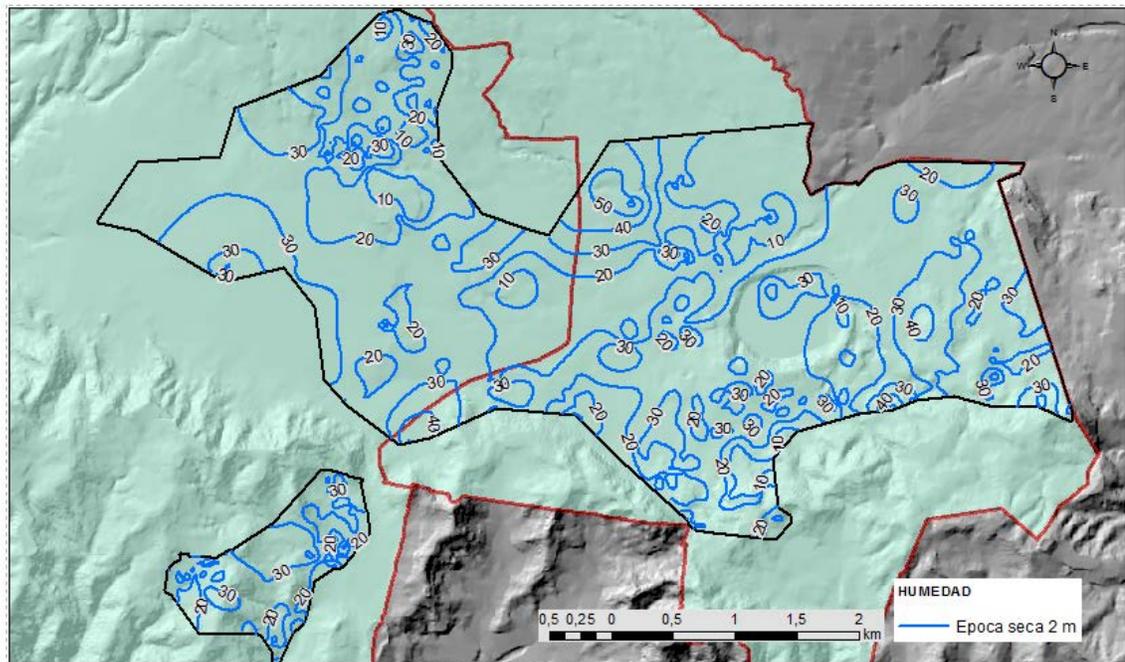
3. Para crear las isolíneas de humedades en su respectiva época, se utilizó la opción “Contour” y se especificó que el intervalo de líneas se requería a cada 10 debido a los rangos que se tienen de humedad (**apartado 3.3.7.4**). Para utilizar esta herramienta, se introdujo el ráster previamente creado en el paso anterior.

4. Se procedió a dar formato a los mapas, los cuales, se presentan mediante isolíneas de humedad con los colores mostrados en la **Figura No. 3.16** a una profundidad de 2 m, y en la **Figura No. 3.17** para 5 m.

Por motivos de visualización de las isolíneas, se ha colocado un color de relleno al shapefile de Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla. Además, se han colocado las etiquetas para cada una de estas isolíneas. (Ver **Anexo B** para obtener una mejor visualización de los mapas de humedad a escala)



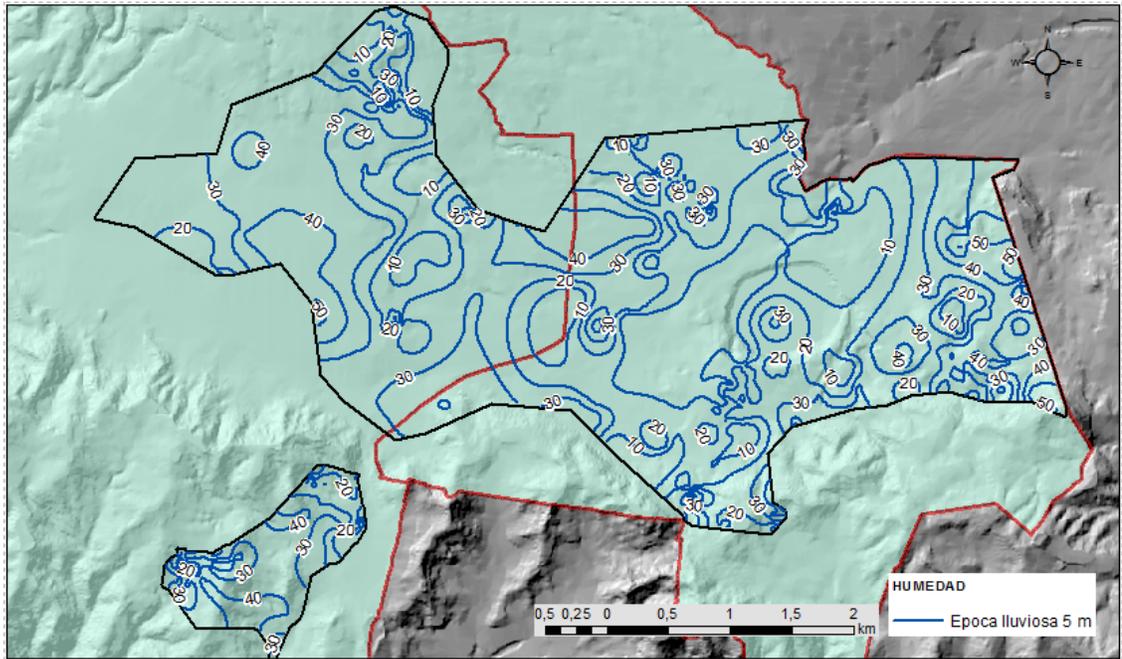
a) Época lluviosa



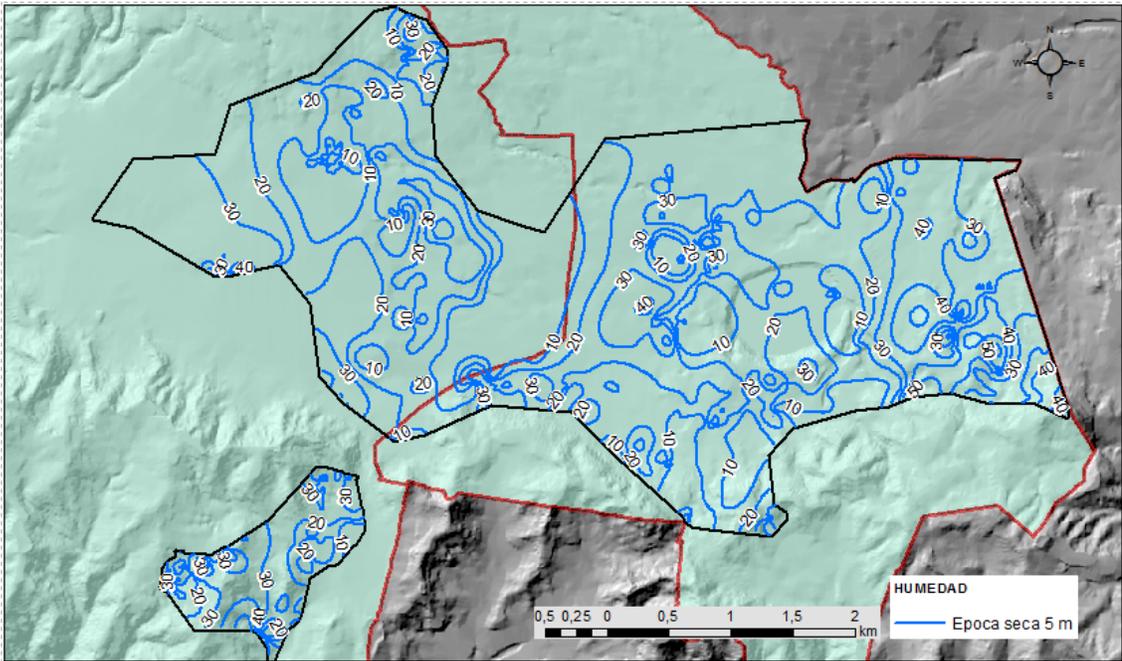
b) Época seca

Figura No. 3.16 Isolíneas de humedades a 2.00 m en a) época lluviosa y b) época seca.

Fuente: autores



a) Época lluviosa



b) Época seca

Figura No. 3.17 Isolíneas de humedades a 5.00 m en a) época lluviosa y b) época seca.
Fuente: autores

- **Elaboración de mapa de tipos de suelos**

Los pasos que se siguieron se detallan a continuación:

1. Para realizar interpolaciones con las clasificaciones de suelo, se procedió a asignar un código de acuerdo a los criterios seleccionados en el apartado 3.3.7.5. Este código se agregó como una columna a la tabla de atributos del shapefile de puntos, el cual se denominó “cod_suelos”.
2. Para realizar la interpolación mediante el método “kriging” se introdujeron los datos necesarios como: el shapefile de puntos, el campo o variable a interpolar, el nombre y ubicación del archivo ráster a generar, las propiedades del método y el tamaño de la celda (el cual es opcional dependiendo del nivel de detalle que se requiera). Esto se muestra en la **Figura No. 3.18.**

Con respecto a las propiedades de “kriging”, se ha utilizado el método ordinario (ordinary), dentro del cual se encuentran cinco modelos de semivariograma: esférica, circular, exponencial, gaussiana y lineal. Al realizar pruebas de cada uno de estos modelos, se observó que la interpolación generada por los primeros tres modelos, brindaban resultados muy similares; sin embargo, los modelos gaussiano y lineal diferían de los anteriores. Por tanto, se determinó utilizar el modelo exponencial, que es el que brinda mejores resultados al analizar la información.

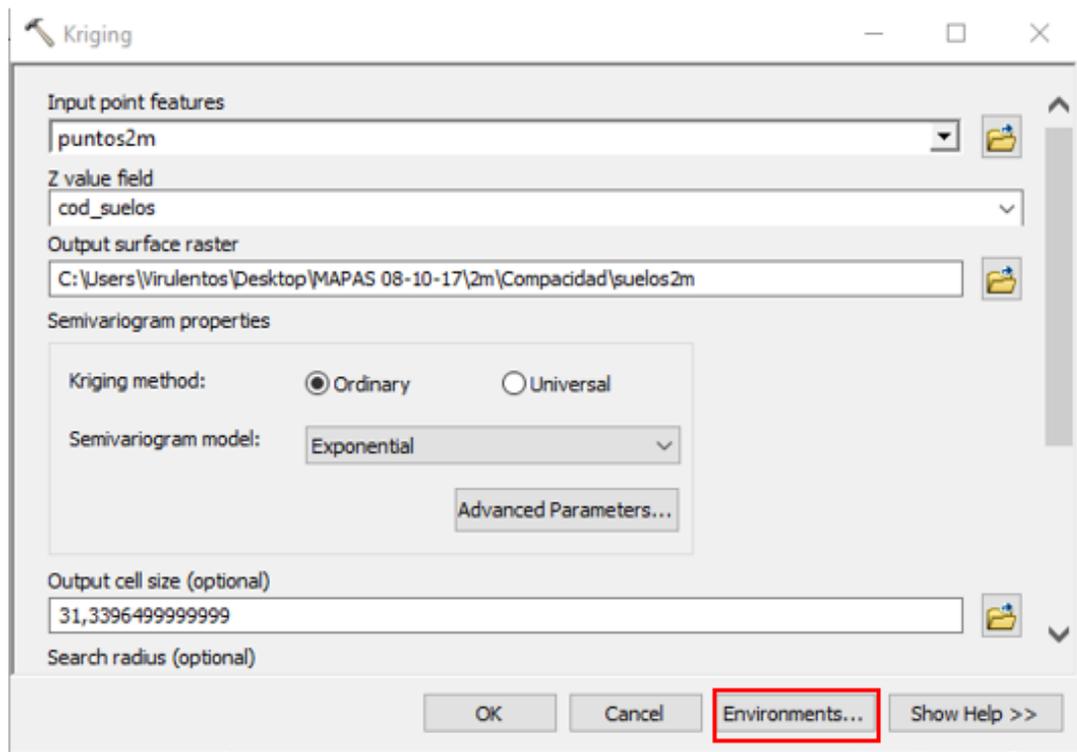


Figura No. 3.18 Método de interpolación kriging para el mapa de tipo de suelos.

Fuente: ArcGIS

3. Es importante determinar el área de interés, sobre la cual se elaborará la interpolación. Para ello, se introdujo una máscara (regiones 1 y 2), la cual se introduce en la opción “Raster analysis” del menú “Environments” mostrado en el cuadro de diálogo de la **Figura No. 3.18**.
4. Luego de haber realizado las interpolaciones, se procede a clasificar los rangos de valores, de acuerdo al código establecido para cada suelo: entre 1-2 se encuentra ML; 2-3, SM; 3-4, ARENAS; 4-5, SC; y 5-6, GRAVAS. Finalmente, se dará el formato que se requiere; en este caso, se representará mediante los colores mostrados en la **Figura No. 3.19** y **Figura No. 3.20** para la profundidad de 2 y 5 m, respectivamente. (Ver **Anexo B** para observar el mapa de tipos de suelos a escala)

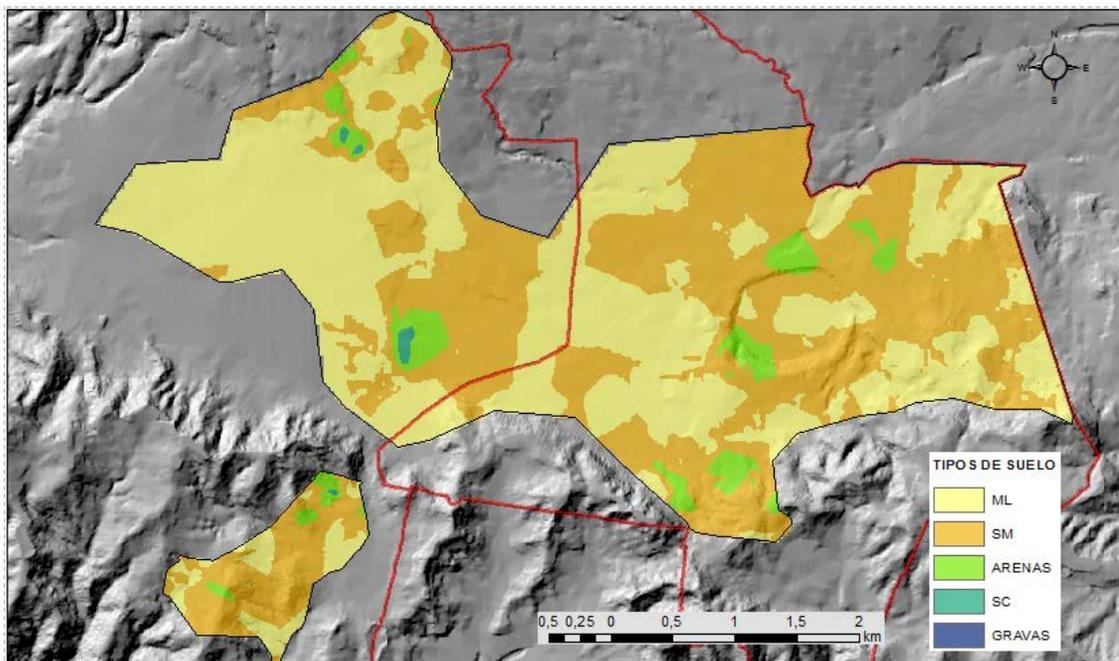


Figura No. 3.19 Mapa de tipos de suelos a 2.00 m de profundidad
Fuente: autores

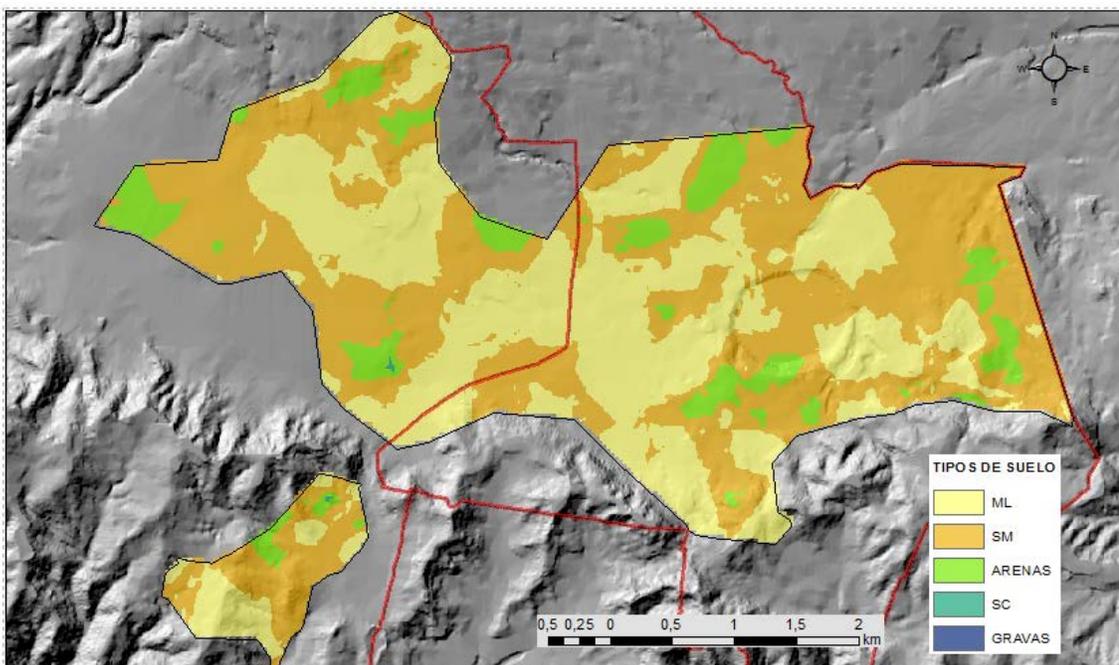


Figura No. 3.20 Mapa de tipos de suelos a 5.00 m de profundidad
Fuente: autores

En la **Figura No. 3.19** y **Figura No. 3.20** puede observarse que en los mapas predominan en gran parte los limos arenosos (ML) y arenas limosas (SM); sin embargo, es necesario tener en cuenta que, dentro de esas zonas, existen además otros tipos de suelo, pero que se encuentran en menores cantidades y menos concentrados que estos dos; y es por esto que los métodos de interpolación han tomado en cuenta los puntos que están espacialmente más cercanos y en mayor cantidad, de acuerdo a la escala de los mapas.

Es por esta razón, que las gravas no se visualizan, sin embargo, se ha decidido tomarlas en cuenta, para hacer notar que existen algunos puntos o zonas donde pueden encontrarse, así como se muestran los puntos a 2 m de la

Figura No. 3.21

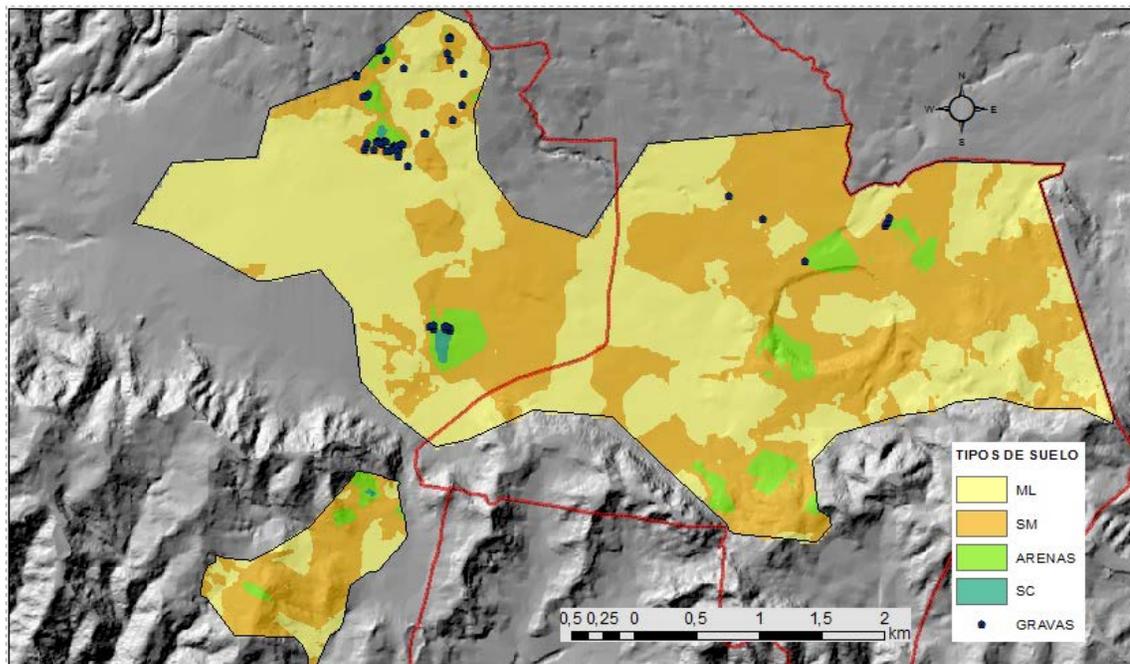


Figura No. 3.21 Mapa de tipos de suelos a 2.00 m de profundidad con puntos de Gravas.
Fuente: autores

3.3.9. REPRESENTACIÓN DE MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Como se mencionó anteriormente, se han generado mapas preliminares, con el objetivo de analizar e interpretar la información, y evaluar el comportamiento de ésta, en base a la geología, formas del relieve y características propias del suelo; para facilitar dicho procedimiento, la información ha sido presentada por separado en tres mapas diferentes, como lo son: mapa de compacidad, mapa de humedad y mapa de tipo de suelos, definidos en el **apartado 3.3.8**.

Sin embargo, la finalidad de la investigación es la elaboración del mapa que contenga la mayor información geotécnica posible, con el sumo cuidado de incluir la información necesaria y de manera representativa, cuyo propósito es evitar que se vuelva compleja su interpretación. Es por ello que, para representar el mapa de características geotécnicas, que incluya la información mencionada anteriormente, se decidió estructurarlo de la forma siguiente:

- Las humedades tanto en época seca como lluviosa, están representadas por medio de una trama, color celeste con líneas horizontales, esto se hizo a la profundidad de 2 m y con humedades a partir del 30%, cuyo propósito es evaluar las zonas donde presenta mayor contenido de humedad, ya que, al consultar con expertos en el área de estudio, las TBJ con humedades mayores a este porcentaje, pueden considerarse como suelos saturados. Además, cabe mencionar que las humedades no

fueron separadas según la época, ya que, con un análisis previo a partir de los mapas preliminares, se logró observar que estos tenían un comportamiento similar.

- Los valores de N de campo a la profundidad de 2 m, han sido representados por medio de isolíneas de color negro, a intervalos de 20.
- Para representar la compacidad del suelo, esta se realizó por medio de valores de N de campo, específicamente para suelos densos, el cual está definido por valores de N mayores a 30; fue elaborado para la profundidad de 5 m, representado por una trama color negro con líneas diagonales a 45°.
- El mapa incluye, además, el tipo de suelo a una profundidad de 2 m, está representado por medio de diferentes colores, como se muestra en la

Figura No. 3.22



Figura No. 3.22 Colores de relleno para los diferentes tipos de suelos

Fuente: autores

La representación del mapa incluye los componentes generales como lo son: orientación y escala, la cual está definida de 1:25.000, se decidió de tal forma, que pudiese extender su nivel de detalle, para evitar aglomeraciones en el mapa, y que este tuviese suficiente espacio para mostrar todo el detalle disponible, de forma que algunas características han sido representadas por medio de líneas simples, tramas y colores, tal como puede observarse en la **Figura No. 3.23**. (En el **Anexo C** se puede visualizar el mapa en su escala real)

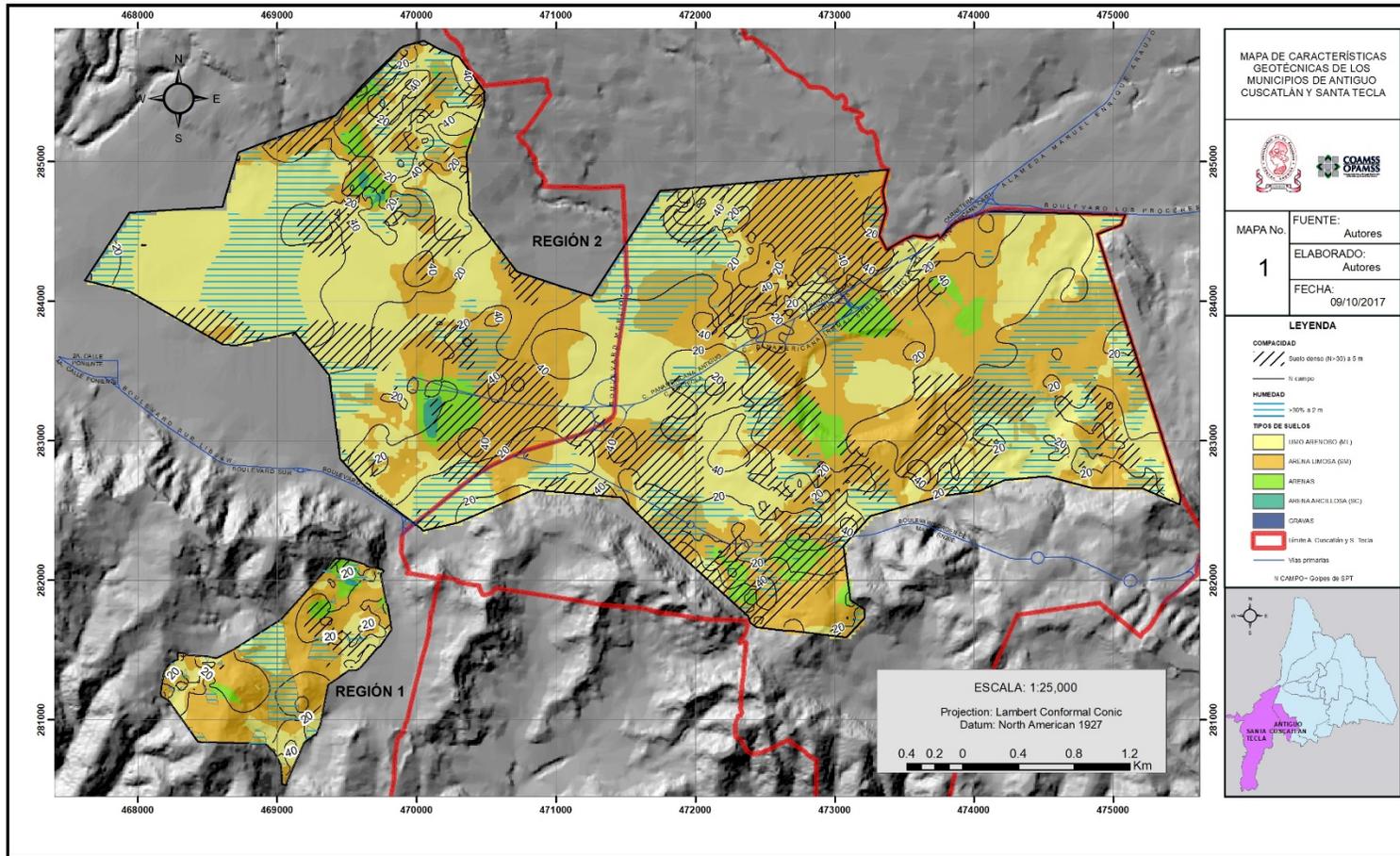


Figura No. 3.23 Mapa de características geotécnicas de los municipios de Antigua Cuscatlán y Santa Tecla.
Fuente: autores

Luego de haber elaborado el mapa de características geotécnicas, debe tenerse en cuenta que este puede ser utilizado como referencia para conocer de forma preliminar las condiciones del suelo, por lo tanto, este no sustituye la realización de un estudio geotécnico que permita conocer de forma detallada las características del suelo en donde será cimentada una obra civil.

Para la realización de estos estudios geotécnicos, es necesario planificar y definir una campaña geotécnica, en donde se determine la cantidad, espaciamiento, ubicación y profundidad de los reconocimientos. Algunos de los criterios para definir estos parámetros, se estudiarán el capítulo IV.

CAPÍTULO IV

PROPUESTA DE

REQUERIMIENTOS MÍNIMOS

EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

4.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo comprende la elaboración de la propuesta de requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para taludes, muros y edificaciones de menos de tres niveles

Para iniciar el capítulo se hace énfasis en describir el contenido mínimo de un informe geotécnico, además se elaboró una lista de verificación para analizar el contenido que presentan las empresas de suelos de nuestro medio en sus informes geotécnicos.

Así mismo, se presenta una breve descripción de las temáticas: edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención; revisando generalidades y aspectos que deben estudiarse para el correcto diseño y análisis de estas estructuras; por otra parte, se presentan algunos lineamientos relacionados con la investigación geotécnica, obtenidos de normativas internacionales y literatura técnica relacionada con la temática, además de algunas entrevistas hechas a profesionales que se dedican a la realización de estudios geotécnicos. Una vez revisada y analizada la información, se procedió a elaborar la propuesta de requerimientos mínimos en estudios geotécnicos, tomando en cuenta criterios obtenidos de la investigación realizada y las condiciones de nuestro medio.

4.2. CONTENIDO MÍNIMO DEL INFORME GEOTÉCNICO

Como se describió en el capítulo II, el estudio geotécnico se realiza previo a la ejecución de un proyecto en particular, cuyo objetivo es definir el tipo de cimentación, para proyectarla de tal forma que garantice un comportamiento adecuado de la edificación. Está comprendido por un conjunto de actividades que incluye: la investigación teórica preliminar de la zona, el planeamiento de la campaña geotécnica, la ejecución de reconocimientos, el muestreo, ejecución de ensayos de laboratorio, análisis e interpretación de resultados, y finalmente, la elaboración de un informe.

El informe geotécnico es aquel donde se describe y se resume la investigación realizada y se justifica geotécnicamente la cimentación que más se ajusta a las condiciones existentes del terreno y al tipo de infraestructura o edificación a emplazar. En él se debe plasmar los resultados de los reconocimientos geotécnicos realizados, su interpretación y las conclusiones que se derivan de su análisis, generalmente en forma de recomendaciones para el proyecto y/o construcción de la obra que ha sido objeto de estudio y conviene que contemple al menos los siguientes apartados: (Ver **Tabla No. 4.1**).

Apartado	Descripción
Introducción	Se indica el proyecto para el cual fue realizada la investigación del subsuelo, la ubicación y el propietario, así también el propósito del estudio, el tipo, número de sondeos realizados y la profundidad.
Descripción general del lugar	Se describe la ubicación general del lugar donde se realizó la investigación, el escenario geológico, condiciones del agua

	<p>subterránea y la topografía de la zona. Debe especificarse a qué niveles (Bancos de Marca) estarán referenciados los sondeos y anexar fotografía de los diferentes sondeos realizados.</p>
Trabajo de campo	<p>Se especifica el o los ensayos ejecutados en el proceso de reconocimiento, describiendo en qué consistió la prueba y las características del equipo, así también se citan las diferentes normativas en las cuales se basa el método (Normas ASTM, por ejemplo). También es importante especificar la técnica de extracción, los tipos y profundidades de las muestras registradas.</p>
Ensayos de laboratorio	<p>Debe reportarse el listado de las pruebas que se han realizado a las muestras obtenidas, citando las respectivas normativas que rigen los procedimientos de ensayo. Entre estos están: determinación del contenido de humedad, granulometría, contenido de materia orgánica, gravedad específica de los sólidos, límites de Atterberg, resistencia al corte, consolidación (si el tipo de muestra lo requiere).</p>
Análisis e interpretación de resultados	<p>Esta etapa es la más importante para la toma de decisiones y se debe colocar los apartados siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estratigrafía general de la zona • Rangos de contenido de humedad • Resistencia a la penetración (N_{SPT}) • Capacidad de carga admisible.
Conclusiones	<p>Se plasman resultados obtenidos de relevancia, como por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estratos con presencia de materia orgánica y zonas sueltas, así como sus espesores. • Presencia del nivel freático. • Estratos con susceptibilidad a la erosión, socavación, tubificación, estratos con plasticidad susceptible a cambios volumétricos. • Parámetros del suelo: peso volumétrico, cohesión y ángulo de fricción interna, los cuales son necesarios

	para el diseño de las cimentaciones.
Recomendaciones	<p>En este apartado se plasman las recomendaciones en cuanto a los siguientes aspectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de cimentación recomendada de acuerdo a los resultados de la capacidad de carga. • Cota de desplante (para cimentaciones superficiales) y la razón de la recomendación. • En el caso se recomienden pilotes, debe especificarse el diámetro, longitud de pilotes y capacidad de carga para tales dimensiones. • Asentamientos estimados de cimentaciones. • En el caso de que se deban realizar restituciones de suelos deberá especificarse en qué zonas, la elevación y el espesor del suelo a sustituir; asimismo, la densidad de compactación a alcanzar. • Se debe plantear las características del suelo de apoyo para la colocación de tuberías. • Especificar la necesidad de un control durante la construcción de los elementos de cimentación, por parte de un especialista en el área, que permita realizar una supervisión adecuada de este proceso.
Anexos	<p>En los anexos deben incluirse al menos los siguientes elementos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plano de ubicación de los sondeos en planta y perfil del subsuelo de la investigación del sitio. • Hojas de registro de campo. • Gráfico de variación de humedad con respecto a la profundidad. • Perfiles estratigráficos. • Datos de los ensayos de campo y laboratorio. • Memoria de los cálculos realizados. • Registro fotográfico.

Tabla No. 4.1 Apartados recomendados en informes geotécnicos

Fuente: Chavarría, Tatiana. (2017). Tesis: "DESARROLLO DEL CONTENIDO PROGRAMÁTICO DE LAS ASIGNATURAS "ANÁLISIS GEOTÉCNICO" Y "CIMENTACIONES"; DEL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA, PARA

LA INCORPORACIÓN EN LA REFORMA CURRICULAR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL”. Universidad de El Salvador.

Los apartados contenidos en la **Tabla No. 4.1** son un modelo de representación del informe geotécnico, sin embargo, es importante definir de manera general, los aspectos mínimos requeridos, los cuales se presentan en la **Tabla No. 4.2** como una lista de verificación, la que se utilizará para analizar el contenido que presentan las empresas de suelos en los informes geotécnicos, debido a que en el proceso de elaboración de la base de datos para la realización del mapa de características geotécnicas, se observaron algunas limitaciones relacionadas a la información que presentan estos estudios. Para esto se utilizarán los siguientes criterios:

- Se colocará **“SI”**, cuando se presenta todos los requerimientos descritos.
- Se colocará **“NO”** cuando no se presenta ningún requerimiento descrito.
- Se colocará **“I”** cuando la información se presenta de forma incompleta.

No.	Contenido mínimo	SI	NO	I
Texto del reporte geotécnico				
1	¿Se describe la ubicación general de la investigación y/o se incluye un plano de ubicación?			
2	¿Se resume el alcance y el propósito de la investigación?			
3	¿Se da una descripción del escenario geológico y de la topografía de la zona?			
4	¿Están listadas las exploraciones de campo y pruebas de laboratorio, sobre las cuales se basará el informe?			
5	¿Se da una descripción general de las condiciones del nivel freático?			
6	¿Se presentan los registros de las perforaciones?			

7	¿Se agregan fotografías al informe?			
Perfil del subsuelo				
8	¿Se proporciona un plano con la ubicación de las perforaciones (incluyendo cotas de referencia) y su respectiva identificación?			
9	¿Se proporciona uno o varios perfiles estratigráficos del subsuelo de la investigación in situ?			
10	¿Están dibujadas las exploraciones e identificadas sobre el perfil, con su respectiva elevación y ubicación?			
11	¿El perfil del subsuelo contiene una descripción (leyenda estratigráfica) y/o representación gráfica de los tipos de suelos?			
Registro de las perforaciones de campo				
12	¿Están los tipos de muestras y profundidades registradas?			
13	¿Se muestran en los registros los números de golpes del SPT, humedad y clasificación del suelo?			
14	¿Se han corregido los N de campo?			
15	¿Las clasificaciones de los suelos corresponden al SUCS?			
16	¿Se ha registrado la longitud de recobro en cada hincada de la cuchara muestreadora, con el fin de poder determinar el peso específico del suelo?			
Datos de ensayos de laboratorio				
17	¿Se presentan las propiedades del suelo como: peso específico, ángulo de fricción y cohesión, mediante correlaciones u otras estimaciones?			
18	¿Los ensayos de laboratorio relacionados con la clasificación de suelos tales como la granulometría y límites de Atterberg, fueron realizados para verificar la identificación visual-manual del suelo? ¿Se incluye en el informe los datos de estos ensayos?			
19	¿Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar propiedades mecánicas como la resistencia al corte? ¿Se incluye en el informe los			

	datos de estos ensayos?			
Cimentación estructural				
19	¿Se recomienda el tipo de cimentación a emplear?			
20	¿Se recomienda la profundidad de desplante?			
21	¿Se proporciona la capacidad de carga admisible recomendada del suelo? ¿Se presenta la memoria de cálculo?			

Tabla No. 4.2 Lista de revisión del contenido mínimo en informes geotécnicos.

Fuente: Federal Highway Administration. (2003). Adaptación de "LISTA DE CHEQUEO Y LINEAMIENTOS PARA LA REVISIÓN DE REPORTES GEOTECNICOS, PLANOS PRELIMINARES Y ESPECIFICACIONES".

Luego de haber descrito el contenido mínimo de un informe geotécnico, y para poder cumplir con los objetivos planteados para la segunda etapa de este trabajo de graduación, se realizará una breve descripción de las temáticas de edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención; estudiando generalidades sobre cada uno y ciertos lineamientos relacionados con la investigación geotécnica.

4.3. EDIFICACIONES

4.3.1. GENERALIDADES

Las edificaciones se pueden definir como aquellas construcciones realizadas por el ser humano con propósitos específicos. Existen diversas clases de edificaciones, que se ejecutan en diferentes espacios, niveles y formas para el uso que se requiera. Un tipo de edificación muy común son los edificios habitacionales, aunque existen otros, para usos comerciales, templos, monumentos, etc.

A pesar de que existen en la actualidad edificaciones de diferentes alturas, en este trabajo se estudiarán las de menos de tres niveles, para las cuales se desarrollará la temática de aspectos generales en estudio que deben tenerse en cuenta para el adecuado diseño de cimentaciones que soportarán las cargas transmitidas por estas estructuras; posteriormente, se revisarán lineamientos y normativas que aporten criterios relacionados al estudio geotécnico.

4.3.2. ASPECTOS EN ESTUDIO PARA EDIFICACIONES

Previamente a la construcción de una edificación, es necesario conocer las propiedades físicas y mecánicas esenciales del suelo sobre el cual se va a asentar, de manera que pueda diseñarse una cimentación adecuada para tales propiedades. Para ello, se debe determinar principalmente los siguientes aspectos:

- Estratigrafía y litología
- Capacidad de carga del suelo
- Profundidad de desplante
- Asentamientos en el suelo

4.3.2.1. Estratigrafía y litología

Para cimentar cualquier obra civil, es necesario conocer los tipos de suelos y rocas que se encuentran en el lugar, de manera que se obtengan las propiedades físicas y mecánicas respectivas para cada estrato en estudio. Esta

información puede determinarse mediante la recolección de muestras provenientes de las perforaciones durante un estudio de suelos.

4.3.2.2. Capacidad de carga del suelo

La capacidad de carga admisible de una cimentación es aquella carga que, al ser aplicada, no provoque falla o daños en la estructura soportada debido a asentamientos excesivos, con la aplicación de un factor de seguridad; por tanto, no solo está en función de las características del suelo, sino que depende también, del tipo de cimentación y del factor de seguridad adoptado. Estas fallas se presentan debido a la rotura por corte del suelo bajo la cimentación.

Dependiendo de la profundidad a la que se tengan estratos resistentes, pueden utilizarse cimentaciones superficiales (zapatas aisladas, zapatas corridas, etc.) o cimentaciones profundas (pilotes o pilas).

- **Cimentaciones superficiales**

Se consideran como cimentaciones superficiales, cuando la profundidad de desplante (D_f) es menor a tres o cuatro veces su ancho (Das, 2012) y dentro de estas, existen tres tipos de falla: falla por corte general, falla por punzonamiento y falla por corte local, representadas en la **Figura No. 4.1**.

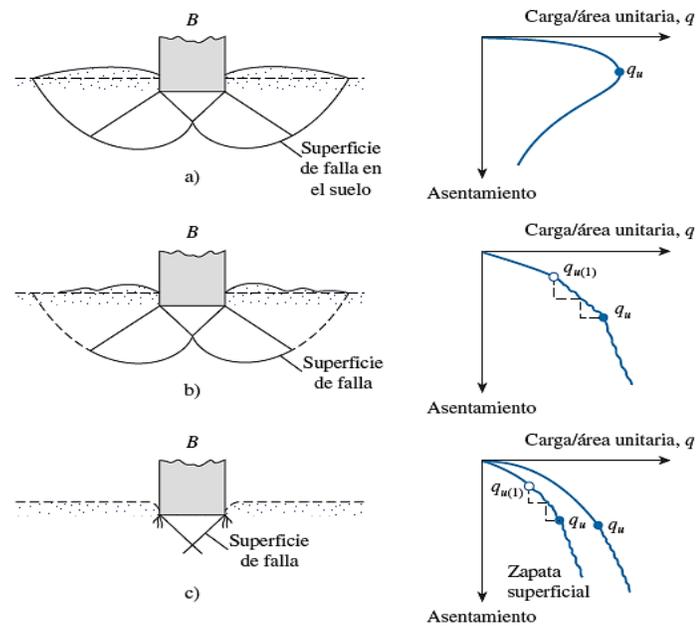


Figura No. 4.1 Tipos de falla por capacidad de carga del suelo: a) falla general por corte; b) falla local por corte; c) falla de corte por punzonamiento

Fuente: M. Das Braja (2012). FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES. Séptima edición. p. 134

Como se observa en la **Figura 4.1a**, su principal característica es una superficie de falla continua que comienza en el borde de la cimentación y llega a la superficie del terreno, esta falla es llamada falla por corte general y se presenta en arenas densas y arcillas rígidas.

En la falla local por corte (Ver **Figura 4.1b**), las superficies de deslizamiento terminan en algún punto dentro de la misma masa del suelo; mientras que, la falla por punzonamiento (**Figura 4.1c**) ocurre cuando la cimentación se hunde cortando el terreno en su periferia con un desplazamiento aproximadamente vertical. Esto se da en materiales muy compresibles y poco resistentes.

▪ **Cimentaciones profundas**

Por otra parte, cuando la capacidad de carga admisible se encuentra a profundidades mayores a las especificadas para cimentaciones superficiales, se requiere utilizar cimentaciones profundas, las cuales, en función de cómo transmiten la carga al suelo, pueden ser principalmente: pilotes de fricción y pilotes de punta. En el caso de los pilotes de fricción, la carga de la superestructura es soportada por los esfuerzos cortantes generados a lo largo de la superficie lateral del pilote; mientras que, en los pilotes de punta, la carga es transmitida por su punta a un estrato firme.²¹

Para determinar la capacidad de carga última de ambos tipos de cimentaciones, existen una variedad de teorías propuestas por diferentes autores: Terzagui, Meyerhoff, Vesic, Hazen y otros. El resultado de estas ecuaciones debe afectarse por un factor de seguridad, para obtener la capacidad de carga admisible del suelo.

4.3.2.3. Profundidad de desplante

Esta profundidad está en función principalmente de la capacidad de carga del suelo, y también de aspectos como: ²²

- La cimentación debe ser segura contra la falla por cortante del suelo
- No deben producirse deformaciones excesivas en el suelo

²¹ M. Das, Braja (2012). FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES. Séptima edición. Capítulo 11: cimentaciones con pilotes.

²² Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2001). Normas de Seguridad Estructural de Edificaciones y Obras de Infraestructura para la República de Guatemala.

- Utilizar la profundidad que evite problemas de erosión o socavación, causada por el flujo de aguas superficiales o subterráneas.
- Profundidad a la que no existan cantidades perjudiciales de material orgánico y el suelo posea características mínimas aceptables.

4.3.2.4. Asentamientos en el suelo

Al aplicar una carga sobre una cimentación, se produce un determinado asentamiento de la misma, en donde, un asentamiento total o diferencial puede afectar una estructura al punto de producir su falla. Por lo tanto, la capacidad de soporte admisible debe restringirse a un valor que no produzca problemas de asentamientos.²³

4.3.3. REVISIÓN DE LINEAMIENTOS Y NORMATIVAS GEOTÉCNICAS

En este apartado se plasmarán lineamientos geotécnicos que permitan formar criterios para decidir el número de sondeos, la profundidad y la ubicación que se puede utilizar en edificaciones de menos de tres niveles. Las fuentes pueden ser libros de consulta, normativa técnica del área, así como consultas con expertos. A continuación, se describe lo planteado:

²³ Asociación Costarricense de Geotecnia. (2002). Código De Cimentaciones De Costa Rica.

4.3.3.1. Lineamientos de literaturas geotécnicas

Algunas literaturas establecen lineamientos generales referidos a las profundidades recomendadas en reconocimientos geotécnicos, entre estos están los que se muestran en la **Tabla No. 4.3**.

Ancho de edificio, m	Profundidad del sondeo, m				
	Número de pisos				
	1	2	4	8	16
30	3.5	6.0	10.0	16.0	24.0
60	4.0	6.5	12.5	21.0	33.0
120	4.0	7.0	13.5	25.0	41.0

Tabla No. 4.3 Profundidades recomendadas en función del ancho del edificio y el número de pisos
Fuente: Sowers, B y Sowers, F. (1972). INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES. México.

Una antigua regla establece que la profundidad de los sondeos debe ser igual a dos veces el ancho del edificio; sin embargo, es una profundidad exagerada para estructuras anchas de un solo piso y demasiado somera para edificios esbeltos (Sowers, B. y Sowers, F., 1972).

En relación a la ubicación de los reconocimientos, Ortiz (1989), presenta los siguientes esquemas como ejemplos para ubicar los sondeos (Ver **Figura No. 4.2**).

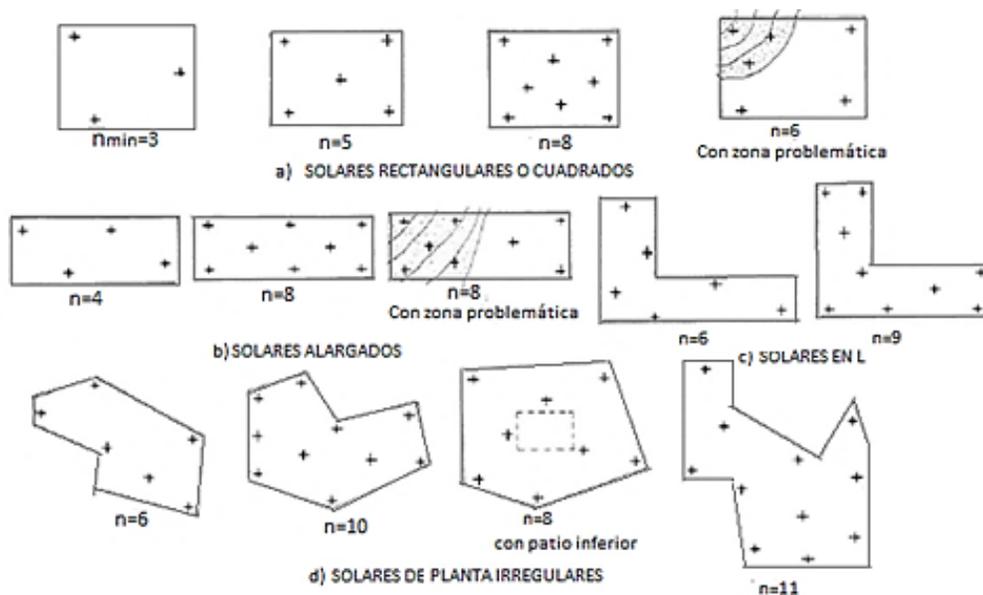


Figura No. 4.2 Esquemas orientativos para la colocación de puntos de reconocimientos ²⁴

Fuente: Rodríguez Ortiz, José María. (1989). CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES. Cuarta edición. España.

Los requerimientos mínimos en estudios geotécnicos que especifican algunas normativas se basan en dos aspectos principales: tipo o importancia de la obra y variabilidad del terreno; en otros casos para definir la campaña, las normativas se apoyan del criterio del ingeniero geotecnista, como es el caso de la Norma Técnica salvadoreña. A continuación, se explica cómo algunas de éstas especifican la determinación del número de sondeos, profundidad y ubicación.

4.3.3.2. Norma Técnica y Lineamientos Geotécnicos en El Salvador

Norma Técnica para Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes

Los requisitos mínimos para los reconocimientos geotécnicos, según esta norma son los siguientes:

²⁴ En la **Figura No. 4.2** "n" representa el número de puntos o perforaciones en el terreno.

- **Cantidad mínima y espaciamiento de reconocimientos**

El número y espaciamiento de los reconocimientos en el subsuelo serán determinados por el diseñador estructural en conjunto con el ingeniero geotecnista, conforme a las características propias del lugar y las cargas transmitidas por la estructura al suelo.

- **Profundidad de reconocimientos**

La profundidad mínima de los reconocimientos, consideradas a partir de los niveles proyectados de terrazas, será la que se indica a continuación:

- a) Para edificaciones de una planta, 3.0 m.
- b) Para edificaciones de dos plantas, 5.0 m.
- c) En todo caso, el especialista en suelos definirá la profundidad.

Norma para Diseño y Construcción de Hospitales y Establecimientos de Salud

Esta norma contempla algunos requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para la construcción de establecimientos de salud, los cuales se resumen en la **Tabla No. 4.4**.

Número de plantas	Número mínimo de sondeos	Espaciamiento máximo (m)	Profundidad	Complementos
Más de dos plantas	5	20	$D_f^{25} + 6$ m	Estudio geofísico
Una y dos plantas	4	25	$D_f^{25} + 4$ m	No

Tabla No. 4.4 Número, profundidad y espaciamientos mínimos de exploraciones geotécnicas.

. Fuente: Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano (MOP-VMVDU). (2003). NORMA PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HOSPITALES Y ESTABLECIMIENTOS DE SALUD. El Salvador.

²⁵ D_f : profundidad de desplante.

4.3.3.3. Documento Básico de Seguridad Estructural de Cimientos (España)

Según la normativa española, a efectos del reconocimiento del terreno, la unidad a considerar es el edificio o el conjunto de edificios de una misma promoción, clasificando la construcción y el terreno según lo que se establece en las **Tablas No. 4.5 y No. 4.6**, respectivamente.

Tipo	Descripción ²⁶
C-0	Construcciones de menos de 4 plantas y superficie construida inferior a 300 m ²
C-1	Otras construcciones de menos de 4 plantas
C-2	Construcciones entre 4 y 10 plantas
C-3	Construcciones entre 11 a 20 plantas
C-4	Conjuntos monumentales o singulares, o de más de 20 plantas.

Tabla No. 4.5 Tipo de construcción

Fuente: Documento Básico SE-C, "SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE CIMIENTOS". (2006). España.

Grupo	Descripción
T-1	Terrenos favorables: aquellos con poca variabilidad, y en los que la práctica habitual en la zona es de cimentación directa (zapatas) mediante elementos aislados.
T-2	Terrenos intermedios: los que presentan variabilidad, o que en la zona no siempre se recurre a la misma solución de cimentación, o en los que se puede suponer que tienen rellenos antrópicos de cierta relevancia, aunque probablemente no superen los 3,0 m.
T-3	Terrenos desfavorables: los que no pueden clasificarse en ninguno de los tipos anteriores, como, por ejemplo: suelos expansivos, colapsables, blandos, etc.

Tabla No. 4.6 Grupo de terreno

Fuente: Documento Básico SE-C, "SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE CIMIENTOS". (2006). España.

²⁶ En el cómputo de plantas se incluyen los sótanos.

Espaciamiento máximo de reconocimientos

Esta normativa indica que para terrenos tipo T1 se debe espaciar los reconocimientos a una distancia no superior a 35 m; mientras que para el tipo T2, 30 m. En el caso de edificios con superficies en planta superiores a los 10.000 m² se podrá reducir la densidad de puntos hasta un 50% de los puntos obtenidos mediante la regla anterior, aplicada sobre el exceso de la superficie.

▪ Número mínimo de reconocimientos

Según esta normativa, de manera general, el mínimo de puntos a reconocer será de tres. En la **tabla No. 4.7** se establece el número mínimo de sondeos mecánicos²⁷ y el porcentaje del total de puntos de reconocimiento que pueden sustituirse por pruebas continuas de penetración cuando el número de sondeos mecánicos (recomendados por el ingeniero geotecnista) exceda el mínimo especificado en dicha tabla.

	Número mínimo		% de sustitución	
	T1	T2	T1	T2
C-0	-	1	-	66
C-1	1	2	70	50
C-2	2	3	70	50
C-3	3	3	50	40
C-4	3	3	40	30

Tabla No. 4.7 Número mínimo de sondeos mecánicos y porcentaje de sustitución por pruebas continuas de penetración

Fuente: Documento Básico SE-C, "SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE CIMENTOS". (2006). España.

▪ Profundidad mínima de reconocimientos

²⁷ Sondeos mecánicos: son perforaciones realizadas a presión (suelos blandos), percusión (grava, materiales cementados) o rotación (rocas, suelos duros); sirven para la extracción y reconocimiento del terreno mediante la obtención de muestras. (Ortiz, 1989)

En la **Tabla No. 4.8**, se proporciona la profundidad mínima de reconocimiento para edificaciones, en función del tipo de construcción.

Tipo de construcción	Grupo de terreno	
	Profundidad mínima (m)	
	T1	T2
C-0, C-1	6	18
C-2	12	25
C-3	14	30
C-4	16	35

Tabla No. 4.8 Profundidades mínimas de reconocimiento orientativas

Fuente: Documento Básico SE-C, "SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE CIMENTOS". (2006). España.

Además de la **Tabla No. 4.8**, la norma indica que debe comprobarse que la profundidad planificada de los reconocimientos ha sido suficiente para alcanzar una cota en la cual el aumento neto de las presiones en el terreno sea igual o inferior al 10% de la presión efectiva vertical existente en dicha cota antes de construir el edificio, a menos que se haya alcanzado una unidad geotécnica resistente, tal que las presiones aplicadas sobre ella por la cimentación del edificio no produzcan deformaciones apreciables.

4.3.3.4. Código de cimentaciones de Costa Rica

Para aplicar los lineamientos de este código, es necesario definir dos aspectos: magnitud de la obra y complejidad geotécnica; para una construcción de menos de 3 niveles (incluyendo residencias, bodegas, urbanizaciones, entre otras), la magnitud de la obra se considera como "baja" (Ver **Tabla No. 4.9**) y la complejidad geotécnica queda a criterio y definición del ingeniero geotecnista.

Magnitud de la obra	Descripción
Baja	Construcciones menores de 3 niveles; incluye residencias, bodegas y urbanizaciones, entre otras.
Media	Edificaciones de 4 a 10 niveles o cargas menores de 3000 kN por apoyo y naves industriales
Alta	Edificaciones mayores de 10 niveles o cargas mayores de 3000 kN por apoyo.
Especial	Construcciones que, por su magnitud, complejidad estructural o de excavación, o condiciones especiales de proceso constructivo, requieren de estudios particulares. Casos especiales de cimentación como losas, pilotes, entre otros.

Tabla No. 4.9 Clasificación de la magnitud de la obra de normativa geotécnica costarricense.

Fuente: Asociación Costarricense de Geotecnia. (2009). CÓDIGO DE CIMENTACIONES COSTA RICA. 2a edición.

A continuación, se presentan los requisitos mínimos para los reconocimientos geotécnicos (Ver **Tabla No. 4.10**)

MAGNITUD DE LA OBRA	COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA		
	Baja	Media	Alta
Baja	N _{mín} : 2 E _{max} : 60 m P _{mín} : D _f + 2m	N _{mín} : 3 E _{max} : 40 m P _{mín} : D _f + 3m	N _{mín} : 4 E _{max} : 30 m P _{mín} : D _f + 4m
Media	N _{mín} : 2 E _{max} : 50 m P _{mín} : D _f + 3m	N _{mín} : 3 E _{max} : 35 m P _{mín} : D _f + 3m	N _{mín} : 4 E _{max} : 25 m P _{mín} : D _f + 4m
Alta	N _{mín} : 2 E _{max} : 40 m P _{mín} : D _f + 4m	N _{mín} : 3 E _{max} : 30 m P _{mín} : D _f + 3m	N _{mín} : 4 E _{max} : 20 m P _{mín} : D _f + 5m
Especial	La campaña de exploración de campo depende del proyecto y será definida por el ingeniero geotecnista.		

Tabla No. 4.10 Requisitos mínimos para la exploración de campo

Fuente: Asociación Costarricense de Geotecnia. (2009). CÓDIGO DE CIMENTACIONES DE COSTA RICA. Segunda edición.

De la **Tabla No. 4.10**:

N mín.: Número mínimo de perforaciones o puntos de exploración.

E máx.: Espaciamiento máximo entre puntos de sondeo o de exploración.

P mín.: Profundidad mínima de los sondeos, en m.

Df: Profundidad de desplante estimada de cimentaciones, en m.

4.3.3.5. Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente

Esta norma define criterios mínimos para la exploración geotécnica, a partir de dos aspectos: la categoría de la edificación que se intenta proyectar y la variabilidad del subsuelo sobre el que esta se apoyará.

Primero, a partir de la **Tabla No. 4.11**, se determina la categoría de edificación (normal, intermedia, alta y especial), la cual depende del área del lote y del número de pisos (para edificios) o unidades (para casas).

Categoría de Edificación	Edificios		Casas	
	Lote (m ²)	No. de pisos	Lote Proyectos (m ²)	No. de unidades
Normal	100 a 250	<4	<1000	0 – 10
Intermedia	250 a 1000	4 – 7	1000 - 5000	10 – 100
Alta	1000 a 1500	8 – 14	5000 - 10000	100 – 500
Especial	>1500	>15	>10000	>500

Tabla No. 4.11 Clasificación por categoría de edificación en edificios y casas

Fuente: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1998). NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-98.

Esta norma subdivide la variabilidad del subsuelo en tres categorías: baja, alta y media como se detalla a continuación:

Variabilidad baja: subsuelos donde no existen variaciones importantes entre el lugar programado para una perforación y las vecinas, presentan materiales de

espesores y características mecánicas aproximadamente homogéneas, y en general suelos con pendientes transversales de hasta 10%.

Variabilidad alta: subsuelos donde existen variaciones importantes entre una perforación y otra (heterogéneos). Se incluyen en esta categoría de variabilidad los terrenos sometidos a alteraciones por deslizamientos, movimientos de tierra, botaderos, minas, canteras, y suelos con pendientes superiores a 50%.

Variabilidad media: Se define para situaciones intermedias entre variabilidad baja y alta, tales como terrazas y llanuras aluviales en su curso medio, desembocadura de ríos, suelos con pendientes transversales desde 10 a 50% y en general los depósitos no contemplados en las categorías anteriores.

Una vez que se ha determinado la categoría de la edificación y la variabilidad del terreno se procede a definir el grado de complejidad del proyecto. Los grados de complejidad se definen I, II, III y IV mediante la matriz de clasificación que se detalla en la **Tabla No 4.12**. Por una parte, se compara la categoría de edificación dada en la **Tabla No 4.11**, y la variabilidad del suelo.

Categoría de Edificación	Variabilidad del suelo		
	Baja	Media	Alta
Normal	I	I	II
Intermedia	II	II	III
Alta	III	III	III
Especial	III	IV	IV

Tabla No. 4.12 Complejidad del proyecto

Fuente: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1998). NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-98

Profundidad y número mínimo de sondeos

A partir de la **Tabla No 4.13**, se puede determinar la profundidad mínima de los sondeos de acuerdo a la complejidad del proyecto y del tipo de edificación.

Complejidad	Número mínimo de sondeos y profundidad de los mismos			
	Edificios	Profundidad (m)	Casas	Profundidad (m)
I	3	15	3	6
II	4	20	4	8
III	5	25	5	10
IV	6	30	6	15

Tabla No. 4.13 Número mínimo de sondeos y profundidad de los mismos

Fuente: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1998). NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-98.

4.3.3.6. Estudios Geotécnicos y de Microzonificación de la República de Guatemala (AGIES NSE 2.1-10)²⁸

Esta norma clasifica los estudios geotécnicos en categorías, dependiendo de la magnitud de la obra y de la aplicación del estudio. Dentro de estas categorías se encuentra el tipo I, cuya aplicación son las obras ordinarias e importantes²⁹ de 1 a 4 niveles, para las que especifica el número y profundidad mínima en función de la clase de obra y del nivel de protección sísmica. Este último factor, depende del Índice de Sismicidad (I_0), el cual varía según la zona (**Figura No.**

4.3.

²⁸Normas de Seguridad Estructural de Edificaciones y Obras de Infraestructura para la República de Guatemala de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.

²⁹ Obras importantes: son las que albergan o pueden afectar a más de 300 personas; que se prestan servicios importantes; obras ordinarias: son las que no se clasifican dentro de las demás categorías como obras utilitarias, importantes o esenciales.

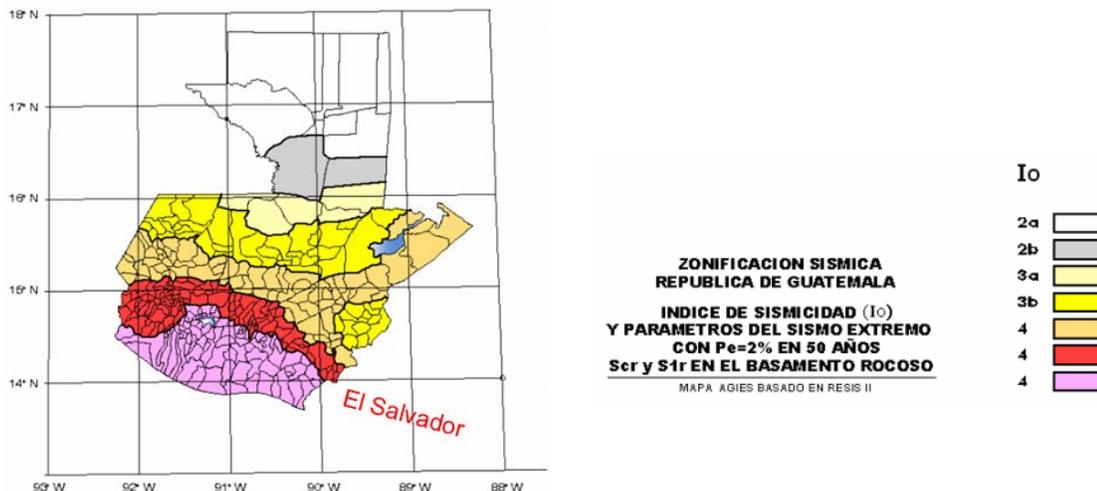


Figura No. 4.3 Zonificación Sísmica de la República de Guatemala.
Fuente: AGIES. (2010). NORMAS DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES Y OBRAS DE INFRAESTRUCTURA PARA LA REPÚBLICA DE GUATEMALA: Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección.

El nivel de protección sísmica se relaciona con el Índice de Sismicidad mediante la **Tabla No. 4.14.**

Índice de sismicidad	Clase de obra ³⁰			
	Esencial	Importante	Ordinaria	Utilitaria
Io=5	E	E	D	C
Io=4	E	D	D	C
Io=3	D	C	C	B
Io=2	C	B	B	A

Tabla No. 4.14 Nivel mínimo de protección sísmica de Guatemala
Fuente: Fuente: AGIES. (2010). NORMAS DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES Y OBRAS DE INFRAESTRUCTURA PARA LA REPÚBLICA DE GUATEMALA: Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección.

De la **Figura No. 4.3** puede observarse que, al proyectar las zonas hacia el Sureste, El Salvador posee un Índice de Sismicidad entre $I_o=4$ y $I_o=3$, por lo que de esa manera puede hacerse una correlación aproximada para tomar como

³⁰ La clasificación de la obra se detalla en el documento AGIES NSE 1-10 GENERALIDADES, ADMINISTRACIÓN DE LAS NORMAS Y SUPERVISIÓN TÉCNICA. Guatemala.

referencia los criterios que se presentan en la **Tabla No. 4.15** con un Nivel de protección sísmica C o D respectivamente.

Nivel de protección sísmica	Construcciones de edificaciones de 1 a 2 niveles	
	Número mínimo de sondeos	Profundidad mínima de sondeos (m)
A	3	6
B	4	8
C	5	10
D, E	**	**

Tabla No. 4.15 Número mínimo de sondeos y profundidad mínima sugerida

Fuente: AGIES. (2010). NORMAS DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES Y OBRAS DE INFRAESTRUCTURA PARA LA REPÚBLICA DE GUATEMALA: Estudios Geotécnicos y de Microzonificación.

Nota: Para el nivel de protección sísmica D y E, el número de sondeos y la profundidad (en m) de los mismos, serán establecidos por el ingeniero geotecnista, debido a la clase de obra y a la sismicidad de la zona.

4.3.3.7. Resumen de lineamientos que proponen literaturas y normativas para establecer la profundidad, número y espaciamiento de sondeos

Luego de haber hecho la revisión de diferentes lineamientos que proponen algunas literaturas y normativas, estos se sintetizan en la **Tabla No. 4.16**.

Norma o autor	Criterio	Profundidad (m)	Número de sondeos	Espaciamiento (m)
Sowers y Sowers	1 nivel, ancho:30-120m	3.5 – 4.0		
	2 niveles, ancho:30-120m	6.0-7.0		
Norma	1 nivel	3.0		

Geotécnica El Salvador	2 niveles	5.0		
Norma de Establecimientos de Salud de El Salvador	Establecimientos de salud de una y dos plantas	$D_f + 4 \text{ m}$	4	25
España	Terrenos favorables	6.0	3 mínimo	35
	Terrenos intermedios	18.0		30
	$A > 10,000 \text{ m}^2$			Reducción de 50% de la regla anterior.
Costa Rica	Complejidad geotécnica baja	$D_f + 2 \text{ m}$	2 mínimo	60 máximo
	Complejidad media	$D_f + 3 \text{ m}$	3 mínimo	40 máximo
	Complejidad alta	$D_f + 4 \text{ m}$	4 mínimo	30 máximo
Colombia	Variabilidad baja y media	Edificios: 15.0 Casas: 6.0	3 mínimo	
	Variabilidad alta	Edificios: 20.0 Casas: 8.0	4 mínimo	
Guatemala	Nivel de protección sísmica C	10.0	5 mínimo	

Tabla No. 4.16 Lineamientos mínimos en estudios geotécnicos propuestos por literaturas y normativas geotécnicas

Fuente: Adaptación de recopilación de normativas geotécnicas

4.3.3.8. Lineamientos recomendados por profesionales en el área

Además de la revisión de normativas, se han realizado entrevistas a algunos profesionales con experiencia en el área de geotecnia, cuyos lineamientos se resumen en la **Tabla No. 4.17**. (Ver formato de las entrevistas en el **Anexo D**)

Profesional	Ubicación de perforaciones	Espaciamiento máximo	Cantidad mínima de perforaciones	Profundidad mínima (m)
Profesional 1	Hacer ensayos preliminares formando triángulos con los puntos	15 a 20 m (Puede disminuirse en función del tipo de proyecto)	3 sondeos	1 nivel – 5 m 2 niveles – 6 m
Profesional 2	Deben ubicarse de manera que pueda tenerse perfiles estratigráficos, en función de la topografía y de las cargas a transmitir.	<ul style="list-style-type: none"> • Para terreno natural: 30 a 35 m • Terreno afectado previamente con edificaciones: 15-18 m. 	4 sondeos	1 nivel – 5 m 2 niveles – 6 m No debe suspenderse el estudio de suelo sin haber encontrado un suelo resistente.
Profesional 3	Depende del área de construcción; hacer un estudio preliminar; ubicarlos donde se tendrá zapatas.	-Depende del estudio preliminar.	3-4 sondeos, si es terreno de >500 m ² , realizar 5 sondeos.	2 niveles – 8 m

Tabla No. 4.17 Lineamientos recomendados para edificaciones por profesionales en el área de geotecnia

Fuente: Entrevista a profesionales en el área de geotecnia.

4.4. TALUDES

4.4.1. GENERALIDADES

En el país, un talud se entiende como una masa de suelo conformada artificialmente con pendientes de cortes o rellenos con cambios de altura significativos; mientras que una ladera es una masa de suelo conformada en forma natural con pendientes y alturas importantes talladas por los fenómenos naturales.

4.4.1.1. TIPOS DE TALUDES

Las obras de infraestructura lineal (carreteras y ferrocarriles) y en general cualquier construcción que requiera una superficie plana en una zona de pendiente, o alcanzar una profundidad determinada por debajo de la superficie, precisan la excavación de taludes. Estas pueden ser desmontes (si dan lugar a un solo talud) y trincheras (si la excavación presenta un talud a cada lado), como se puede ver en la **Figura No. 4.4**.

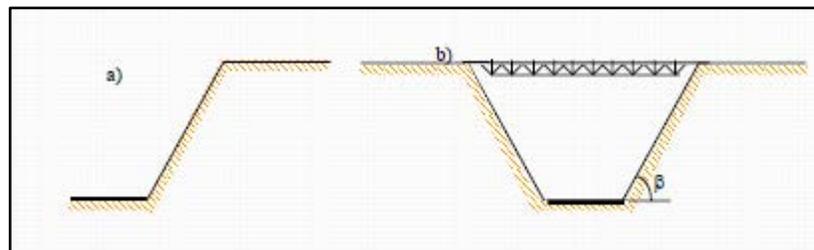


Figura No. 4.4 Tipos de taludes a) desmonte, b) trinchera.

Fuente: Mendoza, Lesly. (2016). Guion de clases: "ESTABILIDAD DE TALUDES". Cimentaciones, T.E. Universidad de El Salvador.

Además de las excavaciones, existen los terraplenes, los cuales son los que se utilizan para rellenos de predios, plataformas, caminos, bordos, desniveles, pisos industriales, estacionamientos, patios de contenedores, ferrocarriles, aeropuertos, rampas de hospitales u otras, etc. Estos son el acumulamiento de suelo de una cierta calidad, compactado de acuerdo a técnicas ya muy conocidas.

4.4.1.2. ELEMENTOS DE UN TALUD

A continuación, se muestran las partes que generalmente se encuentran en un talud (Ver **Figura No. 4.5**).

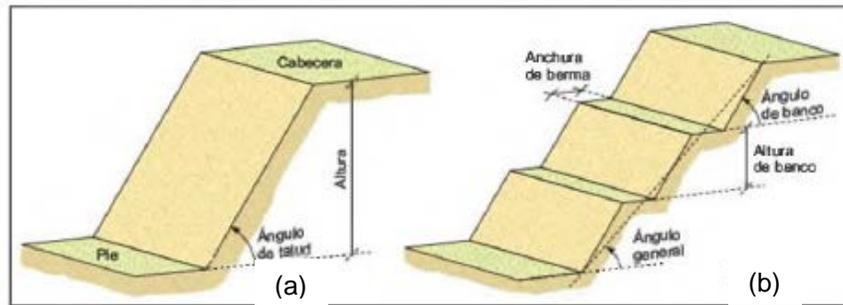


Figura No. 4.5 Partes de un talud con un ángulo uniforme (a) y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos (b).

Fuente: González de Vallejo, L. (2002). INGENIERÍA GEOLÓGICA. Prentice Hall. p. 430

Para la conformación de un talud se deben diseñar los siguientes elementos:

- Forma del talud (pendiente, bermas, etc.)
- Manejo de aguas de escorrentía
- Protección de la superficie (bioingeniería y/o recubrimientos)
- Obras de control geotécnico (drenajes, muros, etc.)

4.4.2. ASPECTOS EN ESTUDIO PARA TALUDES

La investigación de una ladera o talud consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan elaborar un diagnóstico de los problemas, lo más preciso posible. Es por esto, que se recomienda realizar una investigación de campo, que permita elaborar un modelo conceptual y determinístico de los mecanismos de fallas potenciales (Suárez, 1998).

4.4.2.1. ESTRATIGRAFÍA Y LITOLOGÍA

La naturaleza, origen y edad del material que forma un talud está íntimamente relacionada con el tipo de inestabilidad que éste puede sufrir, presentando las

diferentes litologías distinto grado de susceptibilidad potencial ante la ocurrencia de deslizamientos o roturas. Las propiedades físicas y resistentes de cada tipo de material, junto con la presencia de agua, gobiernan su comportamiento tenso-deformacional y, por tanto, su estabilidad.

Aspectos como la alternancia de materiales de diferente litología, competencia y grado de alteración, o la presencia de capas de material blando o de estratos duros, controlan los tipos y la disposición de las superficies de rotura. En los suelos, que generalmente se pueden considerar homogéneos en comparación con los materiales rocosos, las diferencias en el grado de compactación, cementación o granulometría predisponen zonas de debilidad y de circulación de agua, que pueden generar inestabilidades. En los macizos rocosos, la existencia de capas o estratos de diferente competencia implica también un diferente grado de fracturación en los materiales, lo que complica la caracterización y el análisis del comportamiento del talud³¹.

4.4.2.2. TIPOS Y CAUSAS DE FALLAS EN TALUDES

Se denomina deslizamiento a la rotura y al desplazamiento del suelo situado debajo de un talud, que origina un movimiento hacia abajo y hacia afuera de toda la masa que participa del mismo.

Los deslizamientos pueden producirse de distintas maneras, es decir en forma lenta o rápida, con o sin provocación aparente, etc. Generalmente se producen como consecuencia de excavaciones o socavaciones en el pie del talud. Sin

³¹ González de Vallejo, L. (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall. p. 433

embargo, existen otros casos donde la falla se produce por desintegración gradual de la estructura del suelo, aumento de las presiones intersticiales debido a filtraciones de agua, etc.

Los tipos de fallas más comunes en taludes son:

- Deslizamientos superficiales (creep)
- Movimiento del cuerpo del talud
- Flujos
- **Deslizamientos superficiales (creep)**

Cualquier talud está sujeto a fuerzas naturales que tienden a hacer que las partículas y porciones de suelo próximas a su frontera deslicen hacia abajo. Se refiere esta falla al proceso más o menos continuo, y por lo general lento, de deslizamiento ladera abajo que se presenta en la zona superficial de algunas laderas naturales. El creep suele involucrar a grandes áreas y el movimiento superficial se produce sin una transición brusca entre la parte superficial móvil y las masas inmóviles más profundas. No se puede hablar de una superficie de deslizamiento.

Existen dos clases de deslizamientos: **el estacional**, que afecta solo a la corteza superficial de la ladera que sufre la influencia de los cambios climáticos en forma de expansiones y contracciones térmicas o por humedecimiento y secado, y **el masivo**, que afecta a capas de tierra más profundas, no

interesadas por los efectos ambientales y que, en consecuencia, solo se puede atribuir al efecto gravitacional.

El fenómeno se pone de manifiesto cuando se nota que los árboles y postes están inclinado respecto de la vertical, cuando se evidencian agrietamientos o escalonamientos en el talud, ver **Figura No 4.6**.

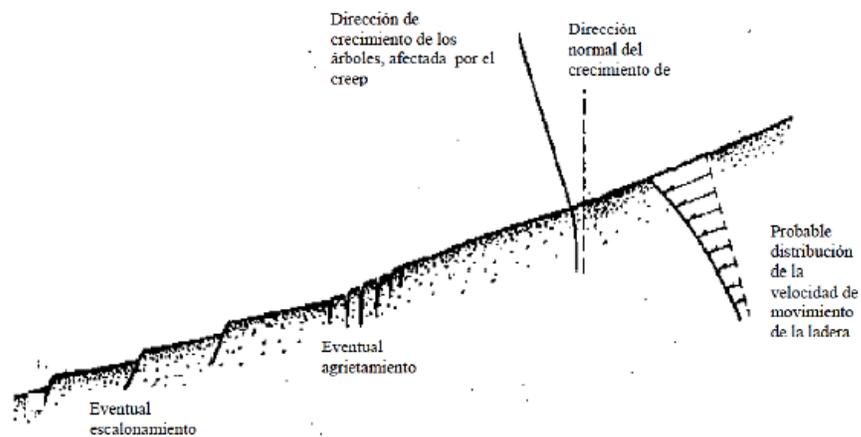


Figura No. 4.6 Indicadores que muestran la presencia de un movimiento superficial (creep)

Fuente: A. De Matteis (2003). "ESTABILIDAD DE TALUDES". Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

➤ **Movimiento del cuerpo del talud**

Puede ocurrir en taludes movimientos bruscos que afecten a masas considerables de suelo, con superficies de falla que penetran profundamente en su cuerpo. Se considera que la superficie de falla se forma cuando en la zona de su futuro desarrollo actúan esfuerzos cortantes que sobrepasan la resistencia al corte del material; a consecuencia de ello sobreviene la ruptura del mismo, con la formación de una superficie de deslizamiento a lo largo de la cual se produce la falla.

Estos fenómenos se los denomina “deslizamientos de tierras” y puede estudiarse dos tipos bien diferenciados:

Fallas por rotación: suceden a través de una superficie de falla curva a lo largo de la cual ocurre el movimiento del talud (ver **Figura No. 4.7**). Esta superficie forma un trazo con el plano del papel que puede asimilarse, por facilidad y sin mayor error a una circunferencia, aunque pueden existir formas algo diferentes, en la que por lo general influye la secuencia geológica local, el perfil estratigráfico y la naturaleza de los materiales.

Este tipo de fallas ocurren por lo común en materiales arcillosos homogéneos o en suelos cuyo comportamiento mecánico esté regido básicamente por su fracción arcillosa. En general afectan a zonas relativamente profundas del talud, siendo esta profundidad mayor cuanto mayor sea la pendiente.

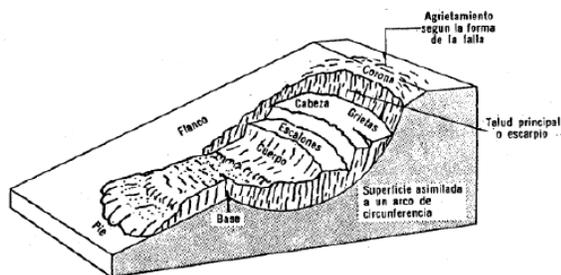


Figura No. 4.7 Nomenclatura de una zona de falla

Fuente: Chavarría, Tatiana y Mendoza L. E. (2017). GUIÓN DE CLASES: “TALUDES”. Cimentaciones T.E. Universidad de El Salvador

Las fallas por rotación se denominan según donde pasa el extremo de la masa que rota (ver **Figura No. 4.8**). Puede presentarse pasando la superficie de falla por el cuerpo del talud (falla local), por el pie, o adelante del mismo afectando al terreno en que el talud se apoya (falla en la base). Cabe señalar que la

superficie de este último tipo de falla puede profundizarse hasta llegar a un estrato más resistente o más firme de donde se encuentra el talud, provocando en este punto un límite en la superficie de falla.



Figura No. 4.8 Tipos de superficie de falla en un talud

Fuente: Mendoza, Lesly. (2016). Guion de clases: "ESTABILIDAD DE TALUDES". Cimentaciones, T.E. Universidad de El Salvador.

Las fallas de traslación: ocurren a través de un plano débil ligeramente inclinado en el cuerpo del talud o en la cimentación. Estas fallas por lo general consisten en movimientos traslacionales importantes del cuerpo del talud sobre superficies de falla básicamente planas, asociadas a la presencia de estratos poco resistentes localizados a poca profundidad del talud. La superficie de falla se desarrolla en forma paralela al estrato débil y se remata en sus extremos con superficies curvas que llegan al exterior formando agrietamientos.

Los estratos débiles que favorecen estas fallas son por lo común de arcillas blandas o de arenas finas o limos no plásticos sueltos. Con mucha frecuencia, la debilidad del estrato está ligada a elevadas presiones de poro en el agua contenida en las arcillas o a fenómenos de elevación de presión de agua en estratos de arena (acuíferos). En este sentido, las fallas pueden estar ligadas también al calendario de las temporadas de lluvias de la región.

Los deslizamientos traslacionales de bloques de suelo o roca sin apenas fragmentarse, sobre superficies únicas en macizos rocosos se han denominado **resbalamientos** (García Yagüe, 1966) o **deslizamientos planos** (Hoek y Bray, 1981). Consisten en el movimiento de un bloque (o bloques) de suelo o roca a lo largo de una superficie de falla plana bien definida. Estos derrumbes pueden ocurrir lenta o rápidamente.

Los deslizamientos planares en macizos rocosos consisten en el deslizamiento como una unidad o unidades (bloques) talud abajo, a lo largo de una o más superficies planas (Ver **Figura No. 4.9a**). También se puede generar una falla de cuña a lo largo de la intersección de dos planos, consistente de uno o varios bloques de pequeño a gran tamaño (Ver **Figura No. 4.9b**)

Los deslizamientos en bloque pueden ser destructivos especialmente en regiones montañosas donde los deslizamientos masivos de roca resultan desastrosos y en muchos casos no pueden ser prevenidos.

Los deslizamientos planares suelen ocurrir en:

- Rocas sedimentarias que tengan un buzamiento similar o menor a la inclinación de la cara del talud.
- Discontinuidades, tales como fallas, foliaciones o diaclasas que forman lagos y continuos planos de debilidad que interceptan la superficie del talud.
- Intersección de diaclasas o discontinuidades que dan como resultado la falla de un bloque en forma de cuña.

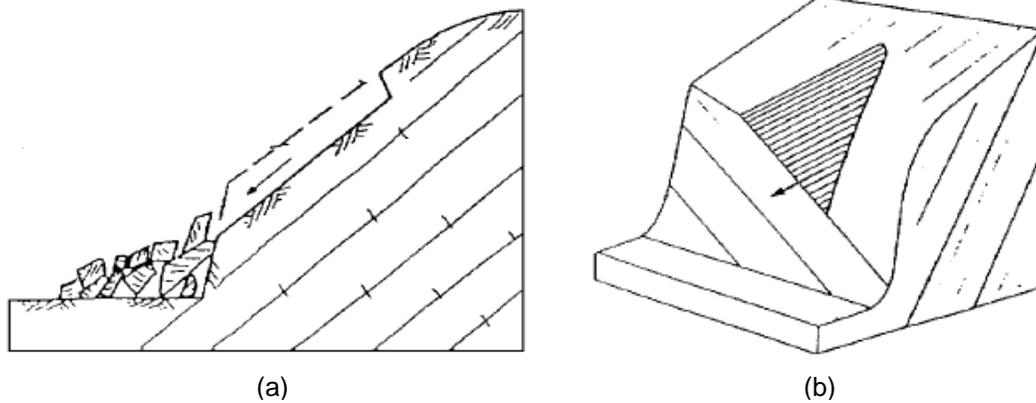


Figura No. 4.9 a) deslizamiento planar en macizo rocoso b) deslizamiento en cuña
 Fuente: Documento: "GUÍA PARA IDENTIFICAR PROBLEMAS DE DESLIZAMIENTO". Capítulo 3.

➤ Flujos

Se refiere este tipo de falla a movimientos más o menos rápidos de una parte de la ladera natural, de tal manera que el movimiento en sí y la distribución aparente de velocidades y desplazamientos se asemeja al comportamiento de un líquido viscoso como se observa en la **Figura No. 4.10**.

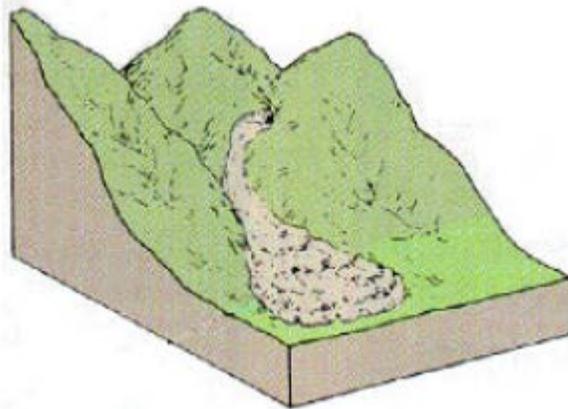


Figura No. 4.10 Flujo de detritos

Fuente: M. Sc. Rolando Mora Chinchilla, documento: FUNDAMENTOS SOBRE DESLIZAMIENTOS.

La superficie de deslizamiento o no es distinguible o se desarrolla durante un lapso relativamente breve. Es también frecuente que la zona de contacto entre la parte móvil y las masas fijas de la ladera sea una zona de flujo plástico.

El material susceptible de fluir puede ser cualquier formación no consolidada, y así el fenómeno puede presentarse en fragmentos de roca, depósitos de talud, suelos granulares finos o arcillas francas; también son frecuentes los flujos en lodo.

Los flujos de tierra (materiales no demasiados húmedos) generalmente ocurren al pie de los deslizamientos del tipo rotacional en el cuerpo del talud. Por lo común estos deslizamientos retienen a la vegetación original, así como la estratigrafía y aspecto general de la formación en la que ocurrió el deslizamiento.

Por lo general, el movimiento de ladera más usual son los flujos de suelo superficial pero también se dan flujos de escombros ver **Figura No. 4.11**, los cuales se inician por circunstancias que no siempre son las mismas (reptación, deslizamiento o derrumbe), por ejemplo una roca puede descansar sobre una sección que con el tiempo se va haciendo inestable (erosión, saturación, meteorización) y durante un evento particular (una lluvia, intervención antrópicas o terremoto) inicia su movimiento que puede tardar o no algún tiempo en que suceda nuevamente. El cambio de uso del suelo, (cambio de vegetación o urbanización), la urbanización de áreas en escarpes donde no hay

servicio de alcantarillado, descargas de aguas lluvias de calles pueden ser un factor que probablemente tengan que ver con que se inicien algunos movimientos de ladera.

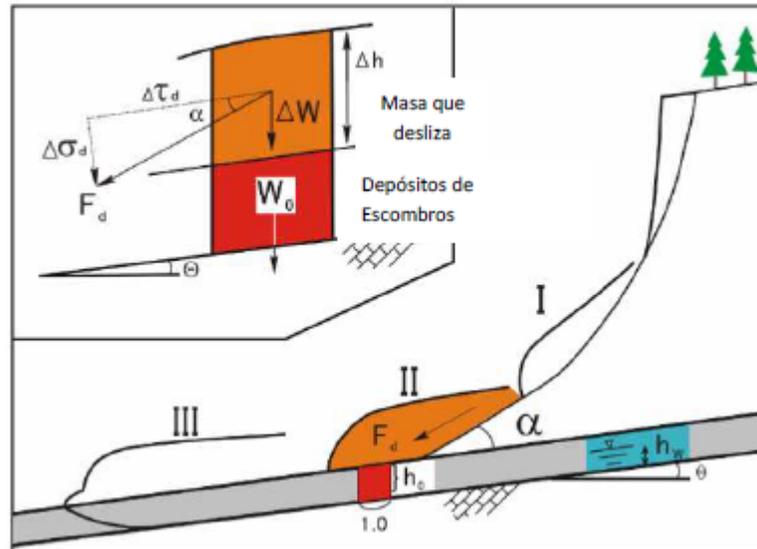


Figura No. 4.11 Pequeños movimientos de ladera que generalmente se transforman en flujos de escombros y arrastran material de la superficie para crecer en volumen.

Fuente: Chávez, Alex (2009), Aspectos a tomar en cuenta para la investigación de movimiento de ladera.

4.4.2.3. MÉTODOS DE ANÁLISIS

Los métodos de análisis para las fallas de talud de deslizamiento de tierras, básicamente consisten en determinar una superficie de falla en la cual puede ocurrir un desplazamiento de la masa del suelo (como un cuerpo rígido), y se comparan las acciones actuantes sobre esta superficie contra la resistencia cortante del suelo en la misma. Al cociente de la resistencia al cortante y las acciones actuantes se le conoce como factor de seguridad, donde la seguridad contra la rotación, es determinado al comparar los momentos resistentes contra los momentos actuantes, y para determinar la seguridad contra la traslación, se

comparan las fuerzas resistentes contra las fuerzas actuantes. Este factor debe ser mayor que la unidad, en la práctica se considera un talud estable con factores de seguridad mayores o iguales a 1.5, sin embargo, esto dependerá de cada caso específico en función de la importancia de la obra y el grado de incertidumbre del diseño³².

En la **Tabla No. 4.18** se presentan algunos métodos de análisis más utilizados para el cálculo del Factor de Seguridad.

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque Delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Arco circular (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi = 0$).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius, 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.

³² Medrano Castillo, Rodolfo Crescenciano. (2002). Mecánica de Suelos II. p. 139, México.

Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, se asume que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

Tabla No. 4.18 Métodos de análisis de estabilidad de taludes
Fuente: Suárez, J. "DESLIZAMIENTOS", Capítulo 4: Análisis de Estabilidad. Colombia.

4.4.3. REVISIÓN DE LINEAMIENTOS Y NORMATIVAS GEOTÉCNICAS

En este apartado, se estudiará algunos lineamientos generales que son recomendados para la elaboración de un estudio geotécnico en un talud, y posteriormente se estudiarán algunas consideraciones mínimas especificadas por diferentes normativas.

4.4.3.1. Lineamientos de literaturas geotécnicas

- **Ubicación de reconocimientos**

Los reconocimientos en un talud deben localizarse en tal forma que se puedan obtener secciones estratigráficas y una regla general es localizar una cantidad mínima de sondeos de la siguiente manera: (Suárez, 2009)

- Un sondeo arriba de la corona.
- Un sondeo intermedio (en el cuerpo)
- Un sondeo en el pie

Estos se deben ubicar a lo largo del talud, de forma que se investigue tanto la zona de coronación como la parte inferior del mismo.

A pesar de que existen diferentes normativas que estipulan el número y profundidad de los reconocimientos, no existe una regla rígida, ya que la definición de la campaña geotécnica depende de la complejidad de la geología y la magnitud de los problemas de inestabilidad. Para una zona donde se sospecha que puede ocurrir un movimiento se sugiere un sistema de cuadrícula para la distribución de los sondeos, como la sugerida en la **Figura No. 4.12**

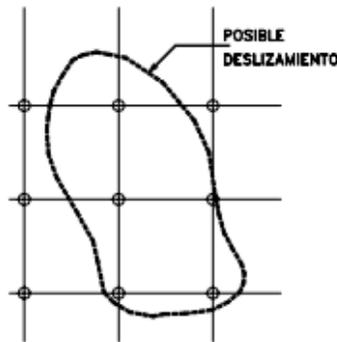


Figura No. 4.12 Localización general sugerida de sondeos para estudios de deslizamientos

Fuente: Suárez, J. (1998). "DESLIZAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN ZONAS TROPICALES". Capítulo 2: Procedimientos de investigación.

- **Profundidad mínima de reconocimientos**

Como regla básica, la profundidad mínima es aquella tal que se pueda obtener información de los materiales que pueden potencialmente causar problemas de estabilidad. En el caso del diseño de un terraplén típico, se recomienda que sea al menos dos veces la altura del terraplén previsto (Ver **figura No. 4.13a**); mientras que, para cortes de carreteras, los reconocimientos deben profundizarse al menos 4.50 m (Ver **figura No. 4.13 b**).

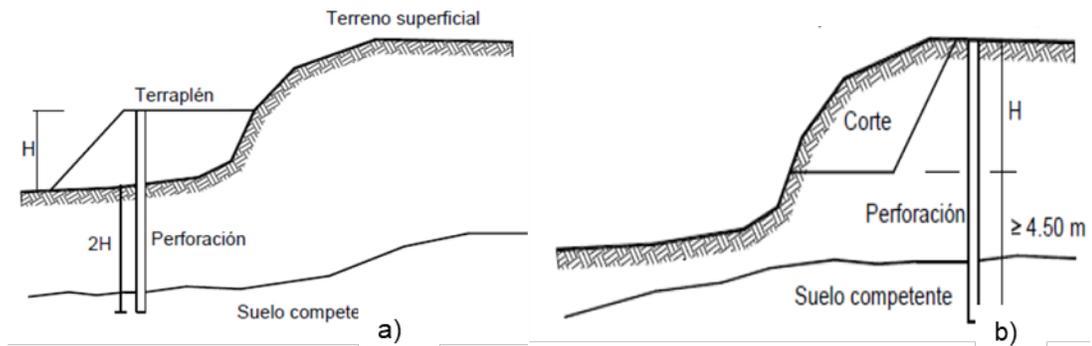


Figura No. 4.13 Profundidad de los sondeos para la construcción de a) un terraplén, b un corte.
 Fuente: Suarez, Jaime. (2009). "DESLIZAMIENTOS". Tomo I: ANÁLISIS GEOTÉCNICO. Editorial: U. Industrial de Santander. p.469

4.4.3.2. Revisión de normativas geotécnicas de taludes

Se describe a continuación en la **Tabla No. 4.19** y **Tabla No. 4.20**, los requisitos mínimos en estudios de suelos de los parámetros geotécnicos de acuerdo a criterios tomados en diferentes normativas:

Normativa	Cantidad mínima	Espaciamiento máximo	Profundidad mínima
<p>Guía de cimentaciones en obras de carretera (España)</p>	<p>En campañas de intensidad normal: (ver Tabla No. 4.21)</p> <p>-Número de perfiles transversales al eje de la obra</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si la longitud de talud (L) < 50 m, 1 perfil. • Si $50 \text{ m} \leq L < 200 \text{ m}$, 2 perfiles. • Si $L \geq 200 \text{ m}$, 1 perfil por cada 100 m o fracción, de longitud total. <p>-Número de puntos por perfil</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si altura de terraplén (H) $\leq 10 \text{ m}$, 2 reconocimientos • Si $H > 10 \text{ m}$, 3 reconocimientos. 	<p>Para exploraciones en situaciones normales, para apoyos de terraplenes y rellenos en general deben espaciarse los perfiles no más de 100 m entre sí.</p>	<p>La profundidad de reconocimiento necesaria para el proyecto de los cimientos de los terraplenes debe ser tal que abarque la zona de rotura de posibles inestabilidades globales. Esa profundidad será la menor de las tres siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Profundidad igual al ancho de la zona de apoyo, cuando se trata de suelos blandos. b) Hasta encontrar un terreno de resistencia suficiente para garantizar la estabilidad. c) Hasta encontrar roca
<p>Código técnico de taludes y laderas de Costa Rica.</p>	<p>Deberá adecuarse a la superficie y extensión de las obras, a la complejidad del terreno (detectada o verificada durante las investigaciones preliminares) y a las particularidades del proyecto o situación.</p>	<p>La ubicación y espaciamiento de las exploraciones dependerá de la superficie y extensión de las obras, así como de la complejidad del terreno.</p>	<p>Se recomienda que al menos la mitad de las perforaciones o cualquiera de las prospecciones realizadas alcancen la profundidad de 1.5 veces la altura del talud o ladera analizada, o bien hasta que a criterio del profesional responsable se alcancen materiales con condiciones geológico-geotécnicas aceptables.</p>

Administración General de Carreteras (FHWA)	<p>Típicamente, perforaciones espaciadas 60 m (200 pies) para condiciones difíciles y 120 m (400 pies) para condiciones normales y con al menos una perforación tomada en cada formación de suelo identificado.</p> <p>Para cortes y rellenos altos, debe haber un mínimo de 3 perforaciones a lo largo de una línea perpendicular al eje de la vía o del talud planeado, estableciendo sección transversal geológica para su análisis.</p>		<p>Para cortes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • En materiales estables, profundizar las perforaciones mínimo 5 m bajo el corte. • En suelos débiles, se debe profundizar a un nivel inferior de materiales firmes o a 2 veces la profundidad de corte, la que ocurra primero. <p>Para rellenos: Profundizar las perforaciones a un estrato duro o a una profundidad de 2 veces la altura del terraplén.</p>
----------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla No. 4.19 Resumen de requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para taludes, recomendados por diferentes normativas

Fuente: autores

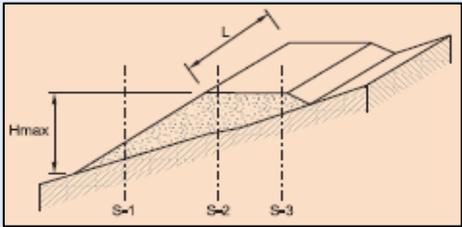
	No. de perfiles transversales al eje de la obra			No. de puntos por perfil		Esquema
	$L < 50 \text{ m}$	$50 \text{ m} \leq L < 200 \text{ m}$	$L \geq 200 \text{ m}$	$H_{\text{máx}} \leq 10 \text{ m}$	$H_{\text{máx}} > 10 \text{ m}$	
Apoyo de terraplenes	1 perfil	2 perfiles	Un perfil por cada 100 m o fracción, de longitud total del terraplén	2 puntos	3 puntos	

Tabla No. 4.20 Número de puntos de reconocimiento recomendados en situaciones normales para taludes

Fuente: Ministerio de fomento, Dirección General de carreteras. (2009) "GUÍA DE CIMENTACIONES EN OBRAS DE CARRETERA". España

4.4.3.3. Lineamientos recomendados por profesionales en el área

Al entrevistar a profesionales con experiencia en el área de taludes, recomiendan los requerimientos detallados en la **Tabla No. 4.21**.

Profesional	Ubicación de perforaciones	Espaciamiento máximo	Cantidad mínima de perforaciones	Profundidad mínima (m)
Profesional 1	En la corona y cuerpo del talud (al pie si es requerido)	15 a 20 m	3 sondeos por perfil	Varía en función de la altura del talud y de las condiciones del suelo, de manera que se definan perfiles que brinden información de las posibles superficies de falla.
Profesional 2	<ul style="list-style-type: none"> Distribuir de manera que pueda conocerse los perfiles, así como también el ángulo de buzamiento de los estratos. Sondeos en el pie, cuerpo y corona del talud. 			
Profesional 3	Sondeos en el pie, corona (si es requerido, en el cuerpo)	15-20 m	3 sondeos por perfil	<p>-Para el sondeo en la corona, alcanzar una profundidad cercana al pie del talud (para taludes de baja altura (<5 m))</p> <p>-Para el sondeo al pie, profundizar por lo menos 6 m.</p>

Tabla No. 4.21 Lineamientos recomendados por profesionales en el área de taludes

Fuente: Entrevista a profesionales en el área

4.5. MUROS DE RETENCIÓN

4.5.1. GENERALIDADES

Un muro de retención se define como una estructura de contención permanente, relativamente rígida, que soporta una masa de suelo. Los muros también se definen como elementos de contención destinados a establecer y mantener una diferencia de niveles en el terreno con una pendiente de transición superior a lo que permitiría la resistencia del mismo, transmitiendo a su base y resistiendo con deformaciones admisibles los correspondientes empujes laterales.

4.5.2. ASPECTOS EN ESTUDIO PARA MUROS DE RETENCIÓN

En esencia el estudio geotécnico para un muro de retención lo que busca es proporcionar toda la información necesaria para el diseño del mismo, además de aportar información sobre las condiciones externas (sobrecargas) a las que puede estar sometida la estructura. Algunos aspectos a considerar en un estudio para muros de retención se abordan a continuación.

4.5.2.1. Características a investigar del suelo

Es necesario conocer las características geotécnicas del suelo que estará atrás, abajo y por delante del muro, algunas de las cuales son: el peso volumétrico, ángulo de fricción interna, cohesión, etc; para lo cual se recomienda realizar ensayos que permitan determinar estas características directamente, como los ensayos de corte directo, pruebas triaxiales, entre otros.

Dichas propiedades deben determinarse hasta una profundidad que permita evaluar el comportamiento del suelo de apoyo por capacidad de carga.

4.5.2.2. Fuerzas actuantes en un muro

Deben conocerse entre otras cosas las fuerzas que actúan sobre la estructura, para lo cual es de vital importancia conocer a detalle las características del suelo que se mencionan en el apartado anterior.

Las principales fuerzas que actúan sobre los muros son las siguientes (ver **Figura No. 4.14**)

- a. El peso propio del muro, (W), que actúa en el centro de gravedad de su sección transversal.
- b. El empuje del suelo (relleno) contra el respaldo del muro (Empuje activo), que trata de hacerlo fallar.
- c. La reacción normal del suelo sobre la base del muro (N).
- d. La fuerza de fricción que se desarrolla entre el suelo y la base del muro (F).
- e. El empuje que el terreno ejerce sobre el frente del muro (Empuje pasivo).

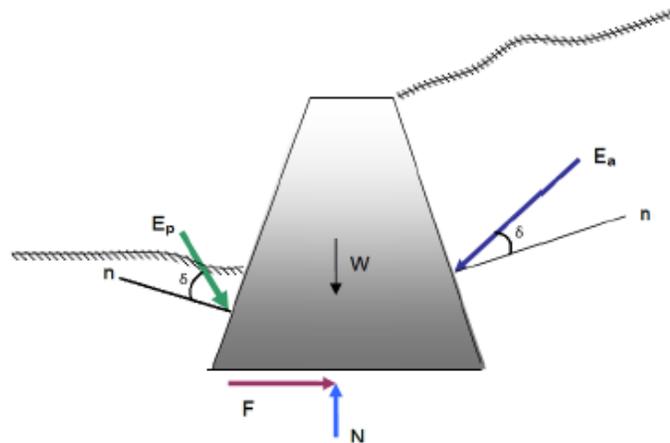


Figura No. 4.14 Principales Fuerzas que actúan sobre un muro de retención

Fuente: Mendoza, Lesly. (2016). Guión de clases: "MUROS DE RETENCIÓN". Cimentaciones, T.E. Universidad de El Salvador.

Existen otras fuerzas que pueden actuar sobre un muro, como las presiones hidrostáticas, sobrecargas externas cercanas, vibraciones debidas al tráfico, fuerzas de impacto, cargas sísmicas, etc.

Entre todas estas fuerzas se encuentran algunas que tratan de hacerlo fallar (fuerzas actuantes) y otras que se oponen (fuerzas resistentes), el análisis de la estabilidad del muro se basa en tratar de equilibrar ambas.

4.5.2.3. Tipos de fallas en un muro

Conociendo la presión lateral del suelo y realizando un pre-dimensionamiento del muro, la estructura como un todo se revisa por estabilidad, se examina para ver si existen fallas posibles por volteo (volcarse respecto a su puntera), deslizamiento (deslizarse a lo largo de su base) y capacidad de carga (fallar debido a la pérdida de capacidad de carga del suelo que soporta la base). Estos diferentes tipos de falla pueden apreciarse en la **Figura No. 4.15**.

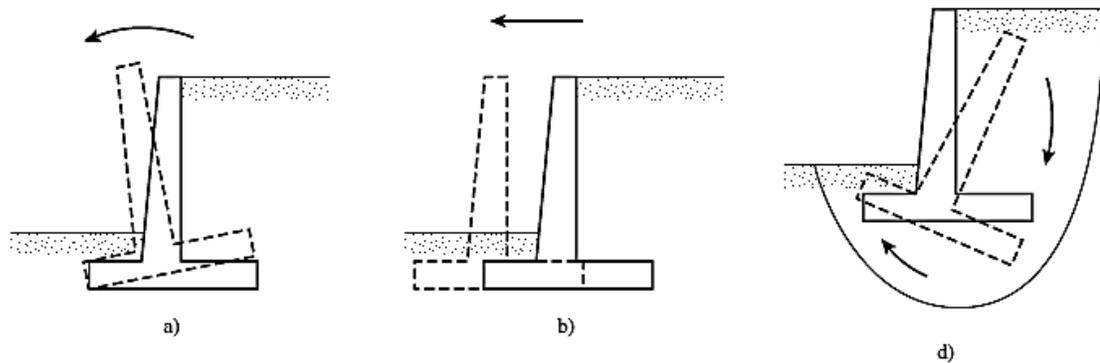


Figura No. 4.15 Posibles fallas de un muro de retención. a) Falla por volteo, b) Falla por deslizamiento, c) Falla por capacidad de carga del suelo

Fuente: Braja M. Das (2012), FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES, Capítulo 8. p.381, Séptima Edición

El análisis de estabilidad consiste, en obtener los factores de seguridad para las dimensiones dadas al muro, y debe hacerse para las condiciones de carga a las que sea sometido: tanto para la condición gravedad, como para la condición gravedad más sismo y compararlos con lo especificado en las normas; deben considerarse siempre las sobrecargas que puedan ejercer otras estructuras cercanas.

En resumen, para muros de retención los estudios de suelos deben enfocarse en identificar todas las características que se consideren necesarias al momento de diseñar la estructura, debiendo establecerse adecuadamente el número, ubicación y profundidad de las exploraciones, que permitan obtener la información pertinente, esto de acuerdo con las dimensiones preliminares del muro de retención y de la función que realice el mismo.

4.5.3. REVISIÓN DE LINEAMIENTOS Y NORMATIVAS GEOTÉCNICAS

Los estudios geotécnicos que se realizan previos a la construcción de estructuras de retención deben cumplir con ciertos requerimientos de acuerdo a algunas normativas que se presentan a continuación.

4.5.3.1. Muros de retención según normativa española

En la “Guía de cimentaciones en obras de carretera”, de la Dirección General de Carreteras, del Ministerio de Fomento, Gobierno de España, en el capítulo 6 “Disposiciones específicas para obras de carretera” se aborda el tema de muros de contención y se mencionan algunos parámetros a considerar para el reconocimiento del terreno; a continuación, se muestran algunas consideraciones que esta norma recomienda.

- **Reconocimiento del terreno**

Los muros de contención son estructuras que entrañan cierto riesgo de rotura por falla del terreno, por lo que suelen exigir un reconocimiento detallado de la base sobre la cual se cimentará y del material que ejercerá empujes sobre la estructura.

El reconocimiento del suelo sobre el cual se cimentará la estructura debe realizarse con ayuda de la cartografía geológica, en primera instancia, y después mediante un reconocimiento de detalle de la zona de apoyo. Este último reconocimiento debe explorar material de la base hasta una profundidad igual o superior a la altura prevista en el muro, salvo que a menor profundidad se compruebe la existencia de roca sana.

Para estudiar y definir la cimentación de los muros de contención, es recomendable realizar los reconocimientos geotécnicos según perfiles transversales al muro. En esos perfiles, se debe explorar el terreno por delante, debajo y detrás del muro para poder preparar las secciones de verificación adecuadamente; es conveniente investigar el perfil correspondiente a la mayor altura de muro y otros perfiles representativos. El número de perfiles a reconocer en detalle será, como mínimo, tres si el muro es de menos de 50 m de longitud y debe incrementarse en un perfil más por cada 20 m de longitud adicionales (Ver **Tabla No. 4.22**). La heterogeneidad del terreno y las dificultades previstas en la cimentación pueden requerir la intensificación de estos reconocimientos mínimos.

No. de perfiles transversales		No. de puntos por perfil			Esquema
Muros	1 perfil por cada 20 m de longitud total del muro	$H \leq 5 \text{ m}$	$5 \text{ m} < H \leq 10 \text{ m}$	$H > 10 \text{ m}$	
		1 punto.	2 puntos	3 puntos	

Tabla No. 4.22 Número de puntos de reconocimiento recomendados en situaciones normales para muros de retención

Fuente: Ministerio de fomento, Dirección General de carreteras. (2009) "GUÍA DE CIMENTACIONES EN OBRAS DE CARRETERA". España

En muros de más de 10 m de altura, la caracterización del cimiento debe realizarse con, al menos, tres puntos de reconocimiento por perfil. Con la ayuda de otras técnicas de reconocimiento (métodos geofísicos) se debe completar e

interpolar la información que se obtenga de los sondeos y de los ensayos de laboratorio que se realicen con las muestras obtenidas.

4.5.3.2. Muros de retención según Administración General de Carreteras (FHWA)

El número, profundidad, espaciamiento, y tipo de sondeos, que deben introducirse en un programa de exploración son tan dependientes de las condiciones del lugar y del tipo de proyecto y sus necesidades, que no podrán establecerse normas "rígidas". Sin embargo, los siguientes "lineamientos" se consideran razonables a seguir para producir el mínimo de información del subsuelo necesaria para permitir diseños y construcciones adecuados. ("Subsurface Investigations" FHWA HI-97-021).

En cuanto al espaciamiento y ubicación de las perforaciones la FHWA recomienda que sean espaciadas cada 30 a 60 m (100 a 200 pies) a lo largo del eje longitudinal de la estructura. Algunas perforaciones deberían ser adelante y otras atrás de la cara del muro.

Con respecto a la profundidad, la FHWA establece que las perforaciones deben ampliarse a una profundidad de 0.75 a 1.50 veces la altura del muro. Cuando la estratigrafía indica que existen problemas potenciales de asentamientos o de estabilidad profunda, se extenderá la perforación a un estrato más firme.

4.6. PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS PARA EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES NIVELES, TALUDES Y MUROS DE RETENCIÓN

4.6.1. ALCANCE Y OBJETIVO

Se pretende elaborar una propuesta que contenga algunos requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención, que podría ser utilizada como una guía para la realización de estos estudios. Esto se realizará apoyándose de algunas normativas geotécnicas y de criterios consultados a algunos profesionales relacionados con el área, a partir de la experiencia y del conocimiento general de los suelos en el país.

Por estudio geotécnico, se entenderá en esta propuesta, específicamente a los reconocimientos o perforaciones realizadas en campo, que permitan obtener la información necesaria para conocer las características más importantes del suelo, y con ellos proyectar, los elementos requeridos, previo a la realización de una obra civil. Por tanto, se propondrán requerimientos relacionados con la ubicación, separación, cantidad y profundidad de estos reconocimientos.

4.6.2. EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES NIVELES

Como ya se ha estudiado en este capítulo, las edificaciones son obras ejecutadas por el ser humano con diferentes propósitos, y es por esto, que existen diversas clases y usos. Para este trabajo, se propondrán los

requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para edificaciones de menos de tres niveles, los cuales se establecen de la siguiente manera:

4.6.2.1. UBICACIÓN Y ESPACIAMIENTO DE RECONOCIMIENTOS

La ubicación de los reconocimientos está, principalmente, en función de la geometría de la edificación y de las características del suelo. De manera general, al menos el 75% de los reconocimientos deben realizarse en la planta de la construcción y es recomendable establecer por lo menos, un reconocimiento en el contorno del emplazamiento.

Además, es importante tomar en cuenta para la ubicación de los sondeos, los siguientes criterios:

- El área que se tiene dispuesta para la construcción: se tratará de cubrir con la ubicación de los sondeos, la mayor área de construcción posible.
- Planos estructurales, de manera que los sondeos se sitúen en zonas donde se tiene previsto, estén concentradas las mayores cargas.
- Si no se tiene disponible la información anterior, se recomienda realizar reconocimientos preliminares, formando triángulos entre los puntos de sondeos dependiendo la forma del terreno (**Figura No. 4.16**), que permitan conocer de forma general las condiciones del suelo mediante la realización de perfiles estratigráficos. A partir de los resultados de estos reconocimientos, puede realizarse una

investigación definitiva, en las zonas donde se requiera conocer de forma detallada las propiedades físicas y mecánicas del suelo, debido a posibles problemas geotécnicos o relacionados con el agua.

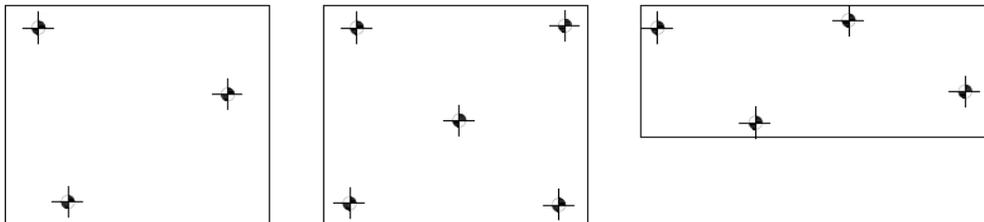


Figura No. 4.16 Recomendación de ubicaciones de perforaciones

Fuente: adaptación de Rodríguez Ortiz, José María. (1989). CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES, cuarta edición, Madrid.

En cuanto al espaciamiento de los reconocimientos, depende tanto de la variabilidad del suelo como del tipo de proyecto a realizar. De manera general, para edificaciones de menos de tres niveles, se recomienda un espaciamiento máximo de 15-20 m. Esto puede modificarse en función de la topografía y de las condiciones preliminares del suelo, tomando en cuenta el número mínimo de reconocimientos especificados en el siguiente apartado.

4.6.2.2. NÚMERO MÍNIMO DE RECONOCIMIENTOS

De manera general, se recomienda realizar entre 3 a 4 perforaciones para viviendas nuevas; en el caso se encuentren condiciones problemáticas en el suelo o si la forma del terreno sea muy irregular (Ver **Figura No. 4.17**), puede requerirse un mayor número de reconocimientos.

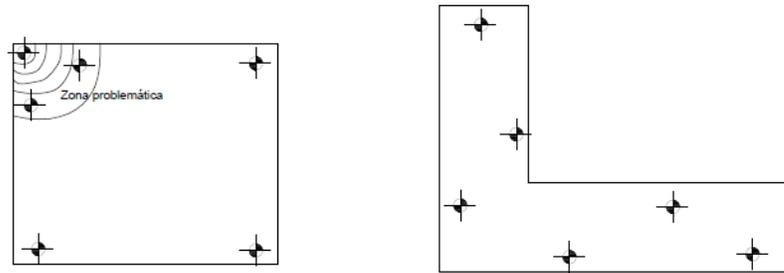


Figura No. 4.17 Número de perforaciones en condiciones especiales del suelo o terrenos irregulares.

Fuente: adaptación de Rodríguez Ortiz, José María. (1989). CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES, cuarta edición, Madrid.

4.6.2.3. PROFUNDIDAD DE RECONOCIMIENTOS

De manera general, esta profundidad debe ser la necesaria para definir el suelo en las zonas donde se emplazará la edificación. Se retomará, además, uno de los criterios estudiados previamente en este capítulo, el cual especifica que los sondeos penetren hasta una profundidad en que el incremento de presiones en el suelo sea igual al 10% de la carga inicial, ya que según la teoría de Boussinesq los esfuerzos, a medida aumenta la profundidad llegan a tener poco efecto en el suelo cuando se consigue ese valor.

Por tanto, esto se ha ejemplificado mediante la aplicación de la teoría de transmisión de esfuerzos de Boussinesq para suelos homogéneos, elásticos e isotrópicos debajo de un área rectangular, considerándose en el análisis una zapata aislada, y la siguiente ecuación: ³³

$$\Delta_{\sigma} = \int_{y=0}^L \int_{x=0}^B \frac{3q_o(d_x d_y)z^3}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} = q_o I$$

³³ Para estudiar más sobre estas teorías, revisar la fuente bibliográfica: Braja M. Das (2007). FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA. Séptima edición. Capítulo 10.

La ecuación anterior puede simplificarse mediante el factor de influencia "I", el cual es determinado a partir de la siguiente ecuación:

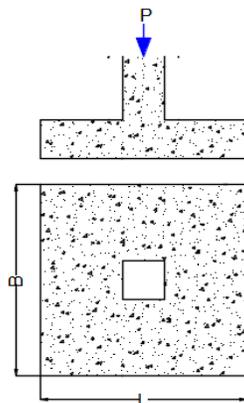
$$I = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \cdot \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 - m^2n^2} \right)$$

$$m = \frac{B}{z} = \frac{x}{z}$$

$$n = \frac{L}{z} = \frac{y}{z}$$

Donde B y L son las dimensiones de la zapata y z es la profundidad de interés.

En la **Tabla No. 4.23** y **Figura No. 4.19** se muestra el cálculo y el gráfico de la razón del incremento del esfuerzo versus profundidad, sometida a un esfuerzo inicial de 15 T/m² en un punto ubicado al centro de la zapata cuadrada, de dimensiones L=B=1.20 m (ver **Figura No. 4.18**).



Dimensiones de la cimentación	
L (m)	1.2
B (m)	1.2
q_0 (T/m ²)	15

Figura No. 4.18 Zapata aislada con dimensiones L=B=1.2 m

Fuente: autores

Profundidad (m)	m	N	I	$\Delta\sigma$ (T/m ²)	$\Delta\sigma / \sigma_0$

0.50	1.200	1.200	0.1958	11.75	0.78
1.00	0.600	0.600	0.1069	6.41	0.43
1.50	0.400	0.400	0.0602	3.61	0.24
2.00	0.300	0.300	0.0374	2.24	0.15
2.50	0.240	0.240	0.0251	1.51	0.10
3.00	0.200	0.200	0.0179	1.07	0.07
3.50	0.171	0.171	0.0134	0.80	0.05
4.00	0.150	0.150	0.0104	0.62	0.04
4.50	0.133	0.133	0.0082	0.49	0.03
5.00	0.120	0.120	0.0067	0.40	0.03
6.00	0.100	0.100	0.0047	0.28	0.02
6.50	0.092	0.092	0.0040	0.24	0.02
7.00	0.086	0.086	0.0035	0.21	0.01

Tabla No. 4.23 Cálculo del incremento de esfuerzos bajo una zapata aislada con dimensiones $B=L=1.20$ m sometida a un esfuerzo de 15 T/m^2

Fuente: autores

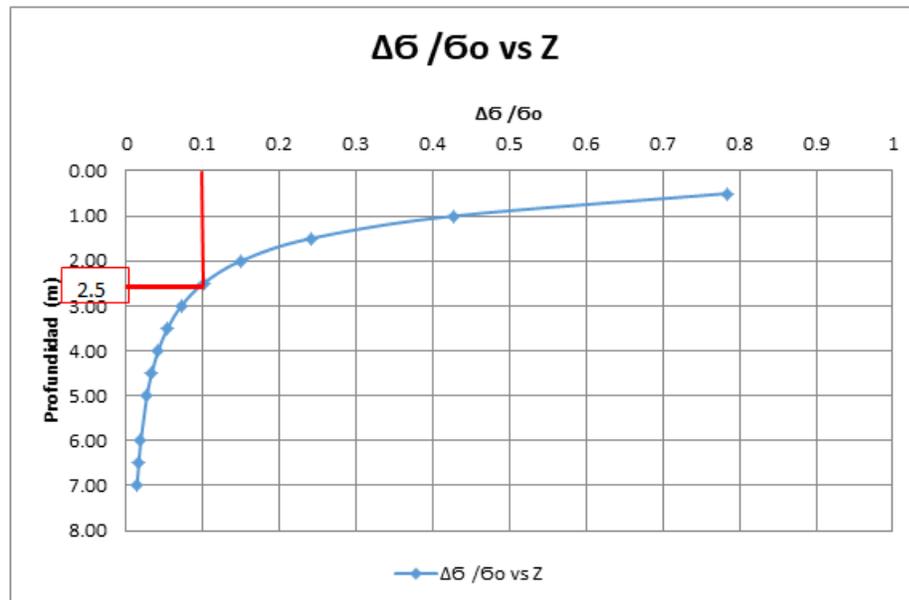


Figura No. 4.19 Gráfico de variación del incremento de esfuerzo con la profundidad, bajo una zapata cuadrada, considerando $B=1.20$ m y sometida a un esfuerzo inicial de 15 T/m^2

Fuente: autores

Del gráfico anterior, puede notarse que a una profundidad de 2.50 m se ha determinado que el incremento de esfuerzo con respecto al esfuerzo inicial (15 T/m^2) es de aproximadamente el 10% para las dimensiones mostradas. Por

tanto, para esas condiciones, el incremento de esfuerzos por debajo de 2.50 m no son considerables según esta teoría. Este mismo análisis se realizó para zapatas cuadradas con dimensiones de B igual a 1.00, 1.50, y 2.00 m, manteniéndose el esfuerzo inicial. Con esto, se comprobó que el 10% se alcanza a una profundidad de aproximadamente 2 veces el ancho de la cimentación.

La **Figura No. 4.20** muestra el comportamiento de la variación del incremento de esfuerzos con la profundidad, para una zapata cuadrada con B=2 m, donde la profundidad a la que se obtiene la razón del incremento de esfuerzos con respecto al esfuerzo inicial (15 T/m²) del 10% es de 4.25 m.

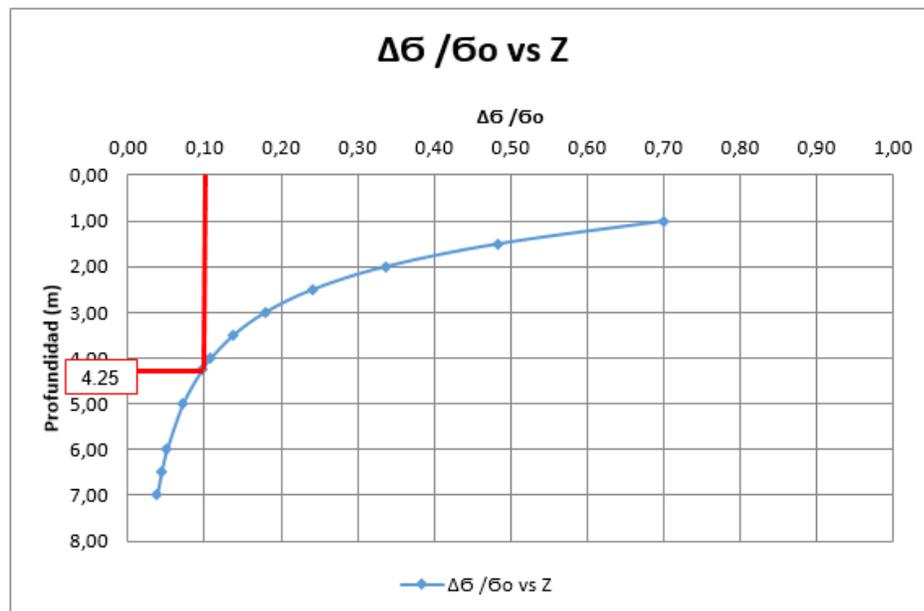


Figura No. 4.20 Gráfico de la variación del incremento de esfuerzo bajo una zapata cuadrada con la profundidad, considerando B=2 m y sometida a un esfuerzo inicial de 15 T/m²
Fuente: autores

Es importante aclarar, que la profundidad obtenida (aproximadamente 2 veces el ancho de la cimentación) es referida a partir de la base de la zapata, es decir,

que no ha sido considerada la cota de desplante proyectada; Por tanto, tomando como ejemplo una zapata de un ancho de 1.20 m y una cota de desplante de 1.50 m, se tiene de acuerdo a la consideración de Boussinesq, que más allá de 4 m el incremento de esfuerzos no son significativos, sin embargo, es necesario verificar que a dicha profundidad se tenga un estrato lo suficientemente capaz de resistir las cargas (estrato resistente) que se van a transmitir y además, asegurar la continuidad del mismo, por tanto puede recomendarse que como mínimo se profundice de 5 a 6 m (a partir de la cota del terreno).

En el caso, que no se encuentre un estrato resistente a la profundidad especificada por Boussinesq, debe seguirse perforando hasta garantizar la continuidad del estrato; mientras que, si el estrato resistente se encuentra a una profundidad menor, de igual forma debe asegurarse su continuidad.

Además, en el caso se requiera que las cargas se transmitan directamente en roca, la profundidad mínima del sondeo dentro de la roca intacta será por lo menos de 3 m.³⁴

4.6.3. TALUDES

Tanto por el aspecto de inversión como por las consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy en día, una de las estructuras ingenieriles que exigen mayor cuidado por parte del proyectista. Es necesario el conocimiento

³⁴ Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos. (1997). Norma técnica para diseño de cimentaciones y estabilidad de taludes (El Salvador)

geológico y geomecánico de los materiales que forman el talud, de los posibles modelos o mecanismos de rotura que pueden tener lugar y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades, a través del cual permita elaborar un diagnóstico de los problemas, lo más preciso posible, aplicando normas y criterios al diseño de taludes.

4.6.3.1. UBICACIÓN Y ESPACIAMIENTO DE RECONOCIMIENTOS

Como regla general (Suárez, 2009) se establece que la ubicación de los reconocimientos en un talud, debe ser de tal manera que sea posible generar perfiles estratigráficos y estos estar situados, dependiendo de la altura y de la longitud del talud, de la siguiente manera: sondeo arriba en la corona, sondeo en el intermedio (en el cuerpo) y sondeo en el pie, tal como se detalla en la

Figura No. 4.21.

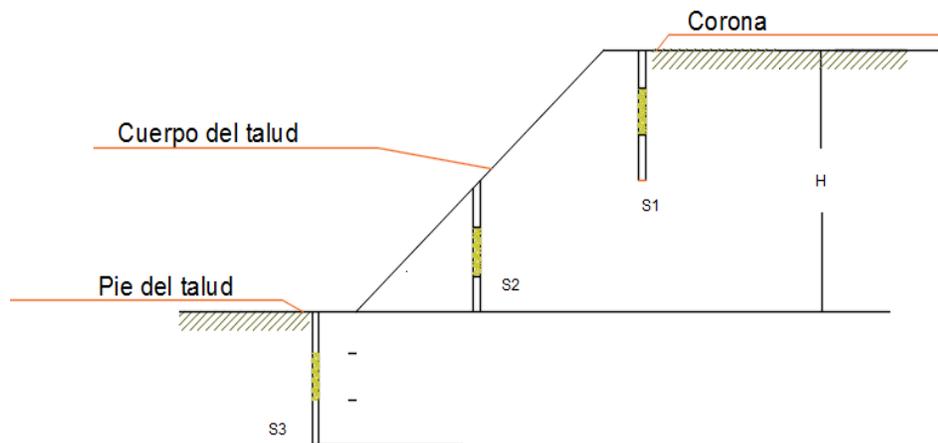


Figura No. 4.21 Esquema de ubicación de sondeos en un talud, donde S1, S2 y S3 representan cada número de sondeo.

Fuente: Autores

Con respecto al espaciamiento, en el caso de taludes en obras de carreteras, se recomienda realizar perfiles transversales al eje de la obra separados no más de 100 m entre sí (retomando el criterio propuesto por la Guía de cimentaciones en Obras de carretera de España).

Sin embargo, esto puede variar dependiendo de la homogeneidad de la fuente del material, propiedades de los suelos, así como también de la topografía del terreno.

En relación a taludes en otras obras civiles, esta separación puede disminuirse de acuerdo a la longitud del talud, las condiciones del terreno y tomando en cuenta las zonas críticas (las zonas más elevadas, dónde haya mayores pendientes o se detecten posibles deslizamientos).

De manera general para cualquier tipo de proyecto, de acuerdo a entrevistas con especialistas, se recomienda que los sondeos en un talud tengan un espaciamiento máximo entre 15 a 20 m, de manera que se puedan generar perfiles entre ellos, tal como se muestra en la **Figura No. 4.22**.

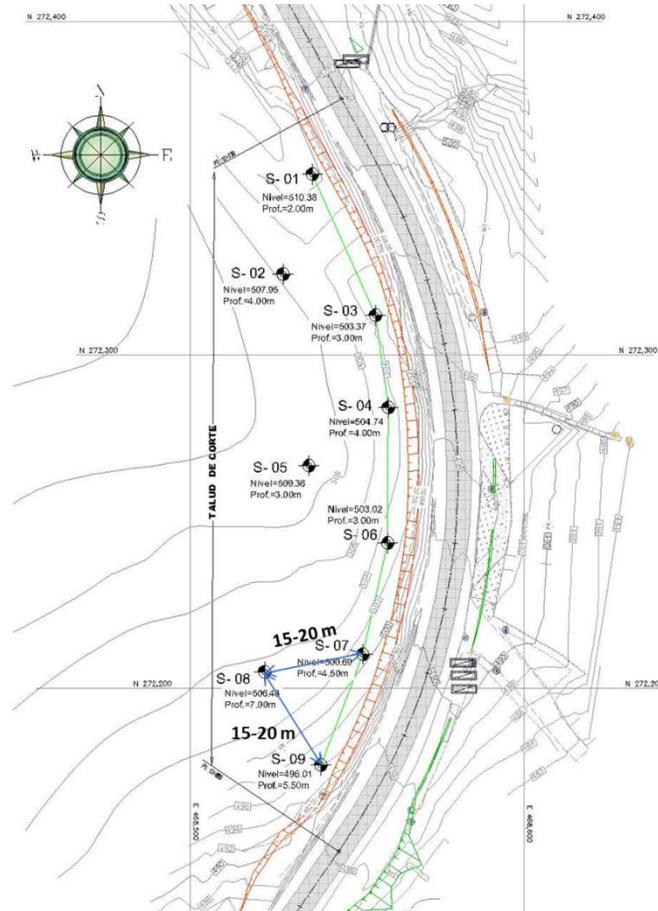


Figura No. 4.22 Ejemplo de distribución y espaciamiento de perforaciones en un talud
Fuente: autores

4.6.3.2. NÚMERO MÍNIMO DE RECONOCIMIENTOS

El número mínimo de reconocimientos está regido principalmente en función de la longitud y la altura del talud. No obstante, así como el espaciamiento, esta cantidad depende tanto de las condiciones particulares del suelo como también en función del tipo de proyecto a realizar.

Por tanto, de lo indicado en la **Tabla No. 4.20**, del **apartado 4.4.3.2** (Revisión normativas geotécnicas de taludes) puede ser retomado como una guía

aplicable en obras de carreteras, en la cual, se recomienda que el número mínimo de perfiles transversales al eje de la obra sea como sigue:

- Para taludes con una longitud menor a 50 m se recomienda realizar un perfil.
- Para taludes de longitud entre 50 y 200 m, realizar 2 perfiles.
- En taludes con una longitud mayor a 200 m, realizar un perfil por cada 100 m o fracción, de la longitud total del terraplén

En cuanto a la cantidad mínima de sondeos, puede retomarse de igual forma la normativa española, la cual establece el número mínimo de perforaciones por perfil en función de la altura máxima del talud:

- A una altura máxima del talud ≤ 10 m, realizar 2 puntos por perfil*.
- En taludes de altura máxima > 10 m, realizar 3 puntos por perfil.
- *Se recomienda que, en zonas críticas, donde se detecte posibles deslizamientos o en los puntos más elevados del talud, se realicen de igual forma 3 sondeos por perfil, aunque este tenga una altura menor a 10 m.
- En el caso de taludes con una altura menor a 10 m, los dos puntos deben ubicarse de acuerdo a las recomendaciones dadas en el **apartado 4.6.3.1** dependiendo la geometría del talud y de las condiciones del terreno; mientras que, el caso contrario, los sondeos pueden ubicarse de acuerdo a lo mostrado en la **Figura No. 4.21**.

- Así mismo en áreas en donde se encuentre suelo blando o suelos orgánicos expansivos, los sondeos podrán tener distancias menores (mayor número de sondeos) y mayor profundidad a fin de determinar la potencia de dichos estratos.

4.6.3.3. PROFUNDIDAD DE RECONOCIMIENTOS

Una guía para definir la profundidad de los sondeos en cada parte del talud, se indica en la **Figura No. 4.23**, la cual indica que los sondeos en la corona y en el cuerpo del talud, deben profundizarse por lo menos 0.5 veces la altura del mismo, mientras que, en el pie, debe llegarse hasta un estrato resistente.

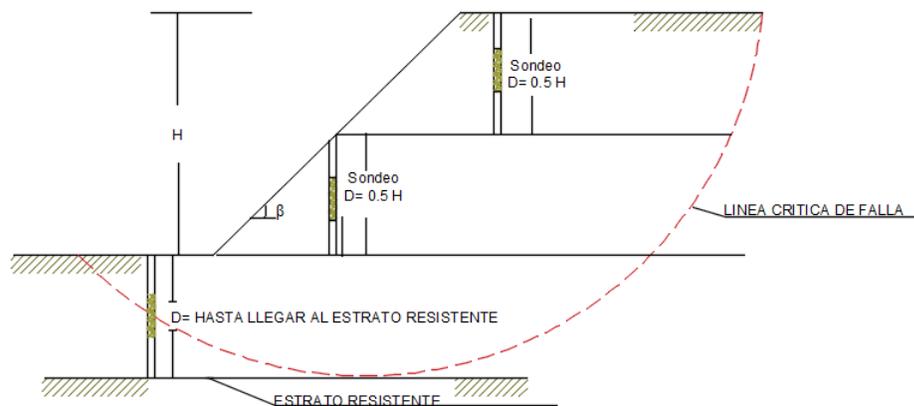


Figura No. 4.23 Profundidad a alcanzar en sondeos ubicados en la corona, cuerpo y pie de taludes.
 Fuente: autores, editada de TESIS: Calderón, N., Chavez, O., Lopez, R. y Perdomo, H. (1993). "GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELO QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y EN EL LABORATORIO, APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL", p.93.

Existe un caso particular en donde la profundidad de reconocimiento en taludes con materiales cohesivos homogéneos, puede estar definida por el ángulo de inclinación del talud (β), a partir de las investigaciones de Taylor, quien

demostró teóricamente que el valor de $\beta=53^\circ$ incide en la localización de la falla más crítica en taludes³⁵, tal como se detalla a continuación:

a) **Si $\beta > 53^\circ$** , la línea de falla más crítica pasa por el pie del talud, por lo tanto, la profundidad del sondeo se establece según la **Figura No. 4.24**.

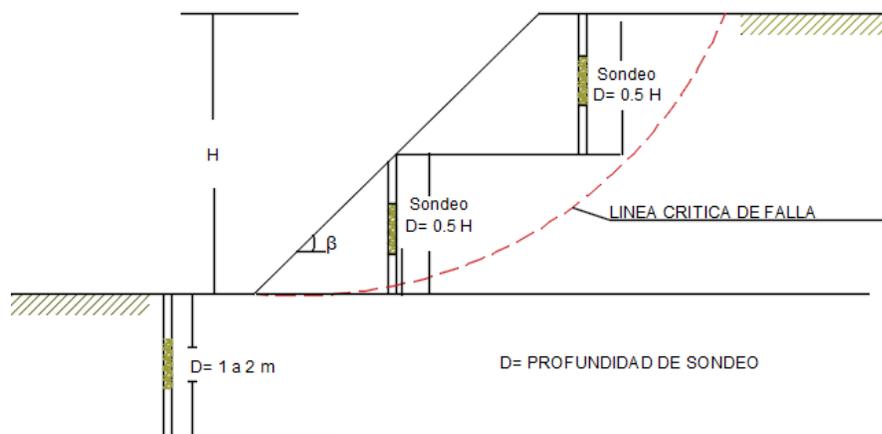


Figura No. 4.24 Profundidad de reconocimientos en taludes con un ángulo de inclinación $\beta > 53^\circ$.
Fuente: autores, editada de TESIS: Calderón, N., Chavez, O., Lopez, R. y Perdomo, H. (1993). "GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELO QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y EN EL LABORATORIO, APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL", p.92.

b) **Si $\beta < 53^\circ$** , la línea de falla más crítica, será tangente al estrato resistente bajo la base del talud, por lo tanto, puede tomarse el criterio de profundidad mostrado en la **Figura No. 4.23**.

Además de los criterios descritos anteriormente, puede recomendarse la profundidad mínima de reconocimientos en taludes, dependiendo del tipo de proyecto a realizar: corte o relleno (terraplén). En el caso se trate de un relleno, la profundidad de los sondeos, estará referida al nivel del terreno; sin embargo, cuando se trate de cortes, debe garantizarse que la profundidad a reconocer

³⁵ Rico, Alfonso. (1976). LA INGENIERÍA DE SUELOS EN LAS VÍAS TERRESTRES. Editorial Limusa. México.

sea la necesaria para determinar las características del suelo que quedaran por debajo del corte. Estos criterios se describen a continuación:

- **Profundidad en taludes de corte**

Tomando en cuenta los criterios de la **Tabla No. 4.19**, de la normativa de la Administración General de Carreteras (FHWA):

- Para suelos estables, debe profundizarse hasta un mínimo de 5 m bajo la profundidad de corte, tal como se ejemplifica en la **Figura No. 4.13a**.
- Para suelos débiles, debe profundizarse a un nivel inferior de materiales firmes o a 2 veces la profundidad de corte, la que ocurra primero.
- Si en cualquiera de las exploraciones realizadas son encontrados macizos rocosos, la profundidad de los sondeos correspondientes puede ser menor, siempre que a la profundidad alcanzada se garantice la continuidad de dichos macizos rocosos.

- **Profundidad en taludes de relleno (terraplén)**

La mejor investigación de detalle consiste en la realización de sondeos que atraviesen la línea de rotura, para poder tomar muestras (incluso de la misma), y estas poder ser ensayadas posteriormente en laboratorio. Es por ello, que para considerar este contexto, se retomará uno de los criterios propuestos en la Guía de cimentaciones en obras de carretera (España), donde especifica que la profundidad de reconocimiento necesaria para el proyecto de los cimientos de los terraplenes en carreteras, debe ser tal que abarque la zona de rotura de

posibles inestabilidades globales. Donde sugiere que la profundidad podrá definirse como la menor de las tres siguientes:

- Profundidad igual al ancho de la zona de apoyo, cuando se trata de suelos blandos.
- Hasta encontrar un terreno de resistencia suficiente³⁶ para garantizar la estabilidad global.
- Hasta encontrar roca suficientemente sana³⁷.

Además, puede también recomendarse los criterios propuestos por el Ing. Jaime Suárez (2009) en la **Figura No. 4.13b**, quien propone que, para un terraplén, se profundice hasta 2 veces la altura del terraplén o hasta llegar a un estrato resistente.

4.6.4. MUROS DE RETENCIÓN

Los muros de contención son estructuras que entrañan cierto riesgo de rotura por falla del terreno, por lo que las perforaciones deben cumplir el objetivo de suministrar información sobre aquellas características que permiten llevar a cabo las predicciones de asentamientos, y que comprende todos los estratos que puedan consolidarse, comprimirse o generar alguna falla bajo el efecto de las cargas transmitidas. Por ello, es importante conocer tanto las características geotécnicas del terreno sobre el cual se cimentará la estructura como del suelo que se colocará tras el muro, y que ejercerá la mayor presión sobre el mismo.

³⁶ Para determinar la “resistencia suficiente”, pueden ser necesarios cálculos previos de estabilidad.

³⁷ Se entiende por roca “suficientemente sana”, aquella cuyo grado de alteración es inferior o igual a las propiedades de una roca ligeramente meteorizada.

4.6.4.1. UBICACIÓN DE RECONOCIMIENTOS

Al realizar estudios geotécnicos previos a la construcción de un muro de retención es necesario ubicar los puntos de exploración de manera que se puedan obtener perfiles transversales al eje del muro, y cada perfil estará compuesto por reconocimientos que permitan explorar las características del terreno por delante, debajo y detrás del muro (ver **Figura No. 4.25**) para poder obtener secciones transversales representativas y adquirir la suficiente información para el diseño del muro de retención.

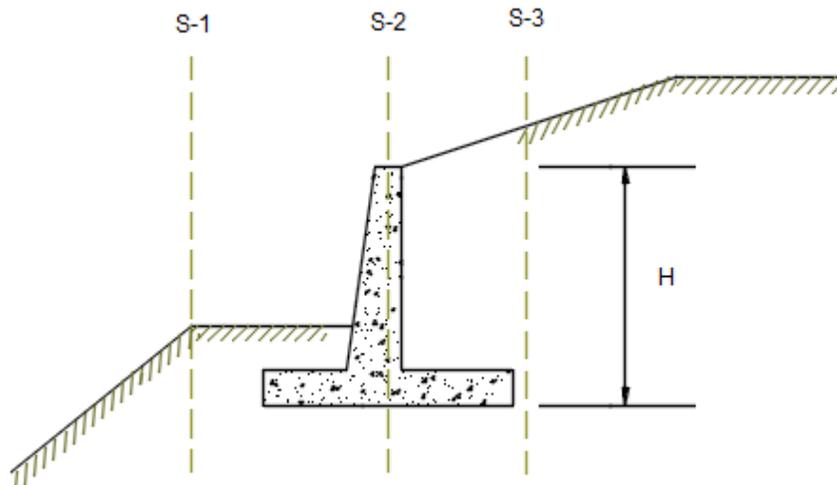


Figura No. 4.25 Ubicación de los sondeos en el pie, en la cimentación y en el trasdós de un muro de retención.

Fuente: Editado de Ministerio de fomento, Dirección General de carreteras. (2009) "GUÍA DE CIMENTACIONES EN OBRAS DE CARRETERA". España

En los casos que solo se requieran dos puntos (Ver apartado **4.8.4.2**) de reconocimiento por perfil se dará prioridad a los puntos por detrás y por debajo del muro de retención.

4.6.4.2. NÚMERO MÍNIMO DE RECONOCIMIENTOS

Para determinar el número de reconocimientos primero se deben establecer cuantos perfiles o secciones transversales al eje del muro se deben obtener, esto de acuerdo con la longitud total de la estructura; y luego se determina el número de puntos de exploración que se requieren por cada perfil, a partir de la altura proyectada del muro de retención, esto se muestra en la **Tabla No 4.24**.

Número mínimo de sondeos para muros de retención		
No. de perfiles transversales	No. de puntos por perfil	
1 perfil por cada 20 m o fracción de longitud total del muro	H ≤ 5 m	H > 5 m
	2 puntos (Atrás y debajo del muro)	3 puntos

Tabla No. 4.24 Número de puntos de reconocimiento recomendados en situaciones normales para muros de retención

Fuente: Modificado del Ministerio de fomento, Dirección General de carreteras. (2009) "GUÍA DE CIMENTACIONES EN OBRAS DE CARRETERA". España

La heterogeneidad del terreno y las dificultades no previstas en la cimentación pueden requerir la intensificación de estos reconocimientos, decisión que será tomada por el ingeniero geotecnista responsable.

4.6.4.3. PROFUNDIDAD DE LOS SONDEOS

Se deben identificar todos los estratos de suelo tras el muro de retención, para determinar la presión que ejercen sobre el mismo, por lo que deben conocerse las características geotécnicas del suelo, se recomienda entonces que las exploraciones se profundicen por lo menos hasta la profundidad proyectada de desplante.

De acuerdo a la FHWA, las exploraciones en la base de la cimentación del muro deben profundizarse entre 0.75 a 1.5 veces la altura del mismo; mientras que, en base en la teoría de la transmisión de esfuerzos en el suelo debido a una carga rectangular uniformemente distribuida, de longitud infinita (zapata corrida) se estima que la profundidad a la que el incremento de esfuerzo es el 20% del esfuerzo inicial es de aproximadamente 3 veces el ancho de la cimentación del muro ($D=3B$) a partir de la cota de desplante (Ver **Figura No. 4.26**); mientras que el 10% se alcanza a la profundidad de 6 veces el ancho de la cimentación.

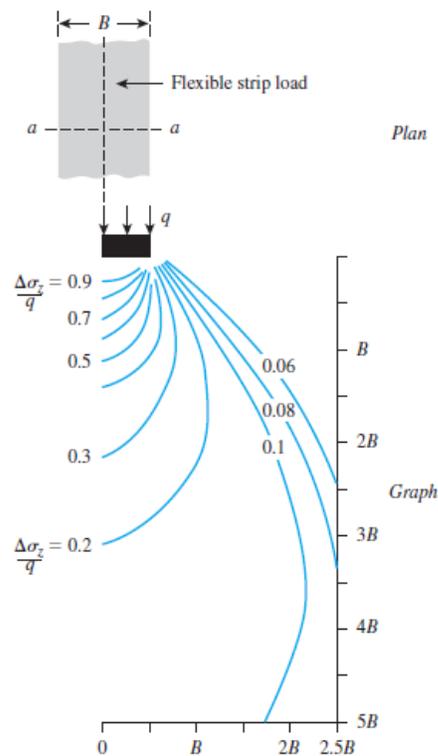


Figura No. 4.26 Isobaras de presión vertical bajo una franja flexible de franja
Fuente: M. Das Braja (2007). FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA. Séptima edición. p. 285

De acuerdo a investigaciones realizadas, para el caso de este tipo de cimentaciones, la profundidad del bulbo de presiones (D_b) se considera hasta la zona donde el incremento de esfuerzos es aproximadamente el 20% del esfuerzo inicial³⁸

Por tanto, se recomienda que para muros de retención debe explorarse en la base a una profundidad de al menos 3 veces el ancho de esta o 1.5 veces la altura del muro, la que resulte mayor, a menos que a menor profundidad se encuentre un estrato resistente y se garantice la continuidad del mismo, o hasta donde el ingeniero geotecnista considere necesario. (Ver **Figura No. 4.27**)

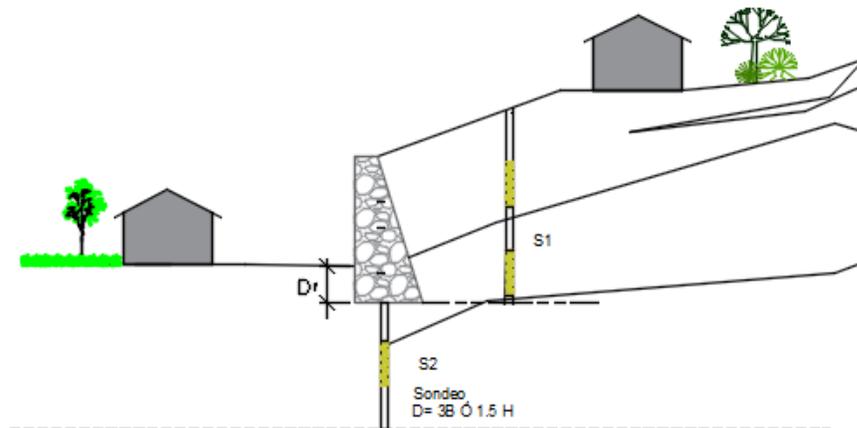


Figura No. 4.27 Profundidad estimada de los reconocimientos en muros de retención.
Fuente: autores

Con respecto a la profundidad de los sondeos ubicados atrás del muro, los profesionales recomiendan que se llegue por lo menos hasta la cota de desplante proyectada del muro, mientras que, para muros que soporten taludes

³⁸ Cruz, L. (2006). CONFERENCIAS DE CURSO DE FUNDACIONES. Facultad de Ingeniería Civil Universidad del Cauca, Popayán. Colombia

con alturas mayores a 10 m, debería realizarse una perforación adicional en la parte alta (corona del talud), de manera que pueda analizarse la estabilidad global del mismo, tal como se muestra en la **Figura No. 4.28**.

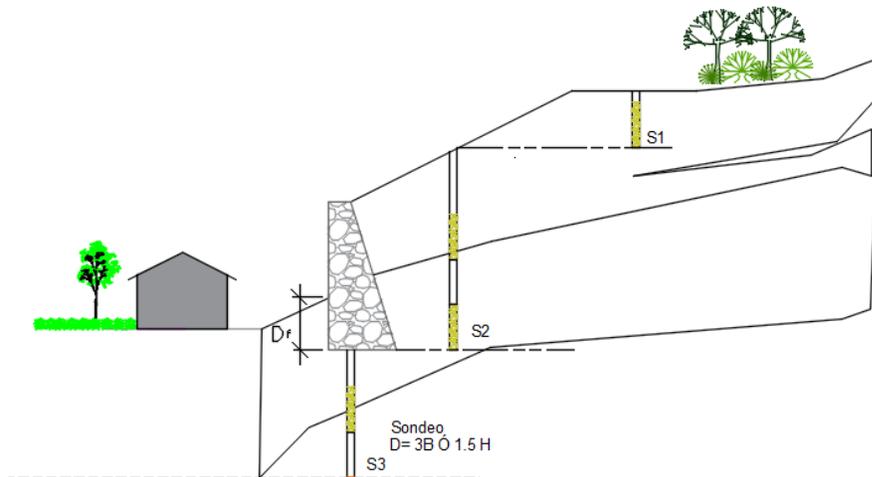


Figura No. 4.28 Profundidad estimada de los reconocimientos en muros de retención de más de 10 m, y soportando taludes.
Fuente: autores

Cuando el profesional responsable de la investigación considere que la información obtenida mediante los sondeos es insuficiente, esta deberá ser complementada con la ayuda de otras técnicas de reconocimiento (métodos geofísicos).

4.7. RESUMEN DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES NIVELES, TALUDES Y MUROS DE RETENCIÓN

A continuación, en la **Tabla No. 4.25**, se presenta un resumen de los requerimientos mínimos que se recomiendan para cada una de las obras civiles estudiadas: edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención.

Elemento	Espaciamiento	Cantidad mínima de perforaciones	Profundidad mínima
Edificaciones de menos de 3 niveles	15-20 m entre sondeos.	3 a 4 sondeos. Aumentar este número en el caso se encuentren condiciones problemáticas en el suelo o el terreno sea muy irregular.	1 nivel, 5 m 2 niveles, 6 m
Taludes	<p>-En obras de carreteras con longitud del talud mayor a 100 m:</p> <ul style="list-style-type: none"> No más de 100 m entre perfiles transversales al eje de la obra. <p>-En obras civiles en general:</p> <ul style="list-style-type: none"> Esta separación puede disminuirse de acuerdo a la longitud del talud, las condiciones del terreno y tomando en cuenta las zonas críticas. De manera general, tener un espaciamiento máximo entre puntos de 15 a 20 m. 	<p>-Para altura del talud menor a 10 m:</p> <ul style="list-style-type: none"> 2 puntos (realizar 3 sondeos en zonas críticas del talud). <p>-Para altura de talud mayor a 10 m:</p> <ul style="list-style-type: none"> 3 puntos por perfil 	<p>-De manera general en taludes:</p> <ul style="list-style-type: none"> Los sondeos en la corona y en el cuerpo, deben profundizarse 0.5 veces la altura del mismo, mientras que, en el pie, debe llegarse hasta un estrato resistente <p>-En materiales cohesivos homogéneos:</p> <ul style="list-style-type: none"> Sondeos en la corona y en el cuerpo a 0.5 veces la altura del talud. Sondeos en el pie: para ángulo de talud ($\beta > 53^\circ$), profundizar hasta 2 m bajo el pie; para $\beta < 53^\circ$, hasta encontrar estrato resistente. <p>La profundidad de los sondeos en el pie también puede definirse de la siguiente manera:</p>

			<p>-Para taludes de corte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 5 m bajo el nivel de corte o hasta encontrar un estrato firme. <p>-Para terraplenes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Profundidad igual al ancho de la zona de apoyo del terraplén. • 2 veces la altura del terraplén o hasta encontrar un estrato de resistencia suficiente. <p>-</p>
Muros	20 m entre perfiles.	<p>-Para altura de muro menor a 5 m:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 puntos por perfil (1 abajo y otro atrás del muro) <p>-Para altura de muro mayor a 5 m:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 puntos (abajo, atrás y delante del muro) <p>-Para muros que soportan taludes mayores a 10 m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realizar un sondeo adicional en la corona del talud 	<p>-Para sondeos en la base</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 veces el ancho de la cimentación o 1.5 veces la altura del muro, la que resulte mayor, esto a partir de la cota de desplante, o hasta encontrar un estrato resistente, garantizando la continuidad del mismo. <p>-Para sondeos atrás del muro</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hasta alcanzar el nivel proyectado de desplante

Tabla No. 4.25 Cuadro resumen de requerimientos mínimos en edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención.

Fuente: autores

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos del mapa de características geotécnicas, de la revisión del contenido de los estudios de suelos y de la propuesta de requerimientos mínimos.

El análisis del mapa de características geotécnicas se realiza por separado para los resultados obtenidos del mapa de compacidad, de las curvas de humedades generadas para época seca y lluviosa y del mapa de tipos de suelos obtenido a partir de las interpolaciones, todo esto para las profundidades de 2 y 5 m.

Luego se revisan los resultados de la evaluación del contenido de los estudios de suelos, realizada a partir de la lista de verificación presentada en el capítulo IV, además se presentan algunos gráficos para facilitar la interpretación de dichos resultados.

Finalmente se revisan algunos criterios propuestos por diferentes normativas y literaturas en la realización de estudios de suelos para edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención, con el objetivo de establecer los lineamientos que se tomaran en cuenta en la propuesta de requerimientos mínimos.

5.2. ANÁLISIS DEL MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

5.2.1. MAPA DE COMPACIDAD

De la información contenida en el mapa para determinar la compacidad del suelo, a las profundidades de 2 y 5 m en el área en estudio (**Figura 5.1** y **Figura 5.2**), es posible definir que las condiciones prevalecientes del suelo en ambas profundidades corresponden a una compacidad mediana (entre 10 y 30 golpes), además, se tiene que a 2 m existe una mayor área de zonas sueltas (menor a 10 golpes) y a 5 m se presenta una mayor área de zonas densas (mayor a 30 golpes).

Este análisis de proporción realizado a las zonas con diferentes compacidades, está relacionado con la cantidad y el porcentaje de puntos que se tienen (Ver **Tabla No. 5.1**) a 2 m y a 5 m.

Profundidad suelos granulares (m)	Compacidad	Cantidad de puntos	Porcentaje (%)
2.00 m (2693 puntos)	Suelta (N<10 golpes)	799	29,67
	Mediana (10<N<30 golpes)	1251	46,45
	Densa (N>30 golpes)	643	23,88
5.00 m (1537 puntos)	Suelta (N<10 golpes)	304	19,78
	Mediana (10<N<30 golpes)	762	49,58
	Densa (N>30 golpes)	471	30,64

Tabla No. 5.1 Porcentajes de zonas sueltas, medias y densas a las profundidades de 2 y 5 m en la zona en estudio.

Fuente: autores

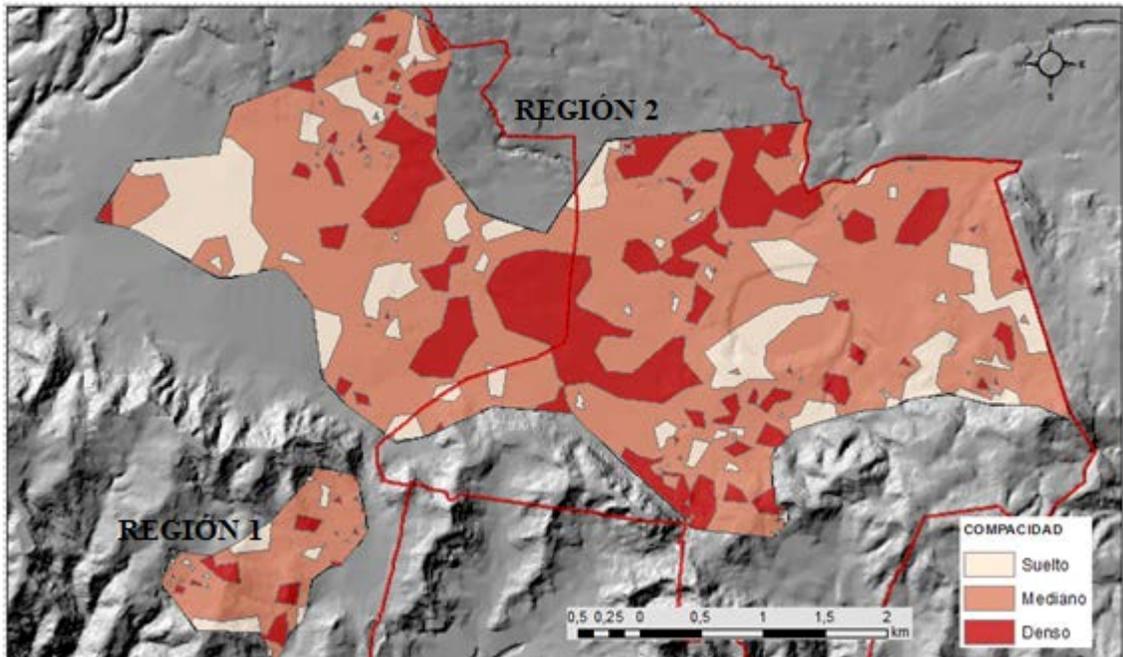


Figura No. 5.1 Mapa de compacidades a la profundidad de 2.00 m (Figura No. 3.14 repetida)
Fuente: autores

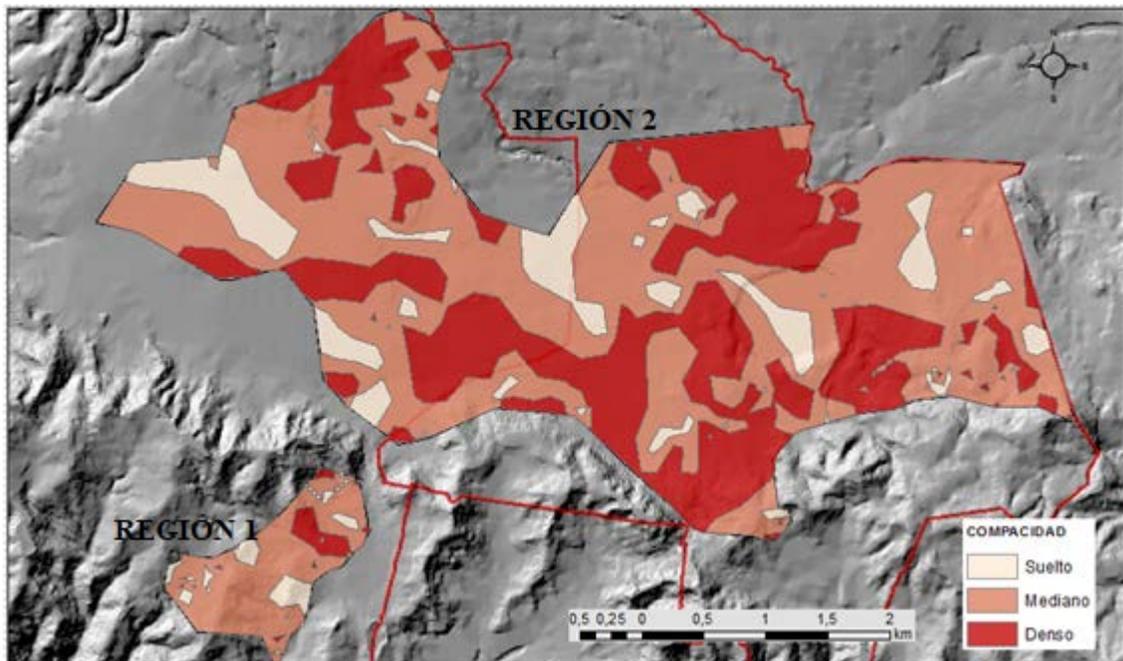


Figura No. 5.2 Mapa de compacidades a la profundidad de 5.00 m
Fuente: autores

En relación a las zonas con compacidad suelta, puede observarse que se mantienen sus localizaciones en ambas profundidades; por ejemplo: en el extremo oeste, extremo central norte, dentro del Maar Plan de la Laguna y en el extremo este de la región 2. Al comparar los resultados de compacidad con las áreas obtenidas a 2 y 5 metros, se puede observar los cambios de compacidad en profundidad, notándose que existen zonas que poseen una compacidad suelta a 2 m, las cuales se convierten en zonas medianas o densas a 5 m, o viceversa. Esto es posible de alguna manera, ya que puede deberse a los diferentes procesos de deposición de los materiales, producidas por erupciones volcánicas u otros fenómenos naturales, o factores antrópicos que tienen una gran influencia en el comportamiento de los suelos.

Al superponer el mapa de compacidad con el mapa de tipos de suelos, se ha observado que algunas de las zonas sueltas corresponden a suelos tipo arenas de escoria o pomíticas, limos arenosos (ML) o en arenas limosas (SM).

En resumen, a partir de las condiciones de compacidad analizadas en el área de estudio, se puede suponer que es adecuado cimentar una estructura superficial para edificaciones de menos de tres niveles, en las zonas con una compacidad mediana o densa (lo anterior no exime la realización de un adecuado estudio de suelos para comprobar las condiciones prevalecientes del mismo).

5.2.2. MAPA DE HUMEDAD

La humedad en el mapa se analizará tomando en cuenta la época (seca o lluviosa) y la profundidad a la que se encuentra registrada tal humedad. Por tanto, se ha elaborado la **Tabla No. 5.2**, en la cual se presenta la comparación de la humedad a 2 m y a 5 m para la misma época y para distintas épocas.

Cuadro comparativo de humedades	
Humedad en época seca	
Humedad a 2 m	Humedad a 5 m
<p>La mayor parte de las regiones en estudio tienen humedades menores al 30%, sin embargo, existen en menor cantidad algunas áreas con humedades mayores al 30%, de las cuales se presentan de manera representativa las que poseen humedades entre 30% y 40% (Ver Figura No. 5.3.)</p>	<p>Al igual que a 2 m, predominan las zonas con humedades menores a 30%; sin embargo, en algunas zonas menos representativas las humedades llegan a ser hasta de un 50%. Las áreas con humedades mayores al 30% aumentan con respecto a las que se encuentran a 2 m, manteniéndose concentradas en posiciones similares en ambas profundidades.</p> <p>Las humedades mayores al 50% se encuentran ubicadas en pequeñas proporciones en la parte sur de la región 1 y en el extremo este de la región 2.</p> <p>(Ver Figura No. 5.4)</p>
Humedad en época lluviosa	
Humedad a 2 m	Humedad a 5 m
<p>Predominan en ambas regiones las zonas con humedades menores a 30%, las humedades máximas llegan a valores de 50%. Puede notarse, además, algunas áreas</p>	<p>En la región 1 predominan las zonas con humedades mayores al 30% notándose un aumento de estas con respecto a 2 m.</p>

<p>representativas con humedades mayores al 30% (entre 30% y 50%), las cuales se encuentran concentradas en el extremo sur de la región 1; al este, oeste y en la parte central norte de la región 2. Es importante destacar que algunas de las zonas donde se encuentran humedades altas, están cercanas a quebradas. (Figura No. 5.5)</p>	<p>En relación a la región 2, sigue predominando las zonas con humedades menores al 30%, no obstante, hay mayor representación de las zonas con humedades mayores al 30% en relación a 2 m. (Figura No. 5.6)</p>
<p>Comparación entre época seca y época lluviosa</p>	
<p>Humedad a 2 m</p>	<p>Humedad a 5 m</p>
<p>Tanto en época seca como lluviosa, a la profundidad de 2 m, predominan las zonas con humedades menores al 30%, y existen valores máximos de hasta 50%. Además de las zonas predominantes con humedades menores al 30%, pueden notarse áreas que son representativas con humedades entre el 30% y el 40%. Algunas zonas mantienen su humedad tanto en época seca como época lluviosa, mientras que otras, aumentan en 10% al 20% en la época lluviosa.</p>	<p>De manera general, las zonas con humedades mayores al 30% aumentan a 5 m de profundidad, y esto puede notarse con mayor representatividad en la época lluviosa, teniéndose una humedad máxima de un 50%.</p> <p>En la región 2, predominan las zonas con humedades menores al 30% en ambas épocas, mientras que en la región 1 puede notarse un aumento de zonas con humedades mayores al 30% en época lluviosa.</p>

Tabla No. 5.2 Cuadro comparativo del comportamiento de la humedad en la época seca y lluviosa.

Fuente: autores

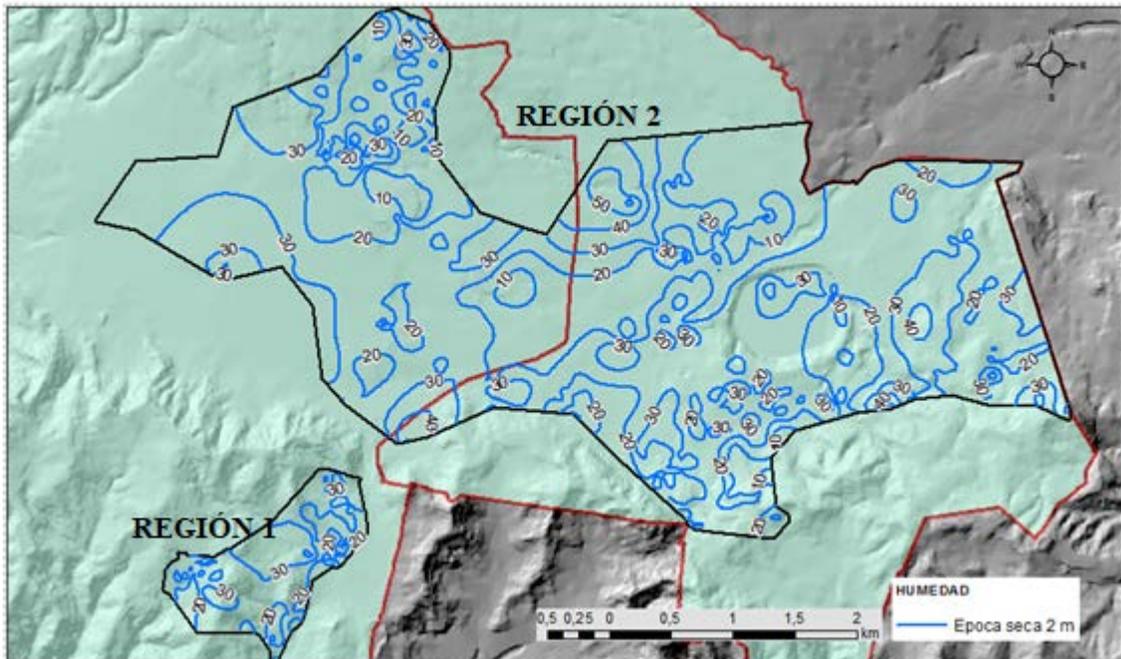


Figura No. 5.3 Isolíneas de humedades a la profundidad de 2.00 m en época seca.
Fuente: autores

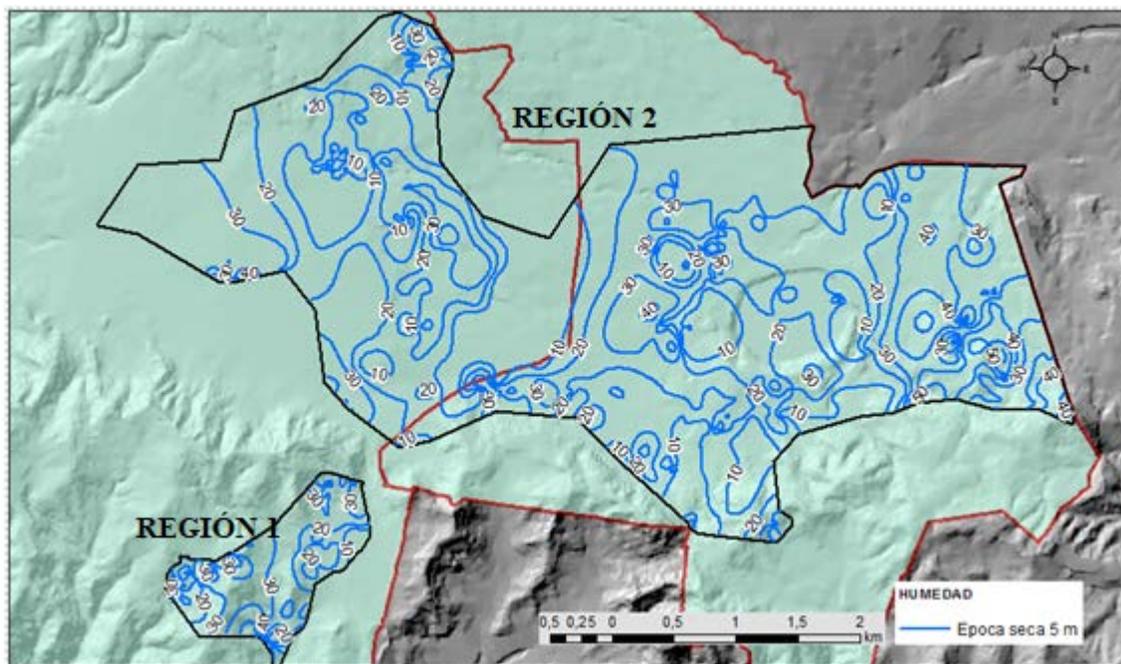


Figura No. 5.4 Isolíneas de humedades a la profundidad de 5.00 m en época seca.
Fuente: autores

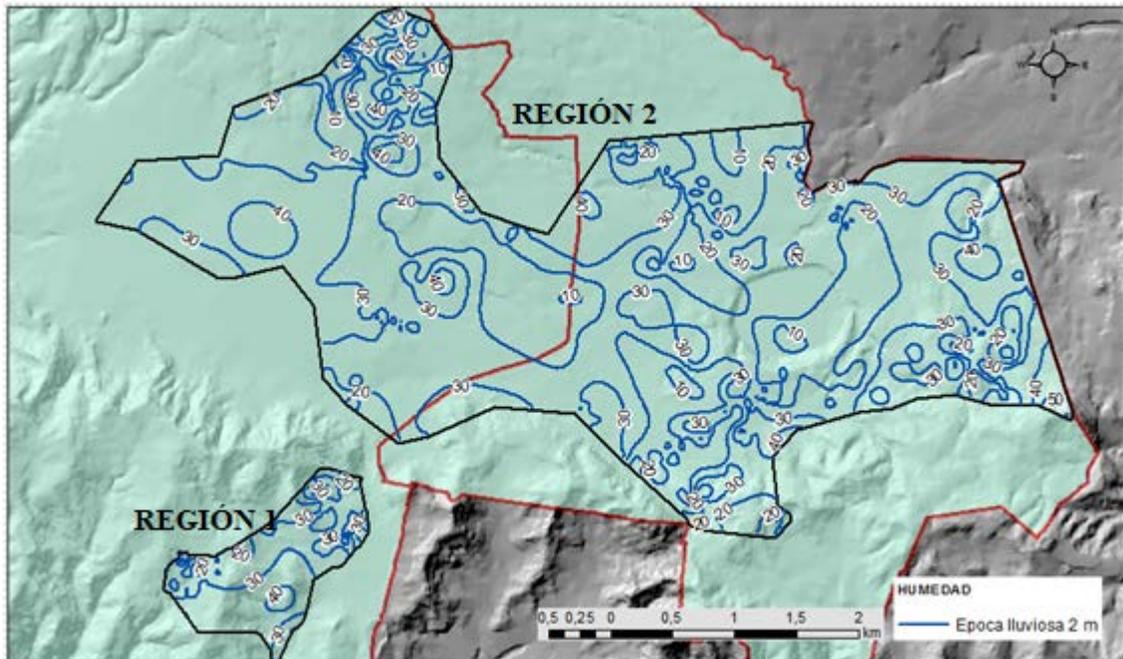


Figura No. 5.5 Isolíneas de humedades a la profundidad de 2.00 m en época lluviosa.
Fuente: autores

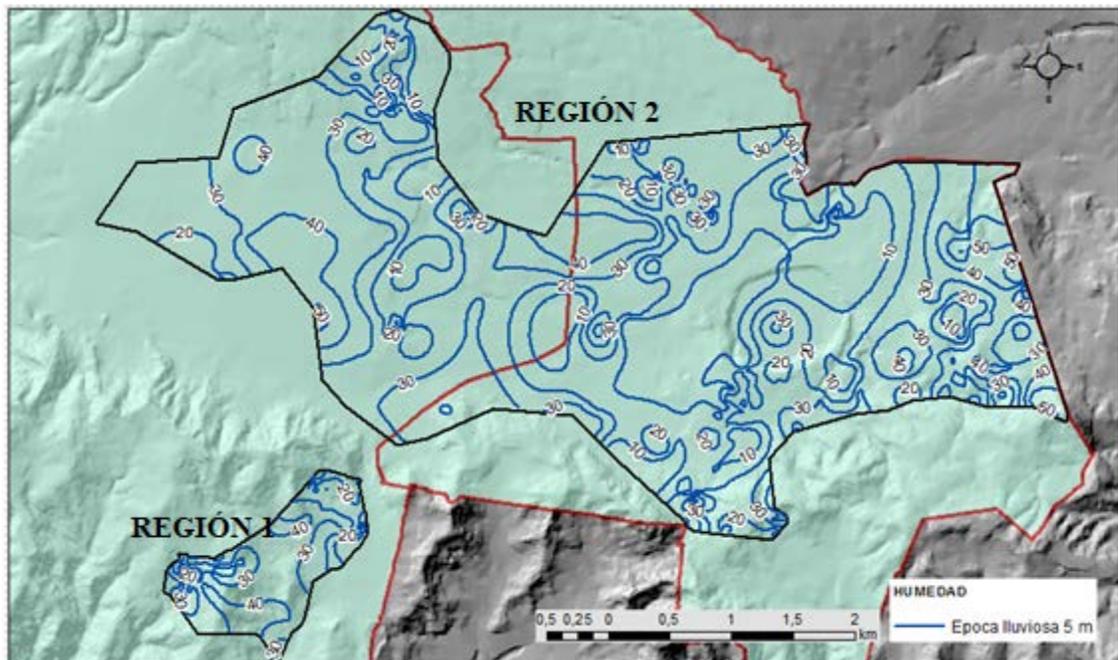


Figura No. 5.6 Isolíneas de humedades a la profundidad de 5.00 m en época lluviosa.
Fuente: autores

5.2.3. MAPA DE TIPOS DE SUELOS

De acuerdo al mapa geológico del AMSS en una escala 1:100,000, la zona en estudio pertenece principalmente a la unidad s4 que corresponde a Tierra Blanca: piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas.

De manera más específica, se tiene el mapa de sectores del Complejo Volcánico de San Salvador caracterizado por secciones estratigráficas compuestas (Ferrés, 2014), el cual se presentó en el **Capítulo No III**, en donde se especifica que el área en estudio pertenece al sector 2. La estratigrafía de este sector está caracterizada por tener estratos superficiales de TBJ con la unidad de Plan de la Laguna subyaciendo a estos; a mayores profundidades, se tienen depósitos provenientes del VSS (unidades B1, G2, G1 de mayor a menor profundidad).

Esta información puede relacionarse con el mapa de tipos de suelos que se ha elaborado (**Figura No. 5.7** y **Figura No. 5.8**), el cual muestra una representación bien definida de cenizas volcánicas clasificadas geotécnicamente como limos arenosos (ML) y arenas limosas (SM), en un 71% a 2 m y un 58% a 5 m; lo anterior se obtuvo de las interpolaciones generadas con los datos disponibles. (Ver **Tabla No. 5.3**)

Profundidad (m)	Tipo de suelo	Porcentaje (%)
2.00 m (2739 puntos)	Limo arenoso (ML)	41.0
	Arena limosa (SM)	30.0
	Arenas (ARENAS)	10.0
	Arena arcillosa (SC)	7.0
	Gravas (GRAVAS)	2.0
5.00 m (1579 puntos)	Limo arenoso (ML)	28.0
	Arena limosa (SM)	30.0
	Arenas (ARENAS)	24.0
	Arena arcillosa (SC)	11.5
	Gravas (GRAVAS)	3.0

Tabla No. 5.3 Porcentajes de tipos de suelos presentados en el mapa de características geotécnicas a la profundidad de 2 y 5 m.

Fuente: autores

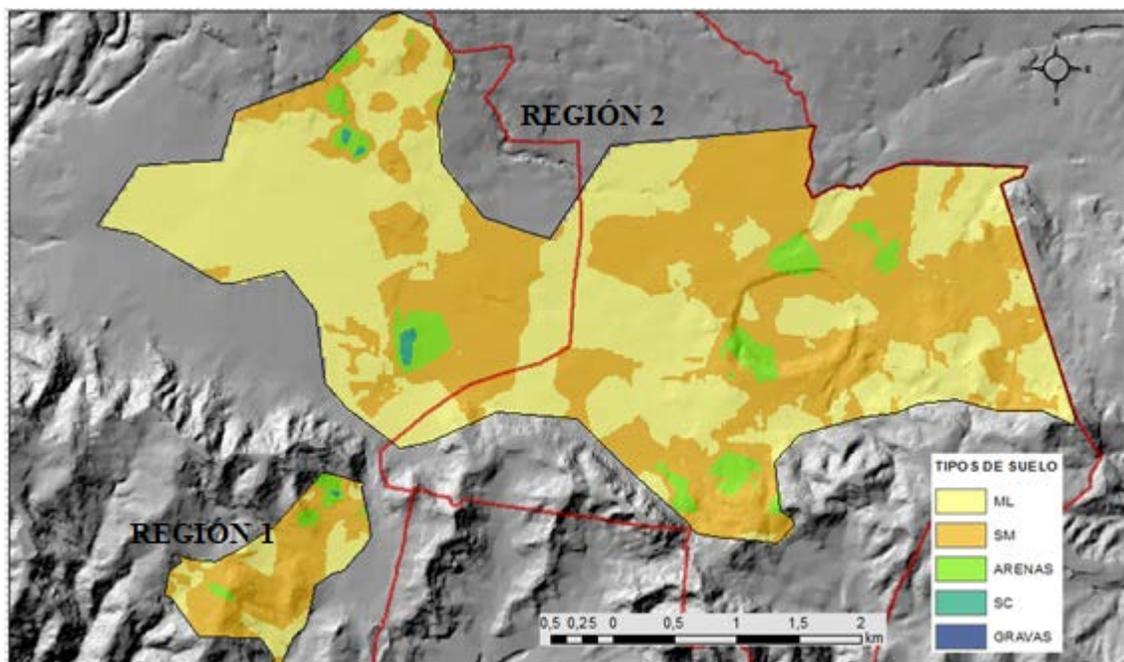


Figura No. 5.7 Mapa de tipos de suelos a 2.00 m de profundidad

Fuente: autores

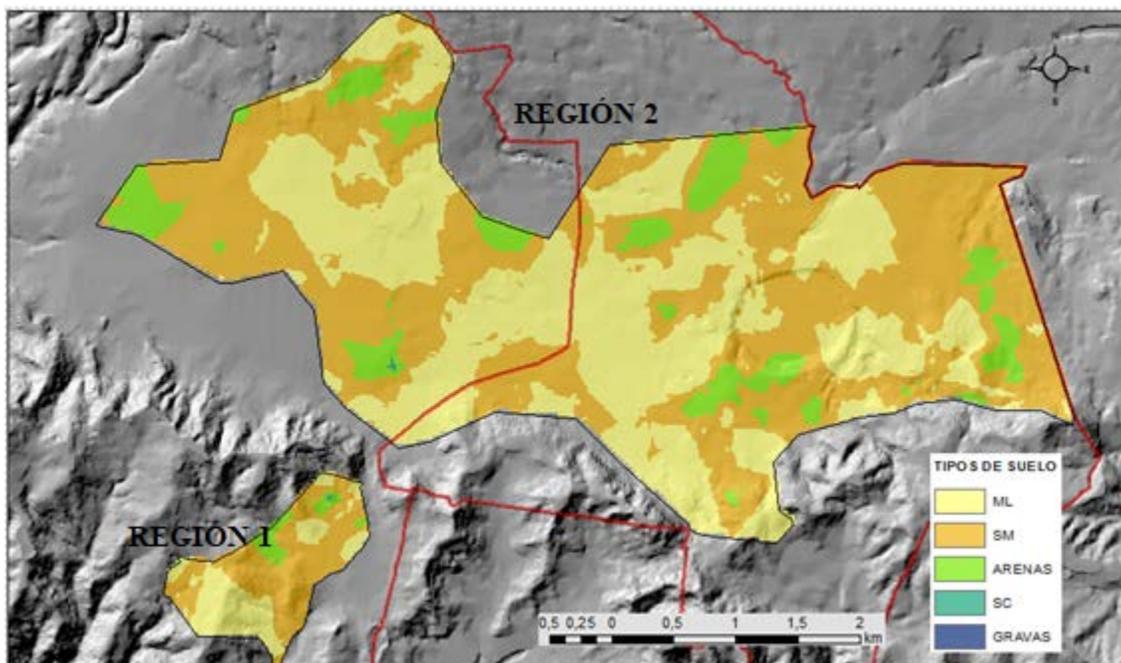


Figura No. 5.8 Mapa de tipos de suelos a 5.00 m de profundidad
Fuente: autores

Cabe destacar que además de los dos tipos de suelos predominantes, hay presencia de arena (ARENAS), en estas se incorporaron todas las clasificadas arenas de tipo escoria o pumíticas (que se encuentran ubicadas de manera dispersa en el área de estudio), ya sean estas bien graduadas o mal graduadas. Esto puede notarse sobre todo a 5 m, ya que existe un porcentaje del 24%, contra un porcentaje de 10% a 2 m.

Además, como se explicó en el capítulo III, las gravas (grava bien graduada y mal graduada) se encuentran en un porcentaje muy bajo, por lo que no logran distinguirse en la interpolación (debido a la escala y a la poca concentración de puntos), sin embargo, puede identificarse que se mantiene la localización de los puntos con este tipo de suelo en ambas profundidades.

5.3. ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE LOS INFORMES GEOTÉCNICOS

Durante el proceso de elaboración del mapa, se observó que la representación y la calidad de la información recolectada a partir de estudios de suelos variaba según los criterios de cada empresa dedicada a la realización de estos estudios; por tanto, se consideró necesario realizar una revisión de su contenido mediante el uso de la guía propuesta en el **Capítulo No. IV (Tabla No. 4.2.)**, que permitió verificar el contenido mínimo que deben presentar los informes geotécnicos. Esta lista de verificación comprende diferentes preguntas orientadas a revisar aspectos referentes a: generalidades del reporte geotécnico (ubicación de la investigación, propósito y alcance, condiciones geológicas de la zona, etc.), perfiles de suelo, registro de las perforaciones de campo, datos de ensayos de laboratorio e información sobre la cimentación estructural. Estos aspectos se revisaron mediante las siguientes opciones:

- Se colocó **“SI”**, cuando se presenta de forma completa todos los requerimientos descritos.
- Se colocó **“NO”** cuando no se presenta ningún requerimiento descrito.
- Se colocó **“I”** cuando la información se presenta de forma incompleta.

Por tanto, se procedió a revisar el contenido de una muestra de estudios de suelos comprendidos entre los años del 2000 al 2010, tomándose una muestra de estudios entre los rangos del 2000-2003, 2003-2006, 2006-2010 de las diferentes empresas que se dedican a la realización de estos.

Es necesario aclarar que los resultados que se muestran a continuación, son producto de la revisión de estudios que corresponden a los años ya detallados y que, por lo tanto, estos resultados podrían diferir en ciertos aspectos en la actualidad.

Además, se realizaron entrevistas en algunas empresas de suelos en el país, las cuales expresaban que la cantidad de información que posea un estudio depende en gran parte del factor económico y de la disponibilidad que tengan los clientes para atender las recomendaciones dadas por la empresa.

A continuación, en la **Tabla No. 5.4** se presenta el instrumento que se utilizó para la evaluación de los estudios, mientras que en la **Tabla No. 5.5** se observan los resultados mediante la representación gráfica y su respectivo análisis.

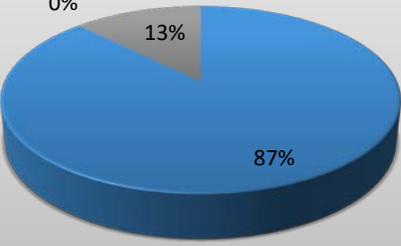
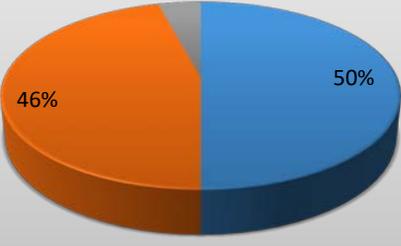
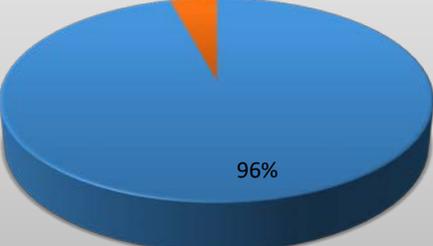
Empresa/Pregunta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Empresa 1	I	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI	I	SI	SI	SI	NO	NO	NO	I	NO	NO	SI	NO	I
Empresa 2	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	I	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	I	NO	NO	SI	SI	SI
Empresa 3	SI	SI	I	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO
Empresa 4	SI	SI	NO	SI	I	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	I
Empresa 5	SI	SI	I	SI	SI	SI	NO	I	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	I	I	NO	NO	NO	I
Empresa 6	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 7	SI	SI	I	SI	NO	NO	NO	SI	SI	I	SI	SI	SI	NO	NO	NO	I	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 8	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	I	NO	SI	SI	SI
Empresa 9	I	SI	SI	SI	SI	SI	NO	I	SI	I	SI	SI	I	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 10	I	NO	I	I	NO	SI	NO	I	SI	I	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 11	SI	SI	I	I	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 12	I	NO	I	SI	NO	SI	NO	SI	SI	I	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 13	SI	SI	I	I	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	I	SI	NO	SI	NO	I	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 14	SI	SI	I	SI	NO	SI	SI	I	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	I
Empresa 15	I	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	NO	SI	I
Empresa 16	I	SI	I	SI	NO	SI	NO	SI	SI	I	SI	SI	SI	NO	SI	I						
Empresa 17	SI	SI	I	SI	SI	SI	NO	SI	I	I	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 18	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	I	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 19	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI
Empresa 20	I	SI	NO	SI	NO	SI	NO	I	I	NO	NO	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 21	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	I	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI	I						
Empresa 22	SI	SI	I	SI	SI	SI	NO	I	SI	I	SI	SI	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 23	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	I	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	I
Empresa 24	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	I	SI	I	NO	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI	I
TOTAL SI	17	22	3	21	12	23	2	12	15	7	17	22	23	3	14	8	8	1	0	20	20	3
TOTAL NO	0	2	10	0	11	1	22	1	7	8	7	1	0	21	10	16	11	21	24	4	4	1
TOTAL I	7	0	11	3	1	0	0	11	2	9	0	1	1	0	0	0	5	2	0	0	0	20

Tabla No. 5.4 Herramienta de evaluación de estudios de suelos³⁹

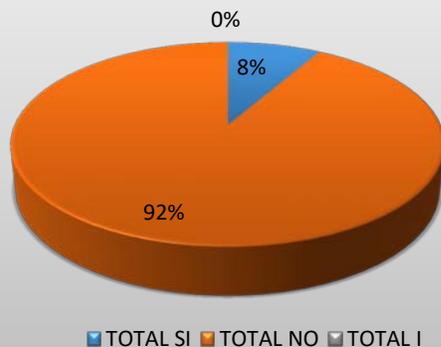
Fuente: autores

³⁹ La pregunta correspondiente al número mostrado en la **Tabla No. 5.4** puede observarse en la **Tabla No. 5.5**.

Generalidades del reporte geotécnico									
Pregunta y gráfico	Análisis								
<p>1 - ¿Se describe la ubicación general de la investigación y/o se incluye un plano de ubicación?</p> <table border="1"> <caption>Data for Question 1</caption> <thead> <tr> <th>Respuesta</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TOTAL SI</td> <td>71%</td> </tr> <tr> <td>TOTAL NO</td> <td>29%</td> </tr> <tr> <td>TOTAL I</td> <td>0%</td> </tr> </tbody> </table>	Respuesta	Porcentaje	TOTAL SI	71%	TOTAL NO	29%	TOTAL I	0%	<p>La mayor parte de los estudios de suelos (71%) describen la ubicación general de la investigación, pero un 29% no presentan un plano de ubicación del lugar, es decir que no se muestran referencias como calles o avenidas que pasan cerca de la propiedad.</p>
Respuesta	Porcentaje								
TOTAL SI	71%								
TOTAL NO	29%								
TOTAL I	0%								
<p>2 - ¿Se resume el alcance y el propósito de la investigación?</p> <table border="1"> <caption>Data for Question 2</caption> <thead> <tr> <th>Respuesta</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TOTAL SI</td> <td>92%</td> </tr> <tr> <td>TOTAL NO</td> <td>8%</td> </tr> <tr> <td>TOTAL I</td> <td>0%</td> </tr> </tbody> </table>	Respuesta	Porcentaje	TOTAL SI	92%	TOTAL NO	8%	TOTAL I	0%	<p>El 92% de las empresas resumen el alcance y el propósito de la investigación a realizar en la parte introductoria del informe geotécnico.</p>
Respuesta	Porcentaje								
TOTAL SI	92%								
TOTAL NO	8%								
TOTAL I	0%								
<p>3 - ¿Se da una descripción del escenario geológico y de la topografía de la zona?</p> <table border="1"> <caption>Data for Question 3</caption> <thead> <tr> <th>Respuesta</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TOTAL SI</td> <td>12%</td> </tr> <tr> <td>TOTAL NO</td> <td>42%</td> </tr> <tr> <td>TOTAL I</td> <td>46%</td> </tr> </tbody> </table>	Respuesta	Porcentaje	TOTAL SI	12%	TOTAL NO	42%	TOTAL I	46%	<p>Un 42% de los estudios no presentan una descripción general de la geología ni de la topografía de la zona; un 46% lo muestran, pero en forma incompleta, es decir, presentan información geológica pero no topográfica o viceversa. La mayoría de este porcentaje corresponde a empresas que describen solamente la topografía</p>
Respuesta	Porcentaje								
TOTAL SI	12%								
TOTAL NO	42%								
TOTAL I	46%								

<p>4 - ¿Están listadas las exploraciones de campo y pruebas de laboratorio, sobre las cuales se basará el informe?</p>  <p>0% 13% 87%</p> <p>■ TOTAL SI ■ TOTAL NO ■ TOTAL I</p>	<p>del lugar.</p> <p>El 87% de los estudios enlistan las exploraciones y las pruebas de laboratorio sobre las cuales se basa el informe.</p>
<p>5 - ¿Se da una descripción general de las condiciones del nivel freático?</p>  <p>4% 50% 46%</p> <p>■ TOTAL SI ■ TOTAL NO ■ TOTAL I</p>	<p>Solamente el 50% de los estudios declaran haber encontrado o no el nivel freático en la investigación. Es necesario dar una descripción general del nivel freático, ya sea que sea encontrado o no, en cuyo caso al menos debe mencionarse que no se alcanzó dicho nivel.</p>
<p>6 - ¿Se presentan los registros de las perforaciones?</p>  <p>4% 0% 96%</p> <p>■ TOTAL SI ■ TOTAL NO ■ TOTAL I</p>	<p>Un 96% de los estudios de suelos brindan hojas de registro de las perforaciones realizadas en campo.</p>

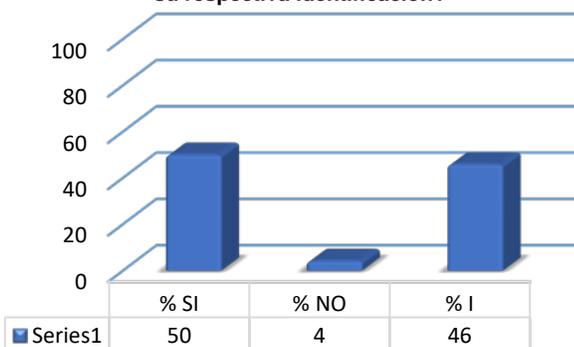
7 - ¿Se agregan fotografías al informe?



Más del 90% de los laboratorios no presentan fotografías de la realización de las pruebas en campo.

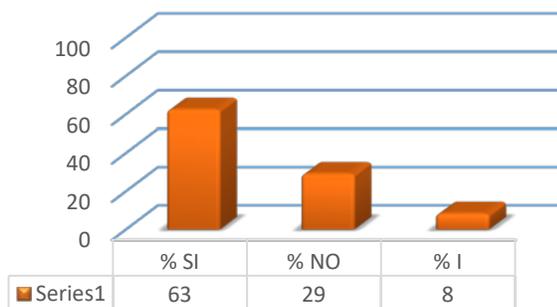
Perfil del subsuelo

8 - ¿Se proporciona un plano con la ubicación de las perforaciones (incluyendo cotas de referencia) y su respectiva identificación?



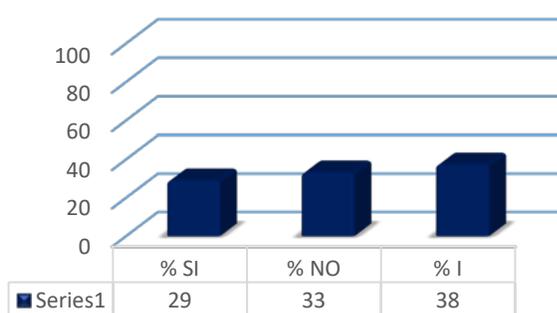
La gran mayoría de los laboratorios brinda información de la ubicación de las perforaciones sobre el terreno, ahora bien, el 50% presenta planos de ubicación de los sondeos de forma completa, pero la otra mitad solo muestra esquemas sin escala o no dan cotas de referencia que permitan ubicar las exploraciones de manera exacta

9 - ¿Se proporciona uno o varios perfiles estratigráficos del subsuelo de la investigación in situ?



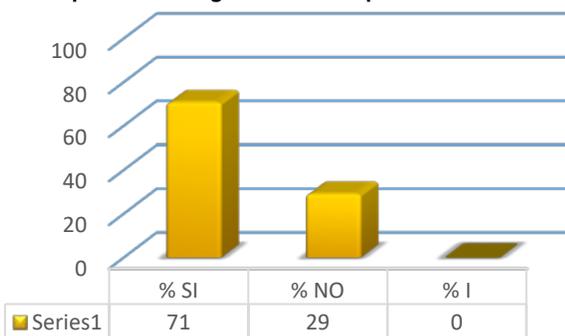
El 29% de las empresas no presentan un perfil estratigráfico, algo que se considera indispensable en un estudio de suelos, pues relaciona los estratos encontrados en los diferentes sondeos (lo que no es posible si solo se presentan columnas estratigráficas individuales) y permite conocer de mejor manera los suelos sobre los cuales se cimentará.

10 - ¿Están dibujadas las exploraciones y correctamente identificadas sobre el perfil, a su verdadera altura y ubicación?



En este caso, el 38% de los estudios se encuentran incompletos, debido a que la mayoría de este porcentaje, no presentan la elevación exacta en msnm de cada sondeo en el perfil, algunos brindan elevaciones con respecto al nivel de la superficie o a un banco de marca conocido al que se le asigna una elevación asumida. En otros casos, no se presenta ningún dato de elevación.

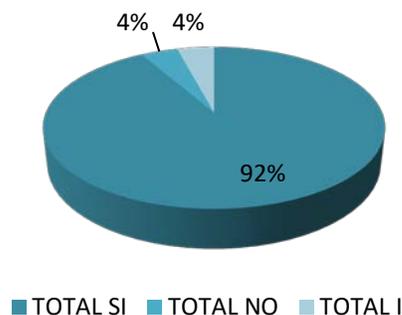
11 - ¿El perfil del subsuelo contiene una descripción (leyenda estratigráfica) y/o representación gráfica de los tipos de suelos?



Todos los estudios de suelos que presentan perfiles estratigráficos cuentan con su propia leyenda para representar los diferentes tipos de suelos y la adjuntan en el informe (no la brindan los informes que no presentan perfiles)

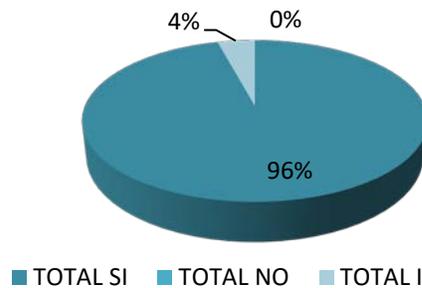
Registro de las perforaciones de campo

12 - ¿Están los tipos de muestras y profundidades registradas?



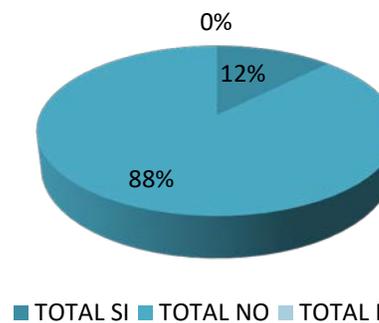
El 92% de las empresas brindan hojas de registros de los datos en campo donde se colocan los tipos de muestras y las profundidades a las que fueron encontradas.

13 - ¿Se muestran en los registros los números de golpes del SPT, humedad y clasificación del suelo?



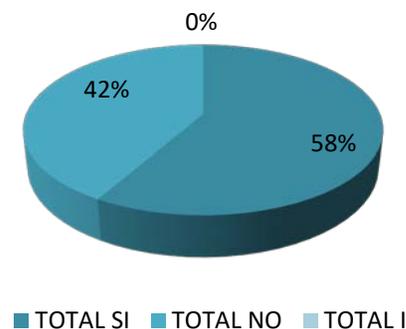
El 96% de los estudios muestran en los registros de campo el número de golpes del ensayo SPT, la humedad y la clasificación de los suelos.

14 - ¿Se han corregido los N de campo?



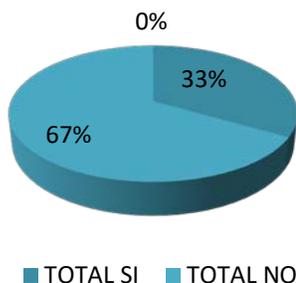
El 88% de las empresas no corrigen el número de golpes del SPT de campo por el tipo de equipo utilizado y por las condiciones de campo, como lo recomiendan la ASTM D 1586 y ASTM D 6066.

15 - ¿Las clasificaciones de los suelos corresponden al SUCS?



El 42% de los laboratorios no se apegan por completo al SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos) a pesar de que manifiestan usar dicho sistema en sus informes, pues alteran el símbolo de la clasificación ya establecida para indicar si los suelos contienen cierto grado de material orgánico, ripio, gravas, entre otras clasificaciones que ellos utilizan de acuerdo a su propio criterio

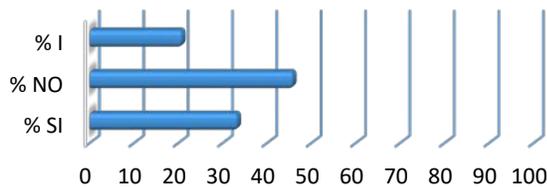
16 - ¿Se ha registrado la longitud de recobro en cada hincada de la cuchara muestreadora, con el fin de poder determinar el peso específico del suelo?



El 67% de las empresas no registran la longitud de recuperación de cada hincada de la cuchara muestreadora en sus hojas de registro de campo.

Datos de ensayo de laboratorio

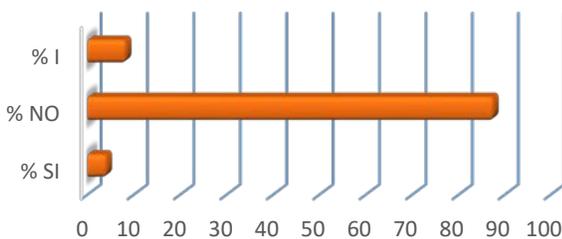
17 - ¿Se presentan las propiedades del suelo como: peso específico, ángulo de fricción y cohesión, mediante correlaciones u otras estimaciones?



	% SI	% NO	% I
Series1	33	46	21

En el 21% de los casos ya sea el peso específico, el ángulo de fricción o la cohesión son estimados a partir de correlaciones o en base a la experiencia y criterios particulares de cada empresa; el 33% estiman las tres propiedades de esa manera, y el resto no son determinados de ninguna forma.

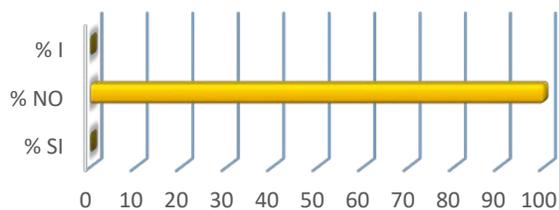
18 - ¿Los ensayos de laboratorio relacionados con la clasificación de suelos tales como la granulometría y límites de Atterberg, fueron realizados para verificar la identificación visual-manual del suelo? ¿Se incluye en el informe los datos de estos ensayos?



	% SI	% NO	% I
Series1	4	88	8

En más del 80% de los casos no se realizaron ensayos de granulometría o de límites de Atterberg, o al menos no se encontró constancia de ello, pues en el medio solo se hace una identificación visual-manual del tipo de suelo

19 - ¿Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar propiedades mecánicas como la resistencia al corte? ¿Se incluye en el informe los datos de estos ensayos?

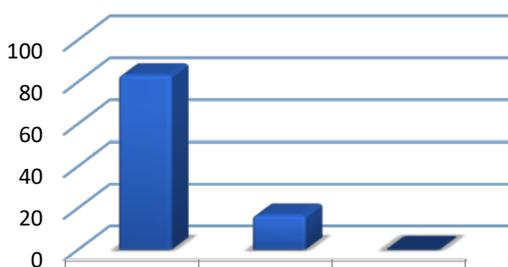


	% SI	% NO	% I
Series1	0	100	0

En ninguno de los estudios revisados se realizaron ensayos de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas de los suelos.

Cimentación estructural

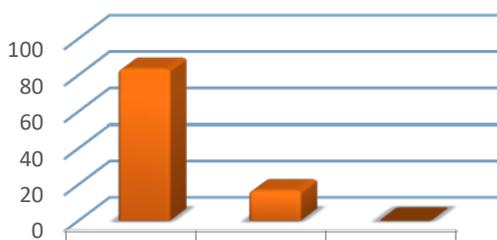
20 - ¿Se recomienda el tipo de cimentación a emplear?



	% SI	% NO	% I
Series1	83	17	0

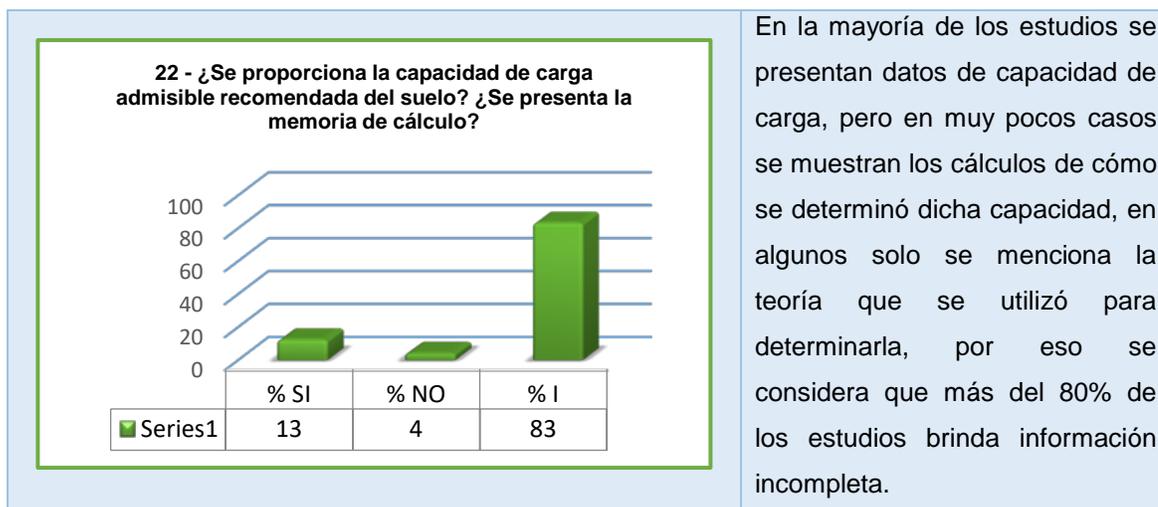
En general más del 80% de las empresas recomiendan el tipo de cimentación a utilizar

21 - ¿Se recomienda la profundidad de desplante?



	% SI	% NO	% I
Series1	83	17	0

El 83% de los estudios de suelos recomiendan una profundidad de desplante de acuerdo con el tipo de cimentación a utilizar o si se requiere restitución de material.



En la mayoría de los estudios se presentan datos de capacidad de carga, pero en muy pocos casos se muestran los cálculos de cómo se determinó dicha capacidad, en algunos solo se menciona la teoría que se utilizó para determinarla, por eso se considera que más del 80% de los estudios brinda información incompleta.

Tabla No. 5.5 Resultados obtenidos de la revisión de los estudios geotécnicos a partir de la lista de chequeo

Fuente: Autores

5.4. ANÁLISIS DE LINEAMIENTOS Y NORMATIVAS GEOTÉCNICAS

En El Salvador se tiene la “Norma Técnica para Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes”, la cual forma parte del “Reglamento para la Seguridad Estructural de las Construcciones”. Esta norma, entre otros aspectos, presenta algunos lineamientos generales para la investigación geotécnica, sobre todo para la profundidad de reconocimiento en edificaciones; sin embargo, establece que la cantidad y el espaciamiento de las perforaciones serán definidos por el especialista en geotecnia y el diseñador estructural.

En relación a los taludes, la norma define solamente criterios básicos para su análisis y diseño, donde establece que previamente al diseño de un talud se debe contar con un estudio geotécnico y este deberá considerar todas las superficies de fallas probables, así como también la localización del nivel

freático, sin embargo, este estudio se deja igualmente a criterio del especialista de suelos de acuerdo a la importancia del talud y las condiciones del lugar.

Con respecto a los muros de retención, en el país actualmente no existe ningún reglamento ni normativa que proporcione lineamientos generales de cómo realizar el estudio geotécnico previo a la construcción de un muro, comúnmente las empresas encargadas de realizar dichos estudios lo hacen en base a literaturas, condiciones del proyecto, su experiencia y criterios particulares de cada laboratorio.

Debido a lo anterior, se hizo necesario la revisión de lineamientos y normativas adicionales, incluyendo entrevistas realizadas a especialistas en el área, con el propósito de constituir una base preliminar de referencia para la definición de la campaña geotécnica, que comprende el establecimiento de los requerimientos mínimos relacionados al espaciamiento, cantidad y profundidad de los reconocimientos enfocados a edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención.

5.4.1. EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES NIVELES

Al realizar la revisión de algunas normativas geotécnicas internacionales, se observó que la mayoría de estas, se fundamentan en dos aspectos principales para establecer los requerimientos mínimos de la campaña geotécnica: el tipo de proyecto (magnitud o categoría de la obra) y la variabilidad del suelo (en algunos casos definida como complejidad geotécnica o tipo de terreno); sin

embargo, existen en algunas literaturas, casos aislados, que definen estos lineamientos en función del ancho del edificio, de la carga total media de la construcción, del número de niveles o sismicidad de la zona.

A pesar de esto, al analizar la información recopilada (lineamientos y normativas) en el capítulo IV y al adaptar algunas condiciones relacionadas a la variabilidad del suelo y al tipo de edificaciones que podrían ser aplicables en el país, se observó que la mayoría de estos requerimientos coinciden de manera general entre las distintas fuentes de información, obteniéndose los siguientes resultados (**Tabla No. 5.6**)

Normativa o lineamiento	Condición	Espaciamiento máximo (m)	Cantidad mínima (sondeos)	Profundidad mínima
Sowers	Ancho de edificio: 30 m			3.5 – 6.0 m
Norma Técnica de El Salvador	Para una y dos plantas.			3.0 – 5.0 m
Norma de establecimientos de salud, El Salvador	Para una y dos plantas.	25	4	$D_f + 4$ m (6 m considerando $D_f=2.0$ m)
Norma Española	Terrenos intermedios (T2)	30	2	6-18 m
Norma Costarricense	Complejidad geotécnica media	40	3	$D_f + 3$ m (5 m considerando $D_f=2.0$ m)
Norma Colombiana	Variabilidad baja del suelo y categoría de edificación normal	-	3	6.0 m

Tabla No. 5.6 Análisis de resultados de lineamientos y normativas geotécnicas para edificaciones de menos de 3 niveles.

Fuente: autores

Adicionalmente a los lineamientos presentados en la **Tabla No. 5.6**, en el **Capítulo No. IV**, se ha realizado un análisis teórico que permita fundamentar la profundidad mínima a la que deben realizarse las perforaciones; el análisis se refiere a la determinación del comportamiento en profundidad de la transmisión de esfuerzos en el suelo, debido a un área rectangular cargada (análogamente a una zapata aislada) mediante la teoría de Boussinesq. A partir de esto, se estimó que la profundidad (referida a partir de la base de la zapata) a la cual el incremento de esfuerzos no tiene mayor influencia (igual o menor al 10% del esfuerzo inicial), es aproximadamente 2 veces el ancho de la cimentación. Sin embargo, se considera necesario que se garantice que a tal profundidad se encuentre un estrato que sea capaz de soportar las cargas que se transmitirán, y en cualquier caso (ya sea el estrato se encuentre antes o después de la profundidad recomendada por Boussinesq), debe asegurarse su continuidad.

Otra de las fuentes consultadas para la propuesta de requerimientos mínimos fueron las entrevistas realizadas a profesionales con experiencia en el área, quienes recomiendan algunos criterios, los cuales guardan bastante concordancia entre los puntos de vista de estos. A continuación, se describen estos:

- Recomiendan que se ubiquen los puntos considerando el área de construcción (que se trate de cubrir la mayor área de construcción

posible) de manera que se puedan obtener perfiles estratigráficos entre los puntos.

- En cuanto a la cantidad mínima de perforaciones, recomiendan que sean como mínimo de 3 a 4 sondeos, haciendo énfasis que puede haber casos especiales en donde se presenten problemáticas en el suelo que requieran mayor densidad de puntos de perforación, con el fin de conocer de manera detallada las características físicas y mecánicas del suelo.
- En relación al espaciamiento máximo, recomiendan que para terrenos naturales que no han sido afectados por edificaciones anteriores o por otros usos, las perforaciones pueden separarse hasta 35 m; mientras que para terrenos que hayan sido previamente afectados por tales condiciones, los sondeos sean espaciados entre 15-20 m.
- Para la profundidad mínima se recomienda que, para un nivel, se profundice al menos 5 m; para dos niveles, de 6-8 m o hasta que se encuentre un estrato resistente.

5.4.1.1. Requerimientos mínimos propuestos

En base a lo planteado por las diferentes fuentes revisadas, puede determinarse que, para edificaciones de menos de tres niveles, podría considerarse los siguientes criterios:

- Profundidad mínima de perforaciones: 5 a 6 m.

- Espaciamiento máximo de perforaciones: 15 m a 20 m, tomando en cuenta que al menos el 75% los sondeos estén ubicados en el área de construcción, considerando una distribución de sondeos como lo mostrado en las **Figuras No. 4.16 y 4.17**, de manera que se puedan obtener perfiles estratigráficos.
- Cantidad mínima de perforaciones: 3 a 4 sondeos. Aumentar este número en caso se encuentren condiciones problemáticas en el suelo.

5.4.2. TALUDES

Al realizar un análisis de los criterios que establecen las distintas normativas y consultas con expertos en cuanto a los parámetros mencionados anteriormente se tiene lo siguiente:

5.4.2.1. Ubicación de reconocimientos

En cuanto a la ubicación de reconocimientos la mayoría de las normativas recomiendan realizar 3 sondeos de forma transversal a la longitud del talud, ubicados en el cuerpo, en el pie y en la corona; con el objetivo de generar un perfil estratigráfico, que permita conocer las propiedades físicas y mecánicas existentes del suelo a lo largo del talud, de tal forma que se tengan los suficientes parámetros para analizar la estabilidad de este.

5.4.2.2. Espaciamiento de reconocimientos

En relación al espaciamiento de los reconocimientos, al revisar normativas relacionadas a taludes en obras de carreteras, se recomiendan que los perfiles transversales al eje del talud no se separen más de 100 m entre sí; mientras que, al consultar a expertos en el área, recomiendan que, de manera general para taludes, se realicen sondeos separados entre 15 a 20 m entre sí (pueden estar ubicados en la corona, en el cuerpo o en el pie del talud), en donde se puedan generar secciones estratigráficas a partir de ellos.

5.4.2.3. Número mínimo de reconocimientos

El número de reconocimientos se puede referir al número de perfiles y a la cantidad de sondeos recomendada por perfil.

- **Número mínimo de perfiles**

El número de perfiles está definido en función de la longitud del talud como lo sugiere la Guía de cimentaciones en obras de carretera. Esta recomienda que en taludes con una longitud menor a 50 m se deberá realizar un perfil; para longitudes entre 50 y 200 m, realizar 2 perfiles; y para longitudes mayores a 200 m, se deberá realizar un perfil por cada 100 m o fracción, de la longitud total del terraplén.

- **Número mínimo de sondeos**

Con respecto al número de sondeos por perfil, la mayoría de las fuentes consultadas recomiendan que se haga 3 sondeos, tal como se explicó

anteriormente: en la corona, en el cuerpo y en el pie. Sin embargo, esto depende también de la altura del talud y de las condiciones del suelo observadas en una inspección preliminar.

La normativa española para carreteras, brinda algunos criterios del número de puntos por perfil para terraplenes en función de la altura máxima del mismo. Esta establece que se realice como mínimo dos puntos por perfil para alturas menores a los 10 m, mientras que, para alturas mayores, se deberán realizar 3 puntos por perfil.

De manera general, se recomienda que se realice una inspección preliminar al talud en estudio que permita identificar zonas críticas (en las zonas más altas del talud o donde se esperen posibles deslizamientos). Para dichas zonas, deben ubicarse sondeos en 3 puntos (corona, cuerpo y pie).

5.4.2.4. Profundidad de los reconocimientos

La profundidad de los sondeos depende de su ubicación, por ejemplo: en la corona y en el cuerpo del talud, se ha definido que dicha profundidad sea por lo menos 0.5 veces la altura del talud; mientras que, en el pie, se recomienda que se profundice hasta un estrato resistente.

Para el caso de taludes constituidos por suelos cohesivos homogéneos, los sondeos en la corona y en el cuerpo, pueden profundizarse de acuerdo al criterio establecido en el párrafo anterior; mientras que la profundidad para los

sondeos en el pie, está en función del ángulo de inclinación del talud (β), considerándose los dos casos siguientes:

- Si $\beta > 53^\circ$, se estima que la línea de falla más crítica pasa por el pie del talud, ya que puede observarse que, en esta condición, el talud presentará un mayor ángulo de inclinación, lo que implicaría aumentar la probabilidad que la falla se localice al pie del talud, por tanto, se recomienda que los sondeos en el pie deben llegar por lo menos a 2 m.
- Cuando $\beta < 53^\circ$, se espera que la línea de falla más crítica, será tangente al estrato resistente bajo la base del talud, ya que por ende la inclinación del talud es menor y se esperaría este efecto; es por esta razón que los sondeos en el pie deben llegar hasta un estrato resistente.

Esta condición ha sido considerada como un criterio general, sin embargo, para tener una estimación a detalle de la profundidad de las perforaciones, es aconsejable que este sea aplicado en campo para poder verificar su comportamiento.

Por otra parte, la normativa de la Administración General de Carreteras (FHWA) recomienda la profundidad de los sondeos en un talud de corte en base a dos condiciones: cuando se encuentran suelos estables, la profundidad mínima que se deberá alcanzar es de 5 m bajo la profundidad de corte y en caso contrario al encontrarse suelos débiles, la profundidad que se debe alcanzar está definida como la primer profundidad que se logre alcanzar de los siguientes dos casos:

profundizar a un nivel inferior de materiales firmes o a 2 veces la profundidad de corte.

La Guía de cimentaciones en obras de carretera (España) en relación a la profundidad de reconocimientos en terraplenes, recomienda considerar la menor de las tres siguientes:

- Profundidad igual al ancho de la zona de apoyo, cuando se trata de suelos blandos.
- Hasta encontrar un terreno de resistencia suficiente para garantizar la estabilidad global, para ello pueden ser necesarios cálculos previos de estabilidad.
- Hasta encontrar roca suficientemente sana (aquella cuyo grado de alteración es inferior o igual a las propiedades de una roca ligeramente meteorizada).

Por otra parte, se ha propuesto también tomar en cuenta las recomendaciones del Ing. Jaime Suárez, quien establece que, para terraplenes, debe profundizarse hasta 2 veces la altura del mismo. Además, cabe mencionar que la profundidad de los sondeos puede o no ser menor, siempre y cuando se garantice la continuidad de los estratos hasta encontrar macizos rocosos.

5.4.2.5. Requerimientos mínimos propuestos

Del análisis anterior realizado en la revisión de los lineamientos que sugieren las normativas y especialistas en relación a taludes, pueden considerarse los siguientes criterios:

Ubicación general de sondeos: en la corona, en el cuerpo y en el pie.

Espaciamiento máximo:

- Taludes en obras de carretera: si el talud tiene una longitud mayor de 100 m, se puede considerar la recomendación de la norma española: espaciar los perfiles no más de 100 m.
- Taludes en obras civiles en general: se considera tomar en cuenta la recomendación de expertos en el área, espaciando los sondeos entre 15 a 20 m de acuerdo a la ubicación mostrada en la **Figura No. 4.22** del **Capítulo No. IV**.

Número mínimo de sondeos:

En taludes con una altura menor a 10 m se recomienda obtener dos puntos por perfil, y deben ubicarse en la corona y en el pie del mismo; para taludes con una longitud mayor a 10 m realizar tres puntos por perfil y ubicar cada punto en la corona, cuerpo y pie del talud de manera transversal a este.

De igual forma, Se recomienda que, en zonas críticas, donde se detecte posibles deslizamientos o en los puntos más elevados del talud, se realicen de igual forma 3 sondeos por perfil, aunque este tenga una altura menor a 10 m.

Profundidad mínima de sondeos:

De manera general, se deben profundizar los sondeos en la corona y en el cuerpo al menos 0.5 veces la altura del talud; para los sondeos en el pie, se definen los siguientes criterios:

- Para el caso particular de taludes formados por suelos cohesivos homogéneos, los sondeos en el pie con un ángulo de inclinación del talud $\beta > 53^\circ$ deben profundizarse por lo menos 2 m; para $\beta < 53^\circ$ debe llegarse a un estrato resistente.
- Para taludes de corte: los sondeos se deben profundizar 5 m bajo el corte.
- Para taludes de relleno o terraplenes: las perforaciones deben alcanzar una profundidad igual al ancho de la zona de apoyo o 2 veces la altura del terraplén.
- En cualquier caso, los sondeos en el pie deben profundizarse hasta encontrar un estrato de resistencia suficiente para garantizar la estabilidad global.

5.4.3. MUROS DE RETENCIÓN

Para poder definir nuestra propuesta de requerimientos mínimos en cuanto al estudio geotécnico de muros de retención, se realizó el análisis de los lineamientos que proponen algunas normativas internacionales y tratando de adecuar algunos criterios a nuestro medio se tiene lo siguiente:

5.4.3.1. Ubicación y número mínimo de reconocimientos

En cuanto a la ubicación se observó que la mayoría de literaturas consultadas recomiendan en un principio realizar sondeos donde se proyecta estará la base del muro, esto para conocer la capacidad de carga del suelo de apoyo, que debe ser capaz de soportar las cargas activas que transmitirá el muro de retención; en segunda instancia, se recomienda que se identifiquen las características geotécnicas de los suelos que se encuentran por detrás del muro. En algunos casos, dependiendo la altura del muro, se hará necesario realizar un reconocimiento por delante del mismo.

En relación al número mínimo de sondeos, se menciona que se deben obtener perfiles perpendiculares al eje del muro, cada uno con al menos dos sondeos, cuando la altura del muro sea menor a 10 m, si la altura es mayor a 10 m se debe realizar un tercer sondeo por delante del muro, y los perfiles deben ir espaciados a lo largo del eje longitudinal de la estructura a cada 20 m o fracción, según la Guía de cimentaciones en obras de carretera (Gobierno de

España) y a cada 30 m según la FHWA dependiendo de la longitud proyectada del muro.

5.4.3.2. Profundidad de los reconocimientos

Al revisar los lineamientos que se encontraron en cuanto a profundidad, se observó que según la FHWA recomienda ampliar las perforaciones a una profundidad de 0.75 a 1.5 veces la altura del muro.

Según la Guía de cimentaciones en obras de carretera (España) el reconocimiento debe explorar el cimientado hasta una profundidad igual o superior a la altura prevista en el muro, similar al criterio anterior que propone la FHWA, salvo que a menor profundidad se compruebe la existencia de un estrato resistente.

Con base en la teoría de la transmisión de esfuerzos en el suelo debido a una carga rectangular de longitud infinita (zapata corrida) se estima que la profundidad a la que el incremento de esfuerzo es el 20% del esfuerzo inicial es de aproximadamente 3 veces el ancho de la cimentación del muro ($D=3B$), y de acuerdo algunas investigaciones, para este tipo de fundaciones el efecto del bulbo de presiones es considerable hasta dicho incremento de esfuerzo.

Ahora bien, si comparamos los criterios teniendo en cuenta que para el predimensionamiento de un muro se estima una base de 0.5 a 0.7 veces la

altura del muro ($B = 0.5$ a $0.7H$)⁴⁰, puede observarse que si sustituimos en el factor de $3B$ se tiene que:

$$D = 3B = 3(0.5H) = 1.5H$$

$$D = 3B = 3(0.7H) = 2.1H$$

Es decir que según este criterio debería explorarse al menos hasta una profundidad igual a $1.5 H$ o más, que es similar al límite superior del rango que propone la FHWA (0.75 a $1.5 H$), por lo cual se propone que los sondeos en la base del muro se profundicen hasta alcanzar $3 B$ o $1.5 H$, la que resulte mayor, o en su defecto hasta encontrar un estrato lo suficientemente resistente.

En relación a la profundidad de las perforaciones atrás del muro, al consultar con profesionales en el área, se recomienda que se profundicen al menos hasta la cota de desplante proyectada.

5.4.3.3. Requerimientos mínimos propuestos

Una vez analizados los requerimientos que proponen algunas literaturas y normativas, y tratando de adecuar dichos lineamientos a nuestro país se propone considerar lo siguiente:

- Se recomienda obtener perfiles perpendiculares al eje del muro, espaciados a cada 20 m.
- Realizar al menos dos perforaciones por perfil, si el muro es menor a 5 m de altura, uno en la base y otro por detrás del mismo; realizar una tercera

⁴⁰ Braja M. Das, Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Séptima edición.

perforación por delante del muro si este es mayor a 5 m de altura o en casos especiales en que se requiera mayor información.

- La profundidad de los sondeos en la base de la cimentación deberá ser al menos 3 veces el ancho de la cimentación del muro ($D=3B$) o 1.5 veces la altura del muro ($D=1.5H$), la que resulte mayor, referido a partir de la cota de desplante, salvo que a menor profundidad se compruebe la existencia de un estrato resistente. En relación a los sondeos ubicados en el material de relleno del muro, estos deberán llegar por lo menos hasta la profundidad proyectada de desplante (para conocer los empujes del suelo), tal como se detalla en la **Figura No. 4.27** del **Capítulo No. IV**.
- Cuando se tengan muros que soportarán taludes mayores a 10 m, además de los sondeos en la base del muro, será necesario realizar perforaciones en el relleno (ubicado en el cuerpo del talud) hasta llegar por lo menos a la profundidad de desplante proyectada; también deben realizarse sondeos en la parte alta (en la corona) que lleguen al menos hasta la profundidad a la que se inició la perforación ubicada en el relleno (esto para evaluar la estabilidad global). Para mayor detalle Ver **Figura No. 4.28** del **Capítulo No. IV**.
- En el caso se tengan sobrecargas externas debido a edificaciones, se podrá intensificar estos criterios en función de la magnitud de las cargas a transmitir, de manera que se tenga la información necesaria del suelo para el diseño del muro de retención.

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones alcanzadas a partir de la elaboración del mapa de características geotécnicas y de la propuesta de requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para edificaciones de menos de tres niveles, taludes y muros de retención.

De igual manera, se plantean conclusiones obtenidas en base a la revisión de una muestra de informes geotécnicos, realizados entre los años 2000 al 2010, los cuales se utilizaron como la fuente principal de información para la elaboración del mapa. Es importante recalcar que dicho mapa puede servir de referencia para conocer de manera aproximada la compacidad, humedad y el tipo de suelo existente en las regiones analizadas, sin embargo, este no sustituye un estudio de suelos.

Se incluye, además, las recomendaciones del trabajo de graduación, a partir del estudio y análisis de las temáticas abordadas.

6.2. CONCLUSIONES

6.2.1. MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

6.2.1.1. Mapa de compacidad

- A partir de los resultados obtenidos del mapa de características geotécnicas, puede verificarse que tanto a 2, como a 5 m predominan las zonas con compacidad mediana, que corresponde a un N_{campo} entre 10 y 30 golpes, sin embargo, a 2 m existe una mayor área de zonas sueltas ($N < 10$ golpes), mientras que a 5 m existe mayor área de zonas densas de compacidad alta ($N > 30$ golpes).
- Se estima que el suelo con una compacidad mediana o densa es adecuado para cimentar una estructura superficial para edificaciones de menos de tres niveles.

6.2.1.2. Mapa de humedad

A partir del análisis realizado al mapa de humedad, se concluye lo siguiente:

- A la profundidad de 2 m, tanto en época seca como lluviosa, predominan las zonas con humedades menores al 30%, existiendo en menor proporción algunas zonas con humedades mayores a dicho porcentaje, alcanzando humedades máximas de 50%. De manera general, la humedad aumenta entre 10% y 20% de época seca a lluviosa en algunas zonas.

- A la profundidad de 5 m, en época seca predominan las humedades menores al 30% en ambas regiones; mientras que, en época lluviosa, en la región 1 (ubicada en la zona Bálsamo) predominan las humedades mayores a este porcentaje, alcanzando humedades máximas del 50%.

6.2.1.3. Mapa de tipos de suelos

- En la zona en estudio predominan los suelos de tipo arena limosa (SM) y limos arenosos (ML) con 71% de puntos a 2 m de profundidad y un 58% a 5 m, por lo que la mayor área del mapa se ve cubierta por este tipo de suelos, de acuerdo a las interpolaciones generadas por el software ArcGIS con los datos disponibles.
- A la profundidad de 2 y 5 m se encontró presencia de gravas en algunas zonas dispersas de las regiones en estudio, sin embargo, debido a la poca cantidad de puntos y al método de interpolación utilizado no logran distinguirse claramente en el mapa.

6.2.1.4. Software ArcGIS

De acuerdo a las interpolaciones realizadas en la elaboración del mapa de tipos de suelos, se definió que el método que presenta resultados más confiables y coherentes es el “Kriging”, además es el que se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y geología; en el caso del mapa de compacidad y humedad, el método “Topo to Raster” es el que proporciona los resultados más lógicos.

6.2.2. CONTENIDO DEL INFORME GEOTÉCNICO

Del análisis realizado mediante la revisión de una muestra de estudios geotécnicos correspondiente al área estudiada, elaborados durante el período comprendido entre 2000 al 2010, se concluye:

- Los estudios presentan las siguientes limitaciones: falta de descripción geológica y topográfica, esquemas de distribución de sondeos incompletos, perfiles estratigráficos con información insuficiente, no se corrige el N_{campo} , las clasificaciones no corresponden completamente al SUCS, no se registra la longitud de recobro de la muestra de ensayo, no se realizan ensayos de resistencia al corte, ausencia de una memoria de cálculo de ensayos realizados, así como de la determinación de la capacidad de carga.

6.2.3. PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN EDIFICACIONES DE MENOS DE TRES NIVELES, TALUDES Y MUROS DE RETENCIÓN

6.2.3.1. Edificaciones de menos de tres niveles

La cantidad mínima de perforaciones para este tipo de edificaciones será de 3 a 4, y puede aumentar dependiendo de la complejidad geotécnica; el espaciamiento máximo entre perforaciones será entre 15 a 20 m, y la profundidad mínima a reconocer será de 5 a 6 m o hasta que se encuentre un estrato resistente.

6.2.3.2. Taludes

Para taludes en obras de carreteras (con longitud mayor a 100 m), realizar perfiles transversales espaciados a no más de 100 m entre ellos, realizando 2 sondeos por perfil para taludes menores a 10 m, y 3 para alturas mayores a esta.

En el caso de taludes para obras civil en general, los sondeos deben espaciarse entre 15 y 20 m distribuidos a lo largo del mismo mediante sondeos en la corona, cuerpo y pie. Con respecto a la profundidad de exploración en la corona y el cuerpo, debe profundizarse al menos 0.5 veces la altura del talud; mientras que, en el pie, para taludes de corte deberá ser de 5 m bajo el corte, y para terraplenes, igual al ancho de la zona de apoyo o 2 veces la altura del mismo; en ambos casos debe profundizarse hasta encontrar estrato resistente que permita identificar las posibles superficies de falla.

6.2.3.3. Muros de retención

En muros de retención se deben obtener perfiles transversales al eje de la estructura espaciados a cada 20 m como máximo, realizando 2 o 3 perforaciones por perfil, dependiendo de la altura proyectada del muro.

La profundidad de los sondeos en la base del muro debe ser igual a 3 veces el ancho de la cimentación o 1.5 veces la altura del muro (la que resulte mayor), mientras que las perforaciones en el material que soportará el muro, deben

profundizarse al menos hasta el nivel de la cota de desplante proyectada de la estructura.

6.3. RECOMENDACIONES

6.3.1. RECOMENDACIONES GENERALES

- El mapa de características geotécnicas se ha realizado a partir de la información registrada en estudios geotécnicos durante el periodo del 2000 al 2010, por tanto, se recomienda ampliar el estudio con información que abarque estudios presentados a la fecha.
- Los resultados obtenidos en el mapa de características geotécnicas, brindan información de referencia de los suelos en las regiones analizadas, sin embargo, es necesario realizar un adecuado estudio de suelos previo a la construcción de cualquier obra civil, el cual permita conocer las características físicas y mecánicas del suelo.
- En el caso que en la exploración preliminar se encuentren condiciones problemáticas en el suelo o que la magnitud de la obra lo requiera, se recomienda realizar ampliación del estudio en la zona donde se encontró dicha condición (exploración definitiva), que permita conocer en detalle las características del suelo.
- Utilizar técnicas alternativas de reconocimiento en el caso que el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) no sea aplicable debido al tipo de suelo u otras condiciones particulares del mismo.

- Establecer el contenido mínimo mediante un formato general en el cual deba presentarse el informe geotécnico.
- Se recomienda reforzar los estudios geotécnicos en los siguientes aspectos:
 - ✓ Presentar una descripción geológica y topográfica del lugar de exploración.
 - ✓ Esquematizar la distribución de sondeos incluyendo cotas de referencia que permitan localizar su ubicación.
 - ✓ Elaborar en todos los casos, perfiles estratigráficos con su respectiva identificación (nombre del sondeo), leyenda y elevación real de los sondeos.
 - ✓ Realizar la corrección de N_{campo} por los diferentes factores involucrados, tal lo especifica la ASTM D1586 y ASTM D 6066.
 - ✓ Clasificar el suelo de acuerdo al SUCS y realizar ensayos de laboratorio (granulometría y límites de Atterberg cuando se requiera) que permitan comprobar la clasificación visual-manual. Además, presentar una constancia de los cálculos efectuados.
 - ✓ Registrar la longitud de recobro de la muestra de ensayo SPT, con el fin de determinar el peso específico del suelo.
 - ✓ Realizar pruebas triaxiales o de corte directo en el caso la obra civil lo amerite (para caracterizar los materiales del suelo en obras como muros y taludes).

- ✓ Adjuntar una memoria de cálculo de la determinación de la capacidad de carga definida en el informe geotécnico.

6.3.2. RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS

- En edificaciones, se recomienda que al menos el 75% de las perforaciones estén ubicadas dentro del área de construcción y que su distribución permita realizar perfiles estratigráficos; además, debe procurarse que los sondeos se sitúen en zonas donde se tiene previsto que estén concentradas las mayores cargas.
- La profundidad de exploración en estudios de suelos en la base de la cimentación para muros de retención, taludes y edificaciones de menos de tres niveles, debe alcanzar un estrato resistente y garantizar la continuidad del mismo profundizando por lo menos 2 m utilizando las técnicas de reconocimiento necesarias (por ejemplo, rotativas en el caso se encuentre roca).
- En taludes, cuando la altura sea inferior a 10 m, se recomienda ubicar los 2 sondeos en el pie y en la corona del talud, debiendo profundizarse este último al menos hasta el nivel del pie. En el caso de taludes que superen los 10 m y que el ángulo de inclinación no permita realizar sondeos en el cuerpo, pueden efectuarse de igual manera 2 sondeos, asegurando que con estos se identifiquen todos los estratos presentes.

- En relación a muros de retención con una altura menor a 5 m, se recomienda que se realicen 2 sondeos ubicados en la base de la cimentación y en la parte de atrás del mismo; si la altura es mayor a 5 m, realizar 3 sondeos ubicados en la base, atrás y adelante del muro. En el caso de los muros que soporten taludes mayores a 10 m, realizar un sondeo adicional en la parte alta (corona del talud) para determinar la estabilidad global del mismo, profundizando por lo menos, hasta la profundidad donde se inició la perforación ubicada en el relleno.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Marroquín, Karla; Vásquez, Carlos. (2007). Tesis: “ESTUDIO GEOTÉCNICO DE LA ERUPCIÓN FREATOMAGMÁTICA DEL PLAN DE LA LAGUNA”. Universidad José Simeón Cañas, El Salvador.
- Commission on Geological Maps of the International Association of Engineering Geology. (1976). ENGINEERING GEOLOGICAL MAPS. Francia.
- González de Vallejo, L. (2002). INGENIERÍA GEOLÓGICA. Prentice Hall.
- Ferrés, Dolores. (2014). Tesis: “ESTRATIGRAFÍA, GEOLOGÍA Y EVALUACIÓN DE PELIGROS VOLCÁNICOS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO DE SAN SALVADOR”. Universidad Nacional Autónoma de México. México
- Escobar, Demetrio. (2005). MEMORIA TÉCNICA DEL MAPA DE ESCENARIOS DE AMENAZA DEL VOLCÁN DE SAN MIGUEL. El Salvador.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). ASPECTOS GEOLÓGICOS QUE INFLUYEN EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EN LA RESPUESTA SÍSMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR. Documento sitio web:
<http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00080/doc00080-contenido.pdf>
- Ferrés et al. “THREE THOUSAND YEARS OF FLANK AND CENTRAL VENT ERUPTIONS OF THE SAN SALVADOR VOLCANIC COMPLEX (EL SALVADOR) AND THEIR EFFECTS ON EL CAMBIO ARCHEOLOGICAL

SITE: A REVIEW BASED ON TEPHROSTRATIGRAPHY". Editorial J. McPhie.

- López Avalos, José Manuel (2008). Tesis: "APLICACIÓN DEL MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA PARA LA DETERMINACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P", Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Marroquín, Karla. (2007). Tesis: "CARACTERIZACIÓN DEL DEPÓSITO PIROCLÁSTICO PROVENIENTE DE LA ERUPCIÓN DEL PLAN DE LA LAGUNA". Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, El Salvador.
- Lexa et al. (2011). GEOLOGY AND VOLCANIC EVOLUTION IN THE SOUTHERN PART OF THE SAN SALVADOR METROPOLITAN AREA. Editor P. Hradecký.
- Hernández, Walter. (2008). ESTRATIGRAFÍA DEL AMSS. Congreso Geológico de América Central, San José, Costa Rica.
- Juárez Badillo, E. (2005). MECÁNICA DE SUELOS, Tomo 1 Fundamentos de Mecánica de Suelos. Editorial Limusa, México.
- Landaverde, Miguel. (2007). "RECOPIACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS", Departamento de Geotecnia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.
- Aguirre, Gil. (1996), Tesis: "MANUAL DE FUNDACIONES DE LAS ESTRUCTURAS SEGÚN TIPOS DE SUELOS Y CONDICIONES DEL TERRENO". Universidad de El Salvador, El Salvador.

- Mendoza, Lesly. (2016), Guion de clases: RECONOCIMIENTO DEL TERRENO Y PROPIEDADES GEOTÉCNICAS, Cimentaciones, T.E. Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Mendoza, Lesly. (2016). Guion de clases: ESTUDIO GEOTÉCNICO, Cimentaciones, T.E. Universidad de El Salvador, El Salvador
- Herrera Herbert, Juan. (2012). “UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE SONDEOS EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS”. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Unidad de Investigación y Desarrollo Vial, Viceministerio de Obras Públicas (2012). PRÁCTICAS QUE INCIDEN EN LA CALIDAD DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO SPT. El Salvador
- Braja M. Das (2012). PRINCIPIOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES, séptima edición. Editorial Cengage Learning, México
- Rodríguez et al. (1989). CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES, cuarta edición. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid 1989.
- OPAMSS. Información de estudios de suelos de los municipios de Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla de los años 2000-2010, proporcionado por la Oficina del Área Metropolitana de San Salvador.
- OPAMSS. (2006). Documento: “ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR “, El Salvador.

- American Society for Testing and Materials, ASM D1586-11 “Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils”
- American Society for Testing and Materials, ASTM D6066 – 96 “Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential”.
- Vargas, Manuel. (1999). INGENIERÍA DE CIMENTACIONES, FUNDAMENTOS E INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS GEOTÉCNICO. 2ª. Edición, Editorial Alfaomega, México.
- Página web oficial del software ArcGIS: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- Chavarría, Tatiana. (2017). Tesis: “DESARROLLO DEL CONTENIDO PROGRAMÁTICO DE LAS ASIGNATURAS “ANÁLISIS GEOTÉCNICO” Y “CIMENTACIONES”; DEL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA, PARA LA INCORPORACIÓN EN LA REFORMA CURRICULAR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL”. Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Federal Highway Administration. (2003). Adaptación de “LISTA DE CHEQUEO Y LINEAMIENTOS PARA LA REVISIÓN DE REPORTE GEOTECNICOS, PLANOS PRELIMINARES Y ESPECIFICACIONES”.
- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES). (2010). NORMAS DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES Y

OBRAS DE INFRAESTRUCTURA PARA LA REPÚBLICA DE GUATEMALA:
Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección.

- AGIES. (2001). NORMAS DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES Y OBRAS DE INFRAESTRUCTURA PARA LA REPÚBLICA DE GUATEMALA: Estudios geotécnicos y de Microzonificación.
- Asociación Costarricense de Geotecnia. (2009). CÓDIGO DE CIMENTACIONES COSTA RICA. 2a edición.
- Sowers, B. y Sowers, F. (1972). INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES. México.
- Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano (MOP-VMVDU). (2003). NORMA PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HOSPITALES Y ESTABLECIMIENTOS DE SALUD, El Salvador.
- Documento Básico SE-C, “SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE CIMENTOS”. (2006), España.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1998). NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-98.
- Mendoza, Lesly. (2016). Guion de clases: ESTABILIDAD DE TALUDES, Cimentaciones, T.E. Universidad de El Salvador, El Salvador.
- De Matteis (2003). “ESTABILIDAD DE TALUDES”. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

- Chavarría, Tatiana y Mendoza L. E. (2017). "TALUDES". Curso de Cimentaciones T.E. Unidad 6. Universidad de El Salvador.
- M. Sc. Rolando Mora Chinchilla, documento: FUNDAMENTOS SOBRE DESLIZAMIENTOS.
- Chávez, Alex (2009). ASPECTOS A TOMAR EN CUENTA PARA LA INVESTIGACIÓN DE MOVIMIENTO DE LADERA, El Salvador.
- Medrano Castillo, Rodolfo Crescenciano. (2002). MECÁNICA DE SUELOS II, México.
- Suárez, J. (1998). DESLIZAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN ZONAS TROPICALES. Capítulo 2: Procedimientos de investigación.
- Suarez, Jaime. (2009). DESLIZAMIENTOS. TOMO I: ANÁLISIS GEOTÉCNICO. Editorial: U. Industrial de Santander.
- Ministerio de fomento, Dirección General de carreteras. (2009) "GUÍA DE CIMENTACIONES EN OBRAS DE CARRETERA". España
- Mendoza, Lesly. (2016). Guion de clases: MUROS DE RETENCIÓN. Cimentaciones, T.E. Universidad de El Salvador.
- Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA). (1997). Norma Técnica para Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes, El Salvador
- Rico, Alfonso. (1976). LA INGENIERÍA DE SUELOS EN LAS VÍAS TERRESTRES. Editorial Limusa, México.
- Calderón, N., Chavez, O., Lopez, R. y Perdomo, H. (1993). "GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELO QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y EN EL

LABORATORIO, APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL”,
Universidad de El Salvador, El Salvador.

- Das, Braja. (2014). PRINCIPIOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA, Séptima edición. Editorial Cengage Learning
- Cruz, L. (2006). CONFERENCIAS DE CURSO DE FUNDACIONES. Facultad de Ingeniería Civil Universidad del Cauca, Popayán. Colombia.

ANEXOS

ANEXO A

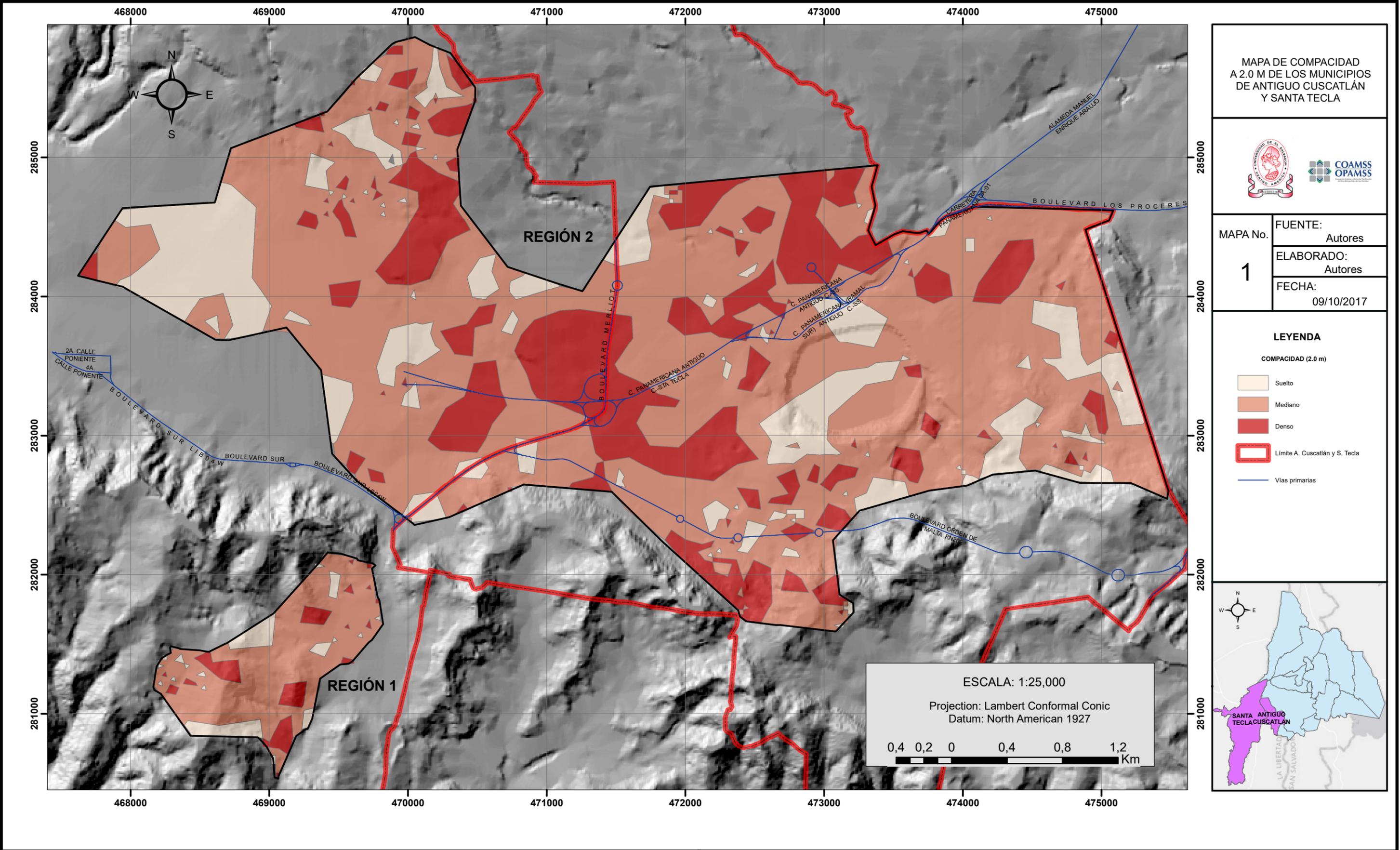
EJEMPLO DEL FORMATO DE LA BASE
DE DATOS CREADA EN EXCEL

ANEXO A: EJEMPLO DEL FORMATO DE LA BASE DE DATOS CREADA EN EXCEL

EXPEDIENTE	MUNICIPIO	LABORATORIO	PROYECTO	ÉPOCA	X	Y	Z	FECHA INICIO	FECHA FINAL	Sondeo No.	H	N20	N15	N15	NCAMPC	N	HUMEDAD	ESTRATIGRAFÍA	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCION	COMPACIDAD	CONSISTENCIA
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	0.50	3	3	8	11	11	18.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	1.00	12	13	15	28	28	18.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	1.50	16	17	18	35	35	23.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	2.00	30	21	22	43	43	23.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	2.50	16	15	17	32	32	23.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	3.00	26	24	25	49	49	23.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	3.50	23	17	18	35	35	27.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	4.00	23	18	20	38	38	26.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	4.50	24	15	16	31	31	23.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pómez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	5.00	9	8	9	17	17	32.00	SM	Granular	Limo arenoso café claro, saturado	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	5.50	16	30	35	65	50	25.00	SM	Granular	Arena limosa café oscuro, con gravillas, parcial saturada	Muy Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472604.4992	284111.0005	830.00	14/11/03	18/11/03	S1	6.00	50	>50		R	50	0.00	RPC	N/A	Rechazo a la penetración estándar con punta cónica, golpes elásticos	N/A	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472620.7050	284113.3156	830.00	14/11/03	18/11/03	S2	0.50	1	1	1	2	2	15.00	SM	Granular	Arena limosa café oscuro, con pómez, parcial saturada	Muy Suelto	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472620.7050	284113.3156	830.00	14/11/03	18/11/03	S2	1.00	3	6	30		36	11.00	SM	Granular	Arena limosa café oscuro, con fragmentos de roca, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472620.7050	284113.3156	830.00	14/11/03	18/11/03	S2	1.50	50	>50		R	50	0.00	RPC	N/A	Rechazo a la penetración estándar con punta cónica, golpes elásticos, posible roca	N/A	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472618.6598	284112.7362	830.00	14/11/03	18/11/03	S2A	0.50	1	1	1	2	2	25.00	SM	Granular	Limo arenoso café claro, parcial saturada	Muy Suelto	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472618.6598	284112.7362	830.00	14/11/03	18/11/03	S2A	1.00	3	4	9	13	13	22.00	SM	Granular	Limo arenoso café claro, parcial saturada	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472618.6598	284112.7362	830.00	14/11/03	18/11/03	S2A	1.50	50	26	24	50	50	24.00	SM	Granular	Arena limosa café oscuro, con fragmentos de roca, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472618.6598	284112.7362	830.00	14/11/03	18/11/03	S2A	2.00	50	>50		R	50	0.00	RPC	N/A	Rechazo a la penetración con punta cónica	N/A	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472622.4962	284113.6358	830.00	14/11/03	18/11/03	S2B	0.50	3	4	5	9	9	23.00	SM-OL	Granular	Arena limosa café oscuro, ligeramente orgánica, con raíces, parcial saturada	Suelto	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472622.4962	284113.6358	830.00	14/11/03	18/11/03	S2B	1.00	3	5	5	10	10	25.00	SM	Granular	Arena limosa, café claro, parcial saturada	Suelto	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472622.4962	284113.6358	830.00	14/11/03	18/11/03	S2B	1.50	50	26	24	50	50	27.00	SM	Granular	Arena limosa, café claro, con fragmentos de roca, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472622.4962	284113.6358	830.00	14/11/03	18/11/03	S2B	2.00	50	>50		R	50	0.00	RPC	N/A	Rechazo a la penetración con punta cónica. Golpes elásticos, se intercepto roca	N/A	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	0.50	1	1	6	7	7	31.00	SM-OL	Granular	Arena limosa café oscuro, ligeramente orgánica, con pómez, saturada	Suelto	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	1.00	5	7	5	12	12	27.00	SM	Granular	Arena limosa, café claro, parcial saturada	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	1.50	15	15	19	34	34	26.00	SM	Granular	Arena limosa, café claro, con pómez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	2.00	24	25	24	49	49	23.00	SM	Granular	Arena limosa, café claro, con pómez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	2.50	18	15	22	37	37	23.00	SM	Granular	Arena limosa, café claro, con pómez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	3.00	30	27	26	53	50	19.00	SM	Granular	Arena limosa, café claro, con pómez, parcial saturada	Muy Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	3.50	21	9	10	19	19	15.00	SP	Granular	Arena mal graduada café claro, parcial saturada	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	4.00	10	12	19	31	31	18.00	SM	Granular	Arena limosa, café claro, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	4.50	7	8	16	24	24	41.00	SM	Granular	Arena limosa, café oscuro, parcial saturada	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	5.00	40	26	24	50	50	26.00	SM	Granular	Arena limosa café oscuro, con gravillas, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472637.5722	284117.9459	830.00	14/11/03	18/11/03	S3	5.50	50	>50		R	50	0.00	RPC	N/A	Rechazo a la penetración con punta cónica. Golpes elásticos.	N/A	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472657.0853	284125.8834	830.00	14/11/03	18/11/03	S4	0.50	3	3	4	7	7	26.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pomez, parcial saturada	Suelto	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472657.0853	284125.8834	830.00	14/11/03	18/11/03	S4	1.00	4	5	6	11	11	25.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pomez, parcial saturada	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472657.0853	284125.8834	830.00	14/11/03	18/11/03	S4	1.50	4	5	7	12	12	31.00	ML	Granular	Limo arenoso café claro, saturado	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472657.0853	284125.8834	830.00	14/11/03	18/11/03	S4	2.00	18	15	19	34	34	31.00	ML	Granular	Limo arenoso café claro, saturado	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472657.0853	284125.8834	830.00	14/11/03	18/11/03	S4	2.50	18	15	16	31	31	25.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pomez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472657.0853	284125.8834	830.00	14/11/03	18/11/03	S4	3.00	25	25	24	49	49	21.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pomez, parcial saturada	Densa	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472657.0853	284125.8834	830.00	14/11/03	18/11/03	S4	3.50	30	15	10	25	25	27.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pomez, parcial saturada	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472657.0853	284125.8834	830.00	14/11/03	18/11/03	S4	4.00	12	10	9	19	19	16.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con pomez, parcial saturada	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472657.0853	284125.8834	830.00	14/11/03	18/11/03	S4	4.50	6	5	25	30	30	21.00	SM	Granular	Arena limosa café claro, con fragmentos de rocal, parcial saturada	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472657.0853	284125.8834	830.00	14/11/03	18/11/03	S4	5.00	50	>50		R	50	0.00	RPC	N/A	Rechazo a la penetración con punta cónica. Golpes elásticos. Posible escoria y roca.	N/A	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472663.8322	284119.0042	830.00	14/11/03	18/11/03	S5	0.50	1	2	5	7	7	26.00	SM-OL	Granular	Arena limosa café oscuro, ligeramente orgánico, parcial saturada	Suelto	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472663.8322	284119.0042	830.00	14/11/03	18/11/03	S5	1.00	7	6	7	13	13	36.00	ML	Granular	Limo arenoso café claro, saturado	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472663.8322	284119.0042	830.00	14/11/03	18/11/03	S5	1.50	5	6	5	11	11	40.00	ML	Granular	Limo arenoso café claro, saturado	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472663.8322	284119.0042	830.00	14/11/03	18/11/03	S5	2.00	10	9	10	19	19	38.00	ML	Granular	Limo arenoso café claro, saturado	Mediana	N/A
XXXX-2004	Antiguo Cuscatlán	LABORATORIO X	PROYECTO Y	Seca	472663.8322	284119.00																

ANEXO B

**MAPA DE COMPACIDAD, HUMEDAD Y
TIPOS DE SUELOS A 2.0 Y A 5.0 M DE
LOS MUNICIPIOS DE ANTIGUO
CUSCATLÁN Y SANTA TECLA**



MAPA DE COMPACIDAD
A 2.0 M DE LOS MUNICIPIOS
DE ANTIGUA CUSCATLÁN
Y SANTA TECLA

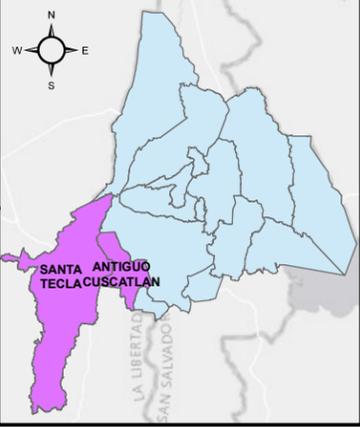


MAPA No. 1	FUENTE: Autores
	ELABORADO: Autores
	FECHA: 09/10/2017

LEYENDA

COMPACIDAD (2.0 m)

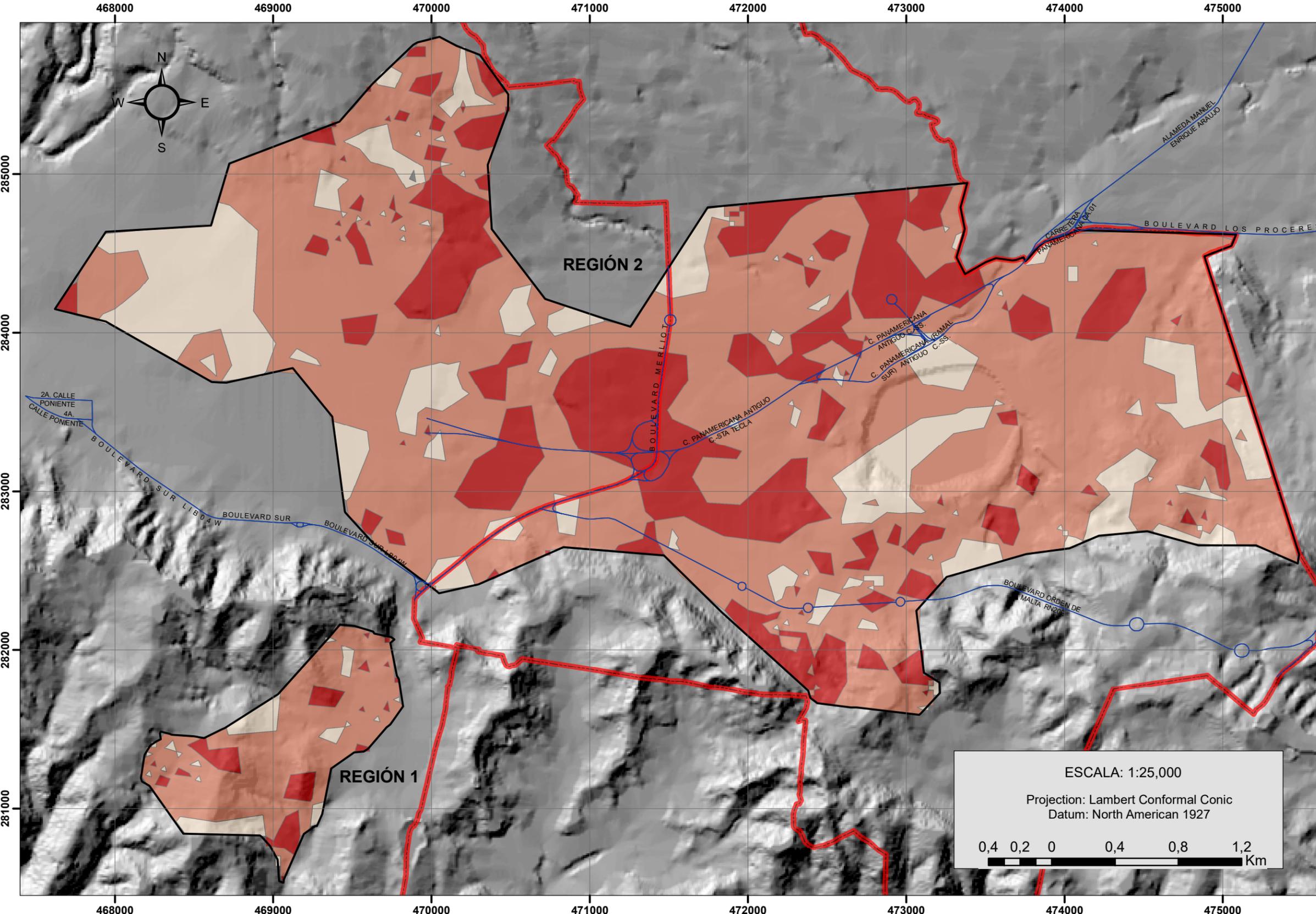
- Suelto
- Mediano
- Denso
- Límite A. Cuscatlán y S. Tecla
- Vías primarias

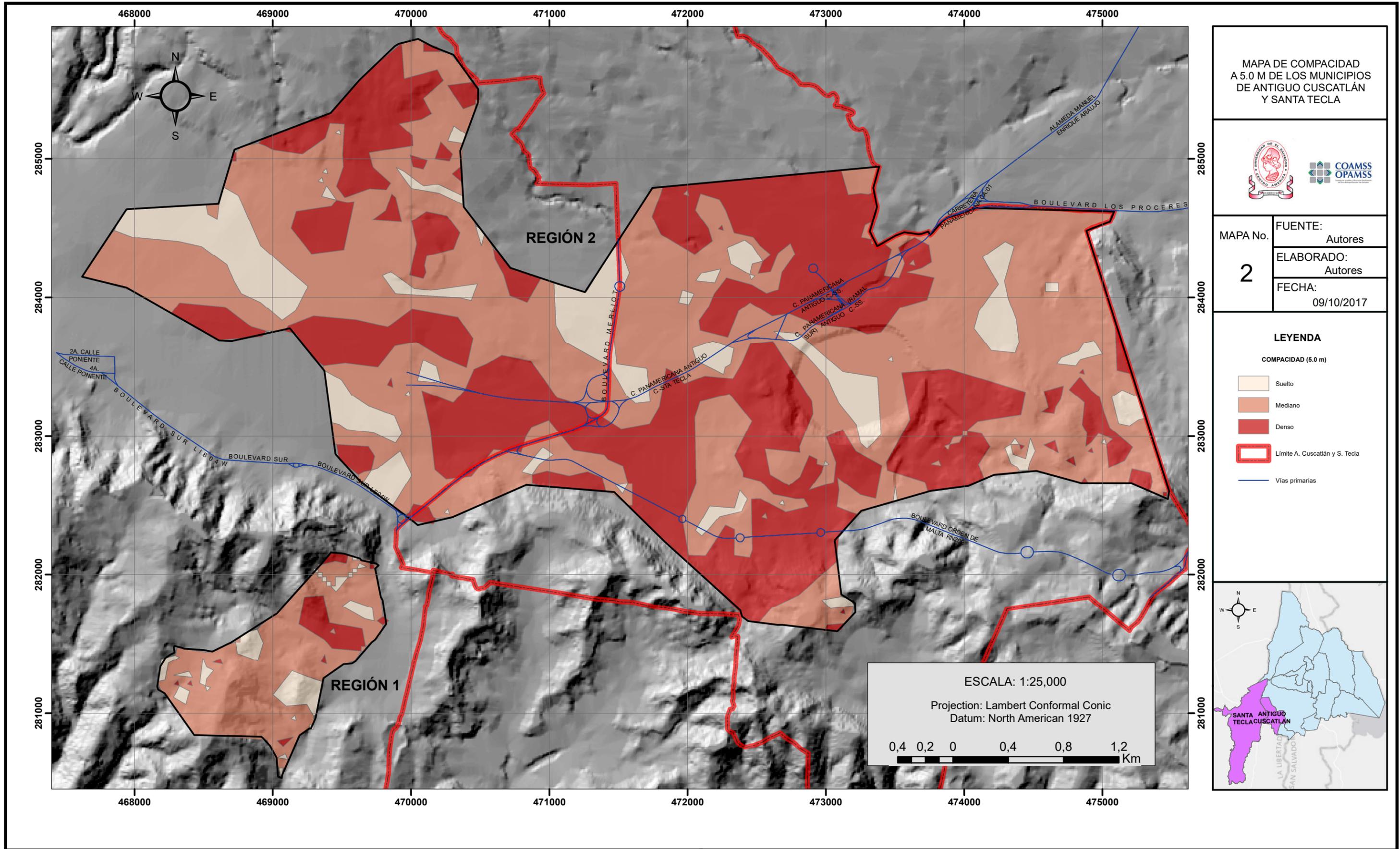


ESCALA: 1:25,000

Projection: Lambert Conformal Conic
Datum: North American 1927

0,4 0,2 0 0,4 0,8 1,2 Km





MAPA DE COMPACIDAD
A 5.0 M DE LOS MUNICIPIOS
DE ANTIGUA CUSCATLÁN
Y SANTA TECLA

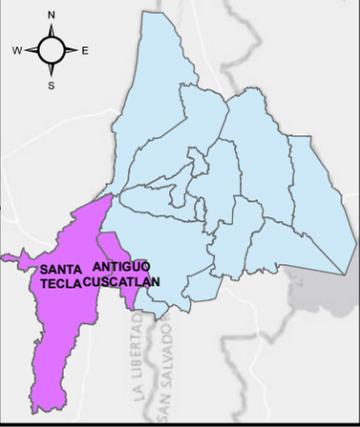


MAPA No. 2	FUENTE: Autores
	ELABORADO: Autores
	FECHA: 09/10/2017

LEYENDA

COMPACIDAD (5.0 m)

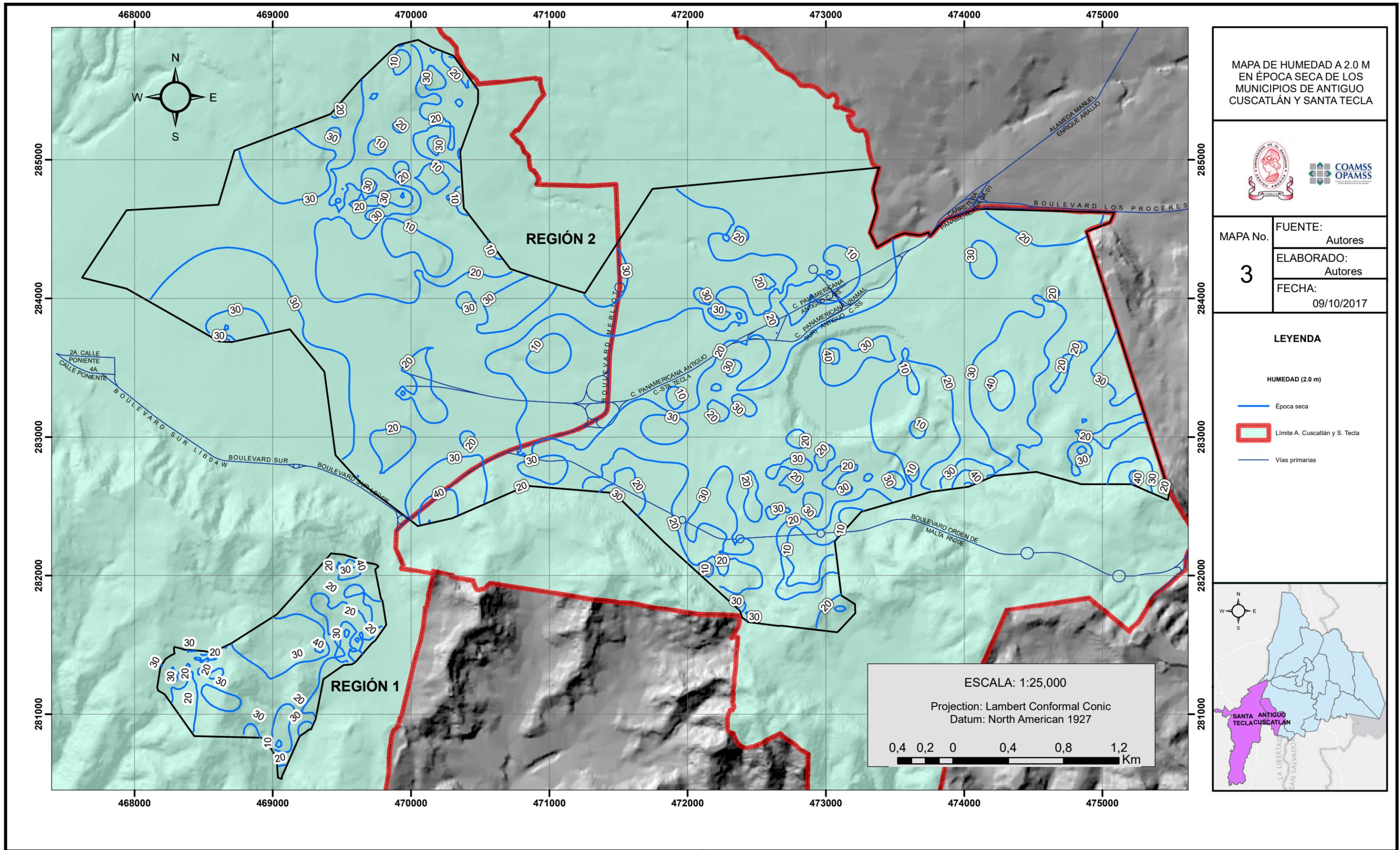
- Suelto
- Mediano
- Denso
- Límite A. Cuscatlán y S. Tecla
- Vías primarias



ESCALA: 1:25,000

Projection: Lambert Conformal Conic
Datum: North American 1927

0,4 0,2 0 0,4 0,8 1,2 Km



MAPA DE HUMEDAD A 2.0 M EN ÉPOCA SECA DE LOS MUNICIPIOS DE ANTIGUO CUSCATLÁN Y SANTA TECLA

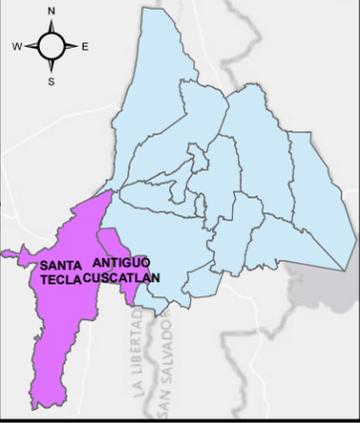


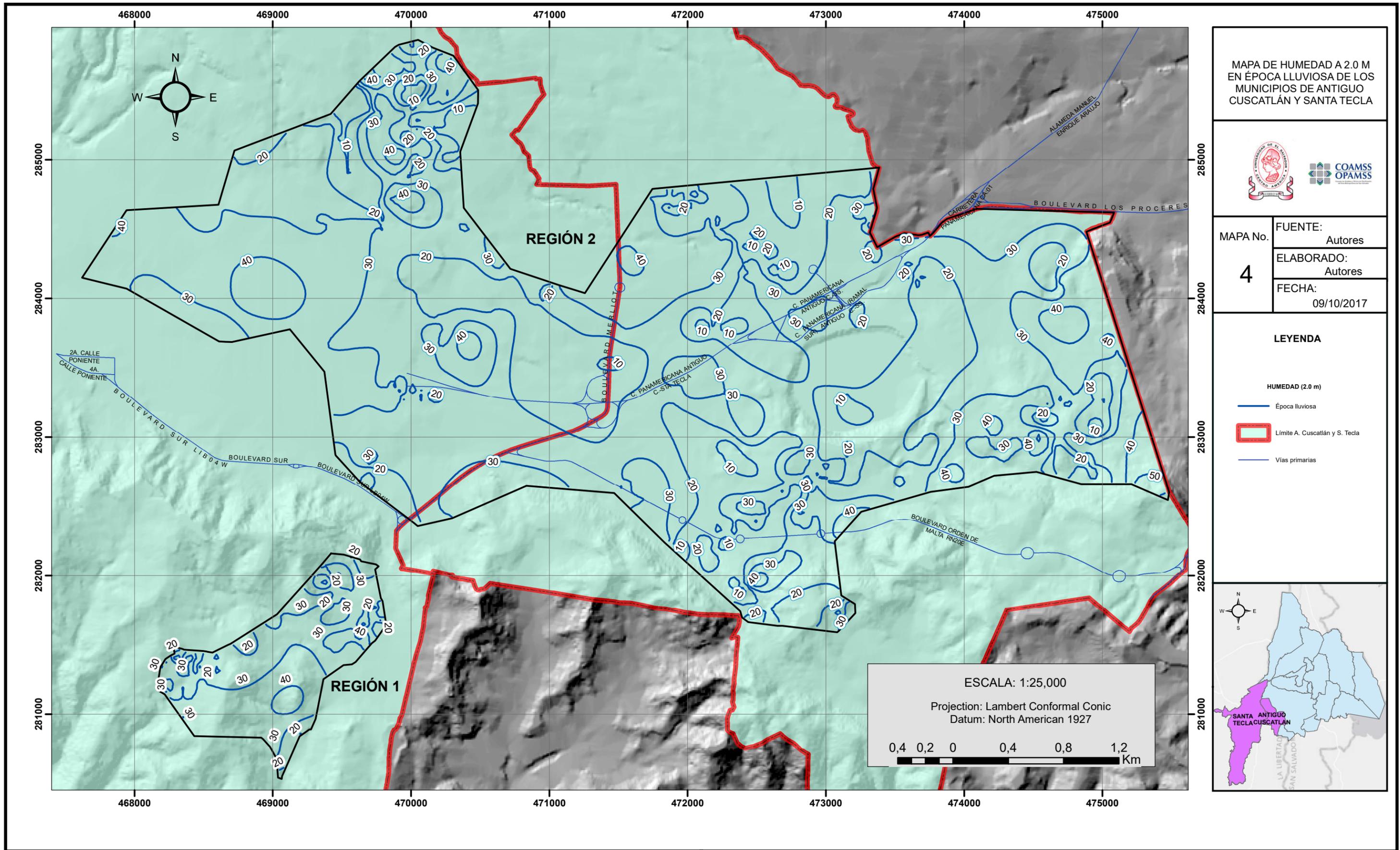
MAPA No. 3	FUENTE: Autores
	ELABORADO: Autores
	FECHA: 09/10/2017

LEYENDA

HUMEDAD (2.0 m)

- Época seca
- ▭ Límite A. Cuscatlán y S. Tecla
- Vías primarias





MAPA DE HUMEDAD A 2.0 M EN ÉPOCA LLUVIOSA DE LOS MUNICIPIOS DE ANTIGUO CUSCATLÁN Y SANTA TECLA

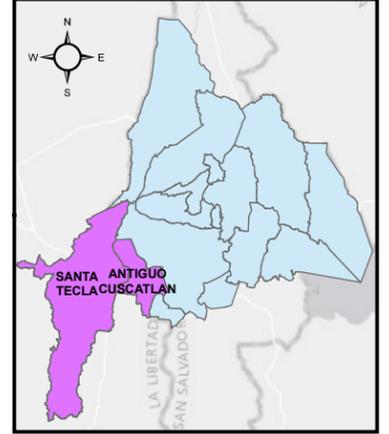


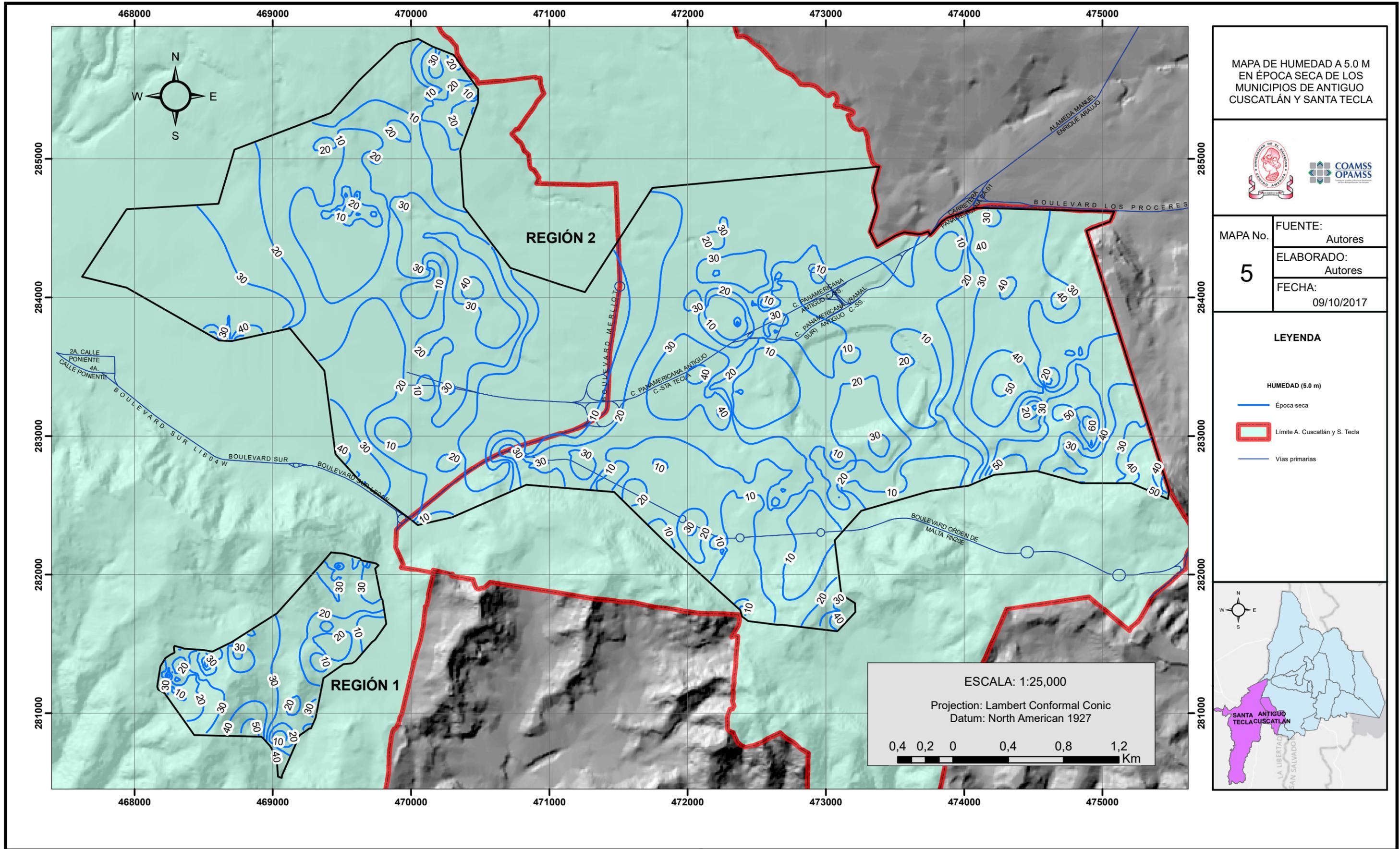
MAPA No. 4	FUENTE: Autores
	ELABORADO: Autores
	FECHA: 09/10/2017

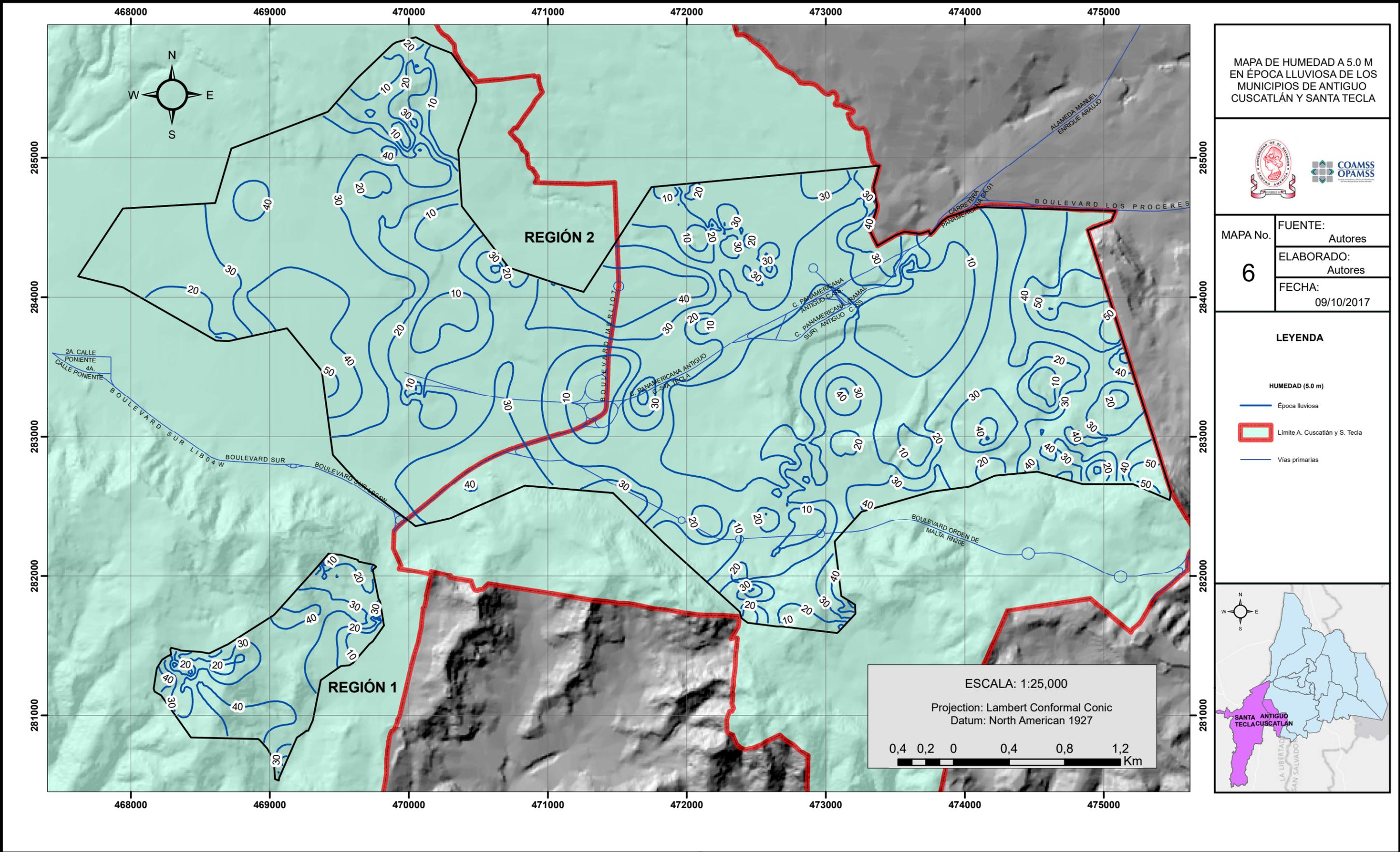
LEYENDA

- HUMEDAD (2.0 m)
- Época lluviosa
 - Límite A. Cuscatlán y S. Tecla
 - Vías primarias

ESCALA: 1:25,000
 Projection: Lambert Conformal Conic
 Datum: North American 1927







MAPA DE HUMEDAD A 5.0 M EN ÉPOCA LLUVIOSA DE LOS MUNICIPIOS DE ANTIGUO CUSCATLÁN Y SANTA TECLA

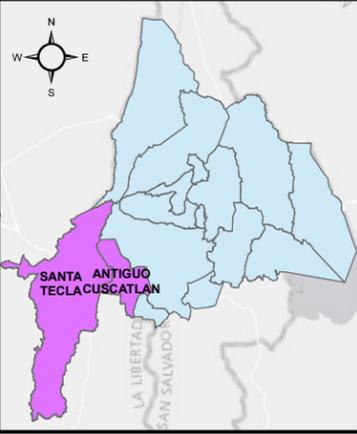


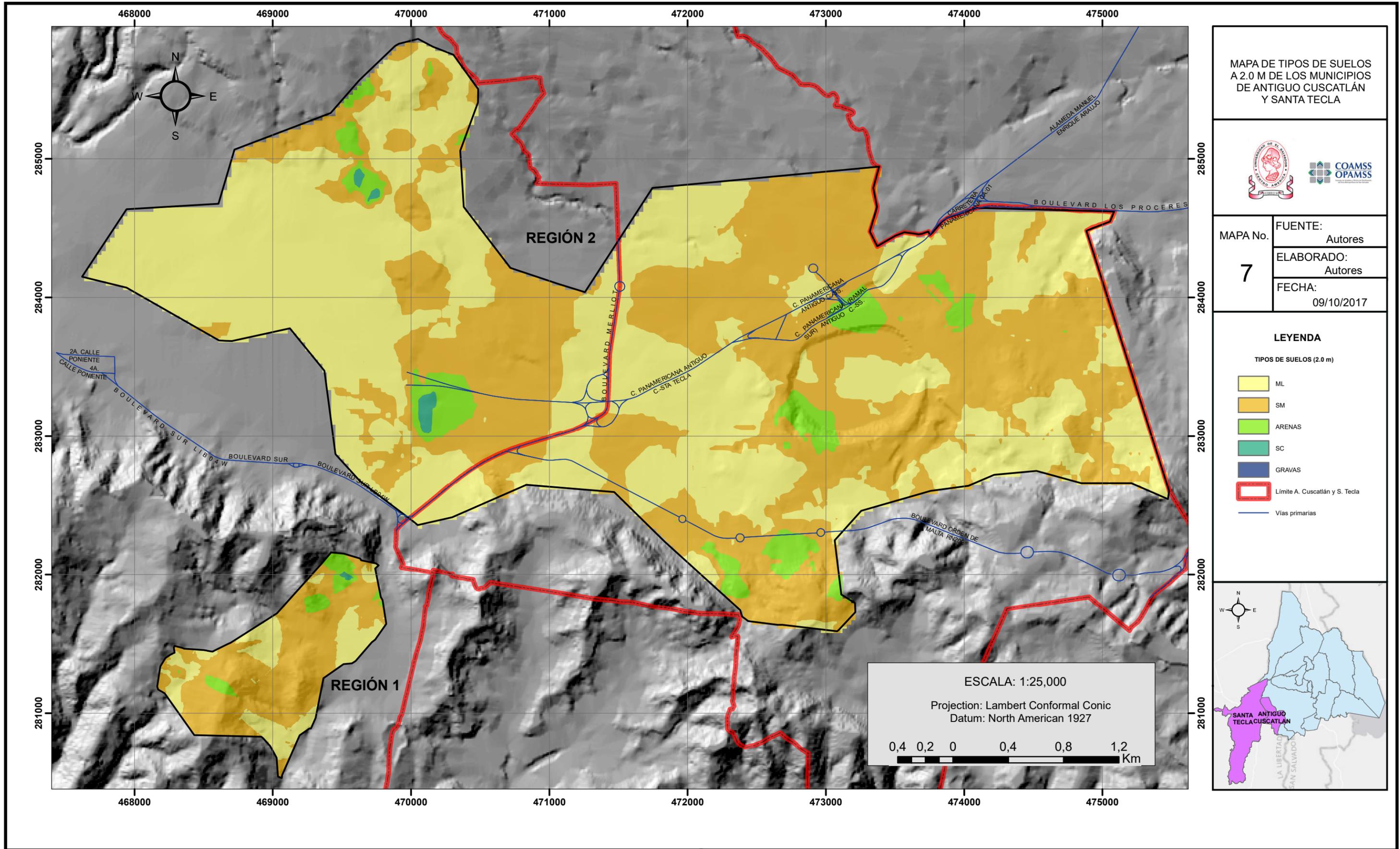
MAPA No. 6	FUENTE: Autores
	ELABORADO: Autores
	FECHA: 09/10/2017

LEYENDA

- HUMEDAD (5.0 m)
- Época lluviosa
 - Límite A. Cuscatlán y S. Tecla
 - Vías primarias

ESCALA: 1:25,000
 Projection: Lambert Conformal Conic
 Datum: North American 1927





MAPA DE TIPOS DE SUELOS
A 2.0 M DE LOS MUNICIPIOS
DE ANTIGUA CUSCATLÁN
Y SANTA TECLA

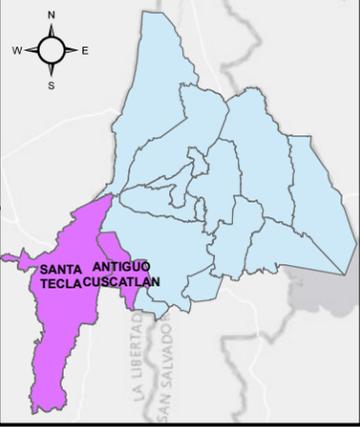


MAPA No. 7	FUENTE: Autores
	ELABORADO: Autores
	FECHA: 09/10/2017

LEYENDA

TIPOS DE SUELOS (2.0 m)

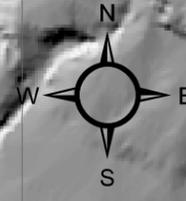
- ML
- SM
- ARENAS
- SC
- GRAVAS
- Límite A. Cuscatlán y S. Tecla
- Vías primarias

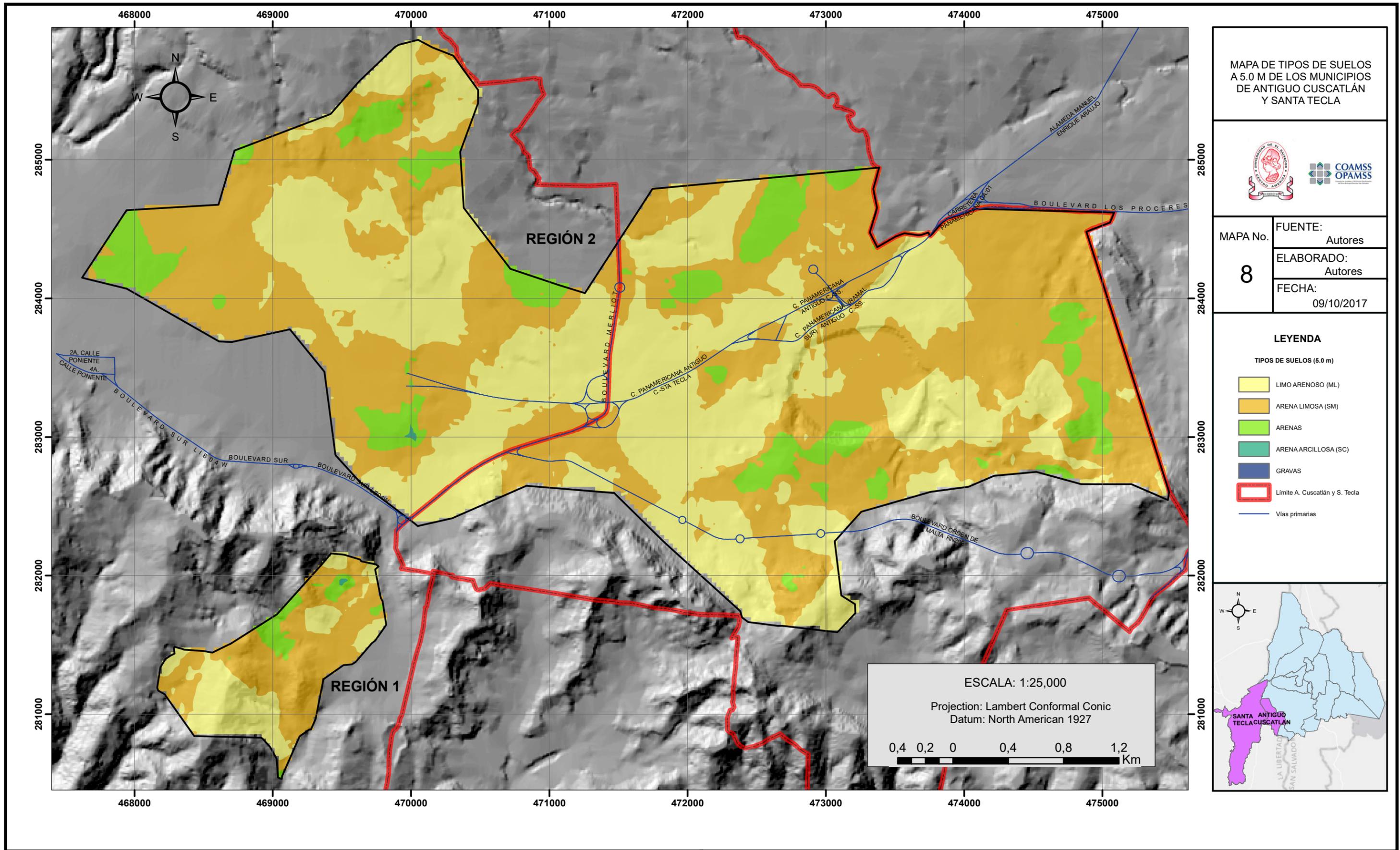


ESCALA: 1:25,000

Projection: Lambert Conformal Conic
Datum: North American 1927

0,4 0,2 0 0,4 0,8 1,2 Km





MAPA DE TIPOS DE SUELOS
A 5.0 M DE LOS MUNICIPIOS
DE ANTIGUA CUSCATLÁN
Y SANTA TECLA

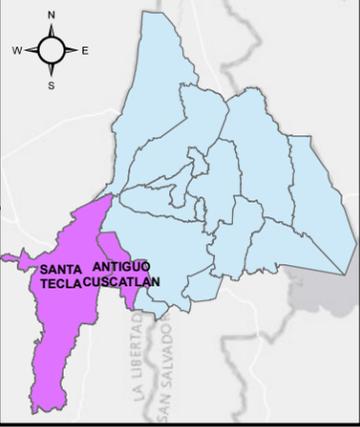


MAPA No. 8	FUENTE: Autores
	ELABORADO: Autores
	FECHA: 09/10/2017

LEYENDA

TIPOS DE SUELOS (5.0 m)

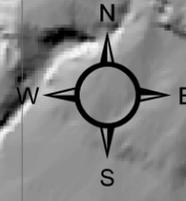
- LIMO ARENOSO (ML)
- ARENA LIMOSA (SM)
- ARENAS
- ARENA ARCILLOSA (SC)
- GRAVAS
- Límite A. Cuscatlán y S. Tecla
- Vías primarias



ESCALA: 1:25,000

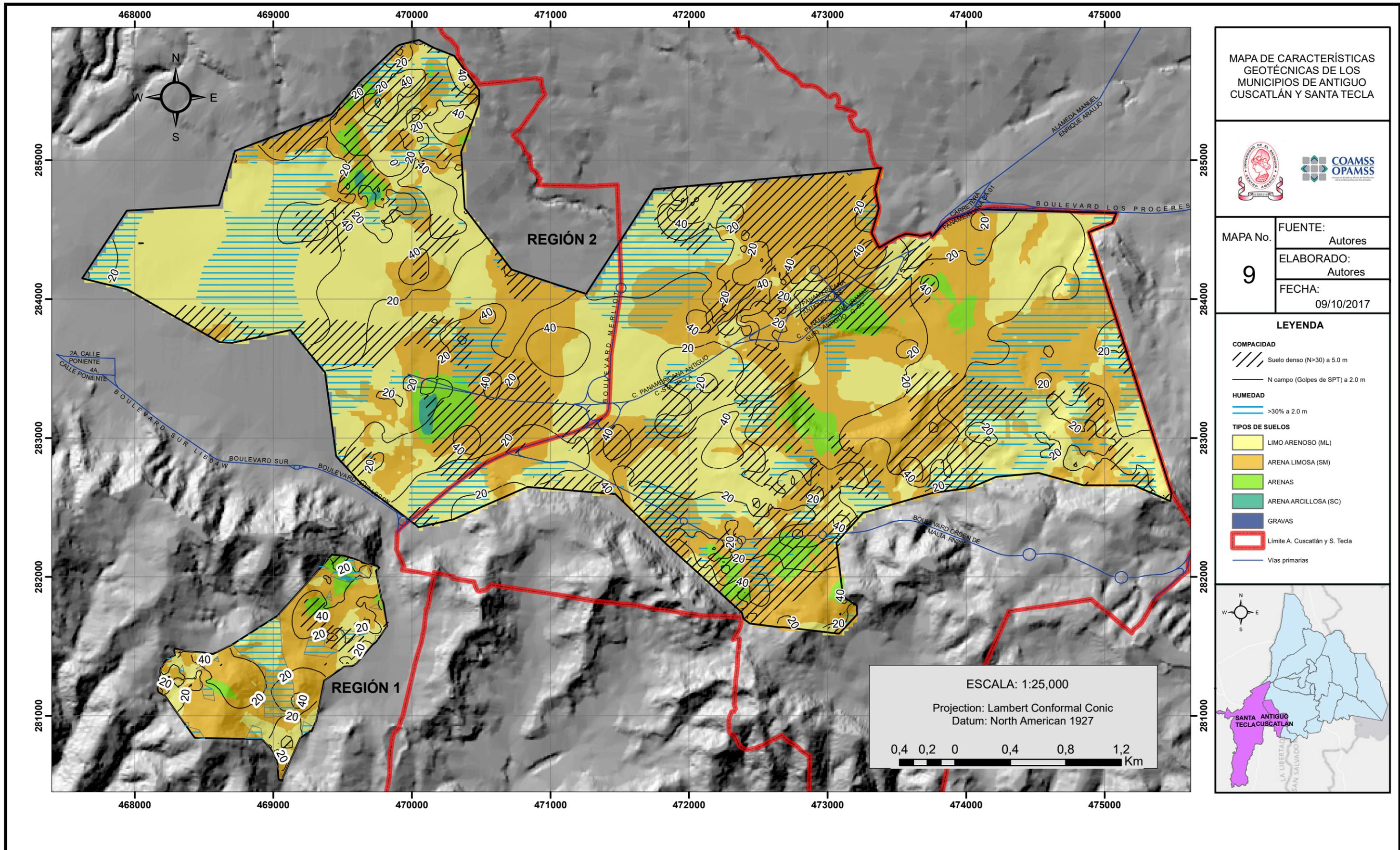
Projection: Lambert Conformal Conic
Datum: North American 1927

0,4 0,2 0 0,4 0,8 1,2 Km



ANEXO C

MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS MUNICIPIOS DE ANTIGUO CUSCATLÁN Y SANTA TECLA



MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS MUNICIPIOS DE ANTIGUO CUSCATLÁN Y SANTA TECLA



MAPA No. 9

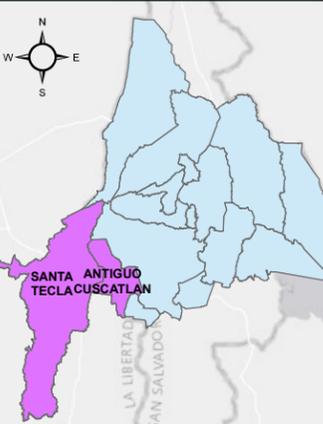
FUENTE: Autores

ELABORADO: Autores

FECHA: 09/10/2017

LEYENDA

- COMPACIDAD**
- Suelo denso ($N > 30$) a 5.0 m
 - N campo (Golpes de SPT) a 2.0 m
- HUMEDAD**
- $> 30\%$ a 2.0 m
- TIPOS DE SUELOS**
- LIMO ARENOSO (ML)
 - ARENA LIMOSA (SM)
 - ARENAS
 - ARENA ARCILLOSA (SC)
 - GRAVAS
 - Límite A. Cuscatlán y S. Tecla
 - Vías primarias



ANEXO D

**FORMATO DE ENTREVISTAS
REALIZADAS A PROFESIONALES**

**ANEXO D: FORMATO DE ENTREVISTAS REALIZADAS A
PROFESIONALES**

REQUERIMIENTOS MINIMOS EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS
Edificaciones
¿Cuáles son los criterios que utilizan para la ubicación, cantidad, espaciamiento y profundidad de sondeos para edificaciones?
Taludes
¿Cuál es el criterio utilizado para la ubicación, cantidad, espaciamiento y profundidad de sondeos para taludes?
Muros de retención
¿Cuál es el criterio utilizado para la ubicación, cantidad, espaciamiento y profundidad de sondeos para muros de retención?
CONTENIDO DEL INFORME GEOTÉCNICO
- ¿Se corrigen los valores de N?
- ¿Cuál es el criterio que utilizan para clasificar los suelos del estudio geotécnico?
- ¿Se realizan ensayos de laboratorio en los estudios geotécnicos? ¿Cuáles?