RECTOR

JOSÉ MARÍA TOJEIRA, S.J.

SECRETARIO GENERAL

RENÉ ALBERTO ZELAYA

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

CELINA PÉREZ RIVERA

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

JOSÉ MAURICIO CEPEDA RIVERA

DIRECTOR DEL TRABAJO

JOSÉ MAURICIO CEPEDA RIVERA

Sumario

A través de un marco teórico que cubre el área geotécnica, referida ésta a la combinación de la Geología aplicada a la ingeniería con la Mecánica de Suelos, se abordan los problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica; siendo estos: los movimientos de masa, los asentamientos, los hundimientos y la licuefacción. Con base a lo anterior se elabora una Ficha de Identificación en campo de dichos problemas, que junto a un documento de apoyo a ésta, constituye la Guía de Identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica; anexando un Documento de Capacitación que permita la comprensión de dicha Guía.

Indice general

Siglas 1

Simbología 3

Prólogo 7

Capítulo 1 Introducción

1.1 Antecedentes 11

1.1.1 Geología 11

1.1.2 Mecánica de Suelos 13

1.1.3 Problemas geotécnicos asociados a terremotos en El Salvador 16

1.1.4 Terremotos de enero y febrero de 2001 en El Salvador. Informes técnicos 25

1.1.5 Trabajos de graduación 34

1.1.6 Generales 37

1.2 Definición del tema 42

1.2.1 Problemática 42

1.2.2 Alcances 42

1.2.3 Objetivos 43

1.2.4 Limitaciones 43

Capítulo 2 Geología y Sismología en El Salvador

2.1 Introducción a la Geología 47

2.1.1 Conceptos básicos de Geología 47

2.2 Geología de El Salvador 62

2.2.1 Estudio de la Geología en El Salvador 62

2.2.2 Descripción geológica de El Salvador 66

2.3 Sismicidad de El Salvador 74

2.3.1 Conceptos básicos de Sismología 74

2.3.2 Fuentes de sismos en El Salvador 81

2.3.3 Zonas afectadas por sismos en El Salvador 83

2.4 Geomorfología 87

2.4.1 Conceptos básicos de Geomorfología 87

2.4.2 Geomorfología de El Salvador 88

Capítulo 3 Mecánica de Suelos

3.1 Introducción a la Mecánica de Suelos 93

3.1.1 Tipos de suelos más comunes en el terreno 93

3.1.2 Agregados del suelo 94

3.2 Clasificación de los suelos 96

3.2.1 Requerimientos mínimos para una descripción adecuada de los suelos 97

3.2.2 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) 102

3.2.3 Clasificación del suelo de forma visual en campo 107

3.3 Pruebas y Equipos 108

3.3.1 Métodos de exploración del suelo 108

3.3.2 Ensayo del subsuelo 109

3.3.3 Muestreo del subsuelo 111

3.3.4 Ensayo y muestreo del subsuelo 112

3.3.5 Pruebas de campo y ensayos de laboratorio 112

3.3.6 Descripción de equipos de campo y de laboratorio 114

Capítulo 4 Factores asociados a problemas geotécnicos

4.1 Infiltración 123

4.1.1 Propiedades de los grupos de materiales geológicos respecto al contenido de agua 124

4.2 Erosión 126

4.2.1 Variables que influyen en la erosión del suelo 126

4.2.2 Erosión por el agua 126

4.3 Drenaje 128

4.4 Rasgos topográficos 130

Capítulo 5 Identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica

5.1 Movimiento de masas 135

5.1.1 Factores desencadenantes de los movimientos de masas 136

5.1.2 Clasificación de movimiento de masas 138

5.1.3 Caídas 143

5.1.4 Vuelcos 145

5.1.5 Deslizamiento 147

5.1.6 Esparcimientos 150
5.1.7 Flujos 151
5.2 Fracturas 154
5.3 Asentamientos y Hundimientos 156
5.3.1 Asentamientos 156
5.3.2 Hundimientos 158
5.4 Licuefacción 160
5.4.1 Tipos de licuefacción 161
5.4.2 Categorías de clasificación de fenómenos ocurridos debido a licuefacción 161
5.4.3 Causas de la licuefacción 162
5.4.4 Criterios para clasificar la susceptibilidad de un suelo a licuefacción 163

Capítulo 6 Metodología de formulación y validación de Guía y Documento de capacitación para la identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica

6.1.1 Introducción 167
6.1.2 Formulación de la Guía de Identificación 167
6.1.3 Validación de la Guía de Identificación 169
6.1.4 Formulación del Documento de Capacitación 175
6.1.5 Validación del Documento de Capacitación 176
6.1.6 Propuesta de capacitación continua 177

Capítulo 7 Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones 181
7.2 Recomendaciones 182

Glosario 183
Referencias 189
Bibliografía 193
Anexo A. GUIA DE IDENTIFICACION DE PROBLEMAS GEOTECNICOS ASOCIADOS A ACTIVIDAD SISMICA
Anexo B. FORMATOS DE FICHAS DOCUMENTADAS

Anexo C. ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD

Anexo D. FASES DEL FORMATO DE LA FICHA DE IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS ASOCIADOS A ACTIVIDAD SISMICA

Anexo E. APLICACION DE FICHA DE IDENTIFICACIÓN. FASE II

Anexo F. APLICACION DE FICHA DE IDENTIFICACIÓN. FASE III

Anexo G. INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA Y GEOGRÁFICA DEL ÁREA CENTROAMERICANA

Indice de tablas

Capítulo 1 Introducción

1.1 Terremotos históricos que han ocasionado movimientos de masa en El Salvador 24
1.2 Antecedentes documentados 42

Capítulo 2 Geología y Sismología en El Salvador

2.1 Escala del Tiempo geológico 49
2.2 Elementos más abundantes en la corteza de la Tierra 50
2.3 Clasificación de los minerales petrográficos 52
2.4 Composición química media de la corteza continental y de los tipos de rocas frecuentes en la superficie 53
2.5 Ejemplos de rocas ígneas según su clasificación 56
2.6 Clasificación de las rocas sedimentarias 57
2.7 Cuadro de la Geología de Centroamérica 63
2.8 Trabajos geológicos realizados en El Salvador 65
2.9 Perfil normal esquemático de la posible sucesión estratigráfica de El Salvador 68
2.10 Sismos destructores en El Salvador en el siglo XX 84
2.11 Zonas de enjambres sísmicos 86
2.12 Consolidado de datos 86

Capítulo 3 Mecánica de Suelos

3.1 Parámetros para determinar cuantitativamente la consistencia 96
3.2 Datos requeridos para la identificación de los suelos 98
3.3 Clasificación de los suelos según el tamaño de las partículas 98
3.4 Abertura estándar de diferentes mallas 99
3.5 Clasificación de los suelos por su índice de plasticidad 102
3.6 Cuadro de clasificación del suelo en el laboratorio 106
3.7 Identificación de suelos finos inorgánicos 108
3.8 Pruebas de campo y ensayos de laboratorio normados por la ASTM 113

Capítulo 5 Identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica

5.1 Rangos de velocidad de los movimientos de masas 142
5.2 Identificación de Caídas 144
5.3 Identificación de Vuelcos 147
5.4 Identificación de Deslizamientos 149
5.5 Identificación de Esparcimientos 151
5.6 Identificación de Flujos 153
5.7 Clasificación geológica de fisuras y fracturas 154
5.8 Clasificación geológica de un macizo rocoso según el espacio entre sus fracturas 155
5.9 Identificación de Asentamientos 158
5.10 Identificación de Hundimientos 159

Capítulo 6 Metodología de formulación y validación de Guía y Documento de capacitación para la identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica

6.1 Fuentes de información para la Ficha de Identificación 170
6.2 Parámetros y puntajes para evaluar la vulnerabilidad 172
6.3 Posibles lugares de aplicación de la Ficha de Identificación 173
6.4 Cuadro de resultados obtenidos en la Fase II y III 176

Indice de figuras

Capítulo 1 Introducción

1.1 Deslizamiento en talud de Tierra Blanca sobre carretera Troncal del Norte 19
1.2 Hundimiento de calle en el reparto Santa Marta, San Salvador 20
1.3 Asentamiento de vivienda en el reparto Santa Marta, San Salvador 20
1.4 Deslizamiento en talud de Tierra Blanca en San Salvador 21
1.5 Hundimiento y agrietamiento de calle en San Salvador 21

Capítulo 2 Geología y Sismología en El Salvador

2.1 La Geología y su relación con otras ciencias 48
2.2 El ciclo de las rocas 59
2.3 Pliegues en las rocas 61
2.4 Tipos de fallas geológicas 62
2.5 Movimientos de placas 76
2.6 Tipos de ondas sísmicas 79
2.7 Tectónica del Caribe y de Centroamérica 82
2.8 Zonas de enjambres sísmicos 87

Capítulo 3 Mecánica de Suelos

3.1 Estructura de la masa del suelo 95
3.2 Gráfica granulométrica 100
3.3 Carta de plasticidad 105
3.4 Penetrómetro de anillo 114
3.5 Penetrómetro de cono 114
3.6 Penetrómetro proctor 115
3.7 Penetrómetro de bolsillo 115
3.8 Tester de veleta de mano 116
3.9 Medidor de volumen Eley 116
3.10 Volúmetro 117
3.11 Cono de arena 117
3.12 Penetrómetro dinámico portátil 118

3.13 Agitador mecánico de mallas estándar 118
3.14 Copa de Casagrande motorizada 119
3.15 Tensiómetro 119
3.16 Balanza electrónica portátil 120
3.17 Prueba torvane 120
3.18 Dilatómetro 120

Capítulo 4 Factores asociados a problemas geotécnicos

4.1 Agua subterránea 124
4.2 Flujo de agua en el terreno 125
4.3 Acción erosiva sobre las capas del suelo. Comunidad Independencia, colonia Agua Caliente, Soyapango 127
4.4 Sentido de la escorrentía superficial y subterránea 129
4.5 Canal de drenaje. Boulevard Sur, Santa Tecla 129
4.6 Perfiles producidos por la erosión 131

Capítulo 5 Identificación de problemas geotécnicos debidos a actividad sísmica

5.1 Características de los movimientos de masas 139
5.2 Dimensiones del movimiento de masa 141
5.3 Diagrama de movimiento de masas 143
5.4 Tipos de Caída 144
5.5 Tipos de Vuelco 146
5.6 Tipos de Deslizamiento 149
5.7 Esparcimiento en roca 150
5.8 Flujo de lodo 152
5.9 Mecanismo de la licuefacción 160

Capítulo 6 Metodología de formulación y validación de Guía y Documento de capacitación para la identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica

6.1 Km 53, carretera Panamericana, San Vicente 174

6.2 Colonia Las Colinas, La Libertad 174
6.3 Jayaque, La Libertad 174
6.4 Carretera a Verapaz, San Vicente 174
6.5 Finca 3 Ríos, San Vicente 174
6.6 Finca 3 Ríos, San Vicente 174

Siglas

AECI	Agencia Española de Cooperación Internacional.
AFPS	Association Francaise du Genie Parasismique.
AID	U.S. Agency for International Development.
AMSS	Area Metropolitana de San Salvador.
ASCE	American Society of Civil Engineering.
ASIA	Asociación de Ingenieros y Arquitectos.
ASTM	American Standars for Testing and Materials.
BFB	Bundesanstalt Für Bodenforschung.
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
CEIG	Centro de Estudios e Investigaciones Geotécnicas.
CEL	Comisión Hidroeléctrica del Río Lempa.
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres.
CEPRODE	Centro de Protección para Desastres.
CIG	Centro de Investigaciones Geotécnicas.
CNR	Centro Nacional de Registros
COEN	Comité de Emergencia Nacional.
COSUDE	Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.
CPT	Cone Penetration Test.
EDH	El Diario de Hoy.
EEUU	Estados Unidos de Norte América
EERI	Earthquake Engineering Research Institute.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FHWA	Federal Highway Administration
GESAL	Geotérmica Salvadoreña.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global.
GSA	Geological Survey of Alabama.
GSC	Geological Survey of Canada.
IGME	Instituto Geológico y Minero de España.
IGN	Instituto Geográfico Nacional.

IGNTG	Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia"
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.
JSCE	Japanese Society of Civil Engineers.
LPG	La Prensa Gráfica.
MARN	Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
MOP	Ministerio de Obras Públicas.
NEIC	National Earthquake Information Center.
NGI	Norges Geotekniske Institutt.
NORSAR	Norwegian Seismic Array.
NTNU	Norges Tecknisk Naturvitenskapelige Universitet.
OCR	Relación de Preconsolidación (Overconsolidation Ratio).
RIT	Royal Institute of Technology.
SIG	Sistema de Información Geográfica.
SPT	Standar Penetration Test.
SSA	Seismological Society of America.
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
UCA	Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".
UES	Universidad de El Salvador.
UNESCO	Organización para la Educación Científico Cultural de las Naciones Unidas.
USGS	U.S. Geological Survey.

Simbología

C	Arcillas.
Cc	Coeficiente de concavidad
Cu	Coeficiente de uniformidad
D_{10}	Diámetro aparente de las partículas que conforman un 10% de un suelo.
D_{30}	Diámetro aparente de las partículas que conforman un 30% de un suelo.
D_{50}	Diámetro aparente de las partículas que conforman un 50% de un suelo.
D_{60}	Diámetro aparente de las partículas que conforman un 60% de un suelo.
Dd	Profundidad de la masa desplazada.
Dr	Profundidad de la superficie de ruptura; densidad relativa.
e	Relación de vacíos del suelo natural en el terreno.
e_{min}	Relación de vacíos en el estado más denso que puede obtenerse en el laboratorio.
e_o	Relación de vacíos del suelo en su estado más suelto
ESE	Coordenada este sureste de un punto geográfico.
e_w	Contenido de agua por unidad de volumen de material sólido.
G	Gravas.
G_s	Gravedad específica.
H	Alta compresibilidad.
h	Altura de un cono circular recto.
IP	Indice de plasticidad.
L	Compresibilidad baja a media; longitud total.
LC	Límite de contracción.
Lcl	Longitud de la línea central.
Ld	Longitud de la masa desplazada.
LL	Límite líquido.
LP	Límite plástico.
Lr	Longitud de la superficie de ruptura.
M	Limos.
mb	Magnitud de Ondas de Cuerpo
Md	Magnitud de Duración

Me	Magnitud de Energía
M_L	Magnitud local
MM	Mercalli Modificada.
Ms	Magnitud de Ondas superficiales
Mw	Magnitud de Momento
N	Parámetro resultante del ensayo de penetración estándar (número de golpes); coordenada norte de un punto geográfico.
n	Porosidad
NNE	Coordenada norte noreste de un punto geográfico.
NNW	Coordenada norte noroeste de un punto geográfico.
O	Limo o arcilla orgánica
P	Mal graduado.
PT	Turba.
r	Radio de un cono circular recto.
S	Arenas.
V	Volumen total del suelo
Vd	Volumen de masa desplazada
Ve	Volumen de material expulsado
Vs	Volumen de sólidos.
Vv	Volumen de vacíos.
Vw	Volumen de agua.
W	Coordenada oeste de un punto geográfico; bien graduado.
w	Contenido de humedad.
Wd	Ancho de la masa desplazada.
WNW	Coordenada oeste noroeste de un punto geográfico.
Wr	Ancho de la superficie de ruptura.
Ws	Peso del suelo seco.
Ww	Peso del agua.
%	Porcentaje.
°	Grados.
'	Minutos.
"	Segundos.

$<$	Menor que.
$>$	Mayor que.
$\geq$	Mayor o igual que.
$\leq$	Menor o igual que.
γ	Peso unitario
γ_w	Peso unitario del agua.
γ_s	Peso unitario del suelo.

Prólogo

Capítulo 1 (Antecedentes)

Se presentan estudios que se han realizado en El Salvador en el campo de la Geología y la Mecánica de Suelos. También, se describen algunos problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica que han sido estudiados y documentados por instituciones nacionales y extranjeras en el país. Al final de este capítulo se define el tema de estudio del presente trabajo, a través del planteamiento de la problemática, de los objetivos y de las limitaciones del mismo.

Capítulo 2 (Geología y Sismología en El Salvador)

Retoma los conceptos básicos de Geología y Sismología, importantes para poder comprender el origen de los problemas geotécnicos asociados a sismos. Además, a partir de estudios realizados, anteriormente por expertos extranjeros y nacionales, se hace una descripción de la formación geológica y geomorfológica de El Salvador; así también, del origen de la actividad sísmica que afecta el territorio salvadoreño.

Capítulo 3 (Mecánica de Suelos)

En un inicio, presenta definiciones y descripciones de algunos tipos de suelo más comunes en el terreno; además, parámetros para una clasificación de tipo visual en campo. Luego, se presentan tablas de clasificación, necesarias para poder identificar los suelos en forma ingenieril. El sistema de clasificación adoptado en este trabajo es el conocido como SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). Finalmente, se describen las pruebas y equipos utilizados en la clasificación del suelo y se agregan algunas fotografías de equipos portátiles.

Capitulo 4 (Factores asociados a actividad sísmica)

Se abordan temas de factores provocados por la naturaleza y por la mano del hombre que influyen en la ocurrencia de problemas geotécnicos al momento de un sismo, tales como: infiltración, erosión, drenaje y rasgos topográficos.

Capítulo 5 (Identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica)

Este capítulo representa la base principal para identificar los diferentes tipos de problemas geotécnicos que se desarrollan en este trabajo, ya que se describen las respectivas causas y características de los asentamientos, hundimientos, licuefacción y los diferentes tipos de movimiento de masas.

Capítulo 6 (Metodología de formulación y validación de Guía y Documento de Capacitación para la identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica)

Aquí se hace una descripción detallada del proceso seguido para formular y validar la Guía de Identificación y el Documento de Capacitación; así también, los recursos empleados para realizar cada uno de ellos.

Capítulo 7 (Conclusiones y Recomendaciones)

En este capítulo se redactan las conclusiones y recomendaciones, que resultan del trabajo realizado.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes.

Hace ya más de 50 años el Dr. Karl Terzaghi definió la Geotecnia: "En vista de la variedad e importancia de la influencia de los factores geológicos en el desempeño del suelo en campo y en los métodos para predecir su comportamiento, las ventajas entre Mecánica de Suelos y la Geología aplicada a la ingeniería aparentan ser un tanto artificiales... pero llegará el momento cuando será apropiado combinar la Mecánica de Suelos y la Geología aplicada a la ingeniería en una sola unidad, bajo el nombre de Geotecnología", [ASCE, 1979: p.384]. Actualmente el nombre que se le da a esta disciplina que abarca la combinación de la Geología y de la tecnología de la ingeniería civil es Geotecnia; ésta implica no solamente el estudio del comportamiento de los suelos, sino también el de las rocas.

Los problemas causados por la ocurrencia de eventos sísmicos en El Salvador que afecten el comportamiento de los suelos y las rocas, serán identificados aplicando la tecnología de la ingeniería civil y la Geología.

1.1.1 Geología

Uno de los primeros estudios en los que se hace una división geológica del país se encuentra en el libro Geología de El Salvador, [Lardé y Larín, 1952]. El autor realiza una división geológica del país, diferenciando entre la zona septentrional o plegamiento montañoso principal y la zona austral o plegamiento montañoso secundario; la más antigua y la más joven, respectivamente. Describe cronológicamente las diferentes formaciones que el país presenta, tomando como referencia estudios realizados en 1869 por los geólogos franceses Augusto Dolffus y Eugenio de Montserrat; así, habla del proceso epirogenético que ocurrió en el país y que formó los "Estratos de Metapán", o "Todos los Santos"; y de la posterior actividad orogenética que dio origen a la "Cadena Costera". Sobre todo se presenta una amplia descripción geológica de los volcanes que han estado activos en los últimos tiempos y realiza una división entre grupos de volcanes que pertenecen a la formación septentrional, a la "Cadena Costera" y a la "Sierra de Chinameca".

La Misión Geológica Alemana del Servicio Geológico de la República Federal de Alemania, Hannover (Bundesanstalt Für Bodenforschung, Hannover) realizó trabajos geológicos en el país, de 1967 a 1973, dentro del convenio sobre ayuda técnica entre los gobiernos de la República de El Salvador y de la República Federal de Alemania (24 de

septiembre de 1963), y con base en los acuerdos del 21 de septiembre de 1966 y del 15 de diciembre de 1969. Básicamente los trabajos que se llevaron a cabo por la Misión Geológica Alemana fueron:

a) Levantamiento geológico – tectónico del país.
b) Trazado de mapas geológicos especiales.
c) Un mapa geológico general de todo el país.
d) Estudio de mejoramiento de las posibilidades económicas de desarrollo del país.
e) Preparación de geólogos salvadoreños para que se dé continuidad a los trabajos geológicos.

El gobierno salvadoreño instituyó al Centro de Estudios de Investigaciones Geotécnicas, CEIG, en la actualidad Centro de Investigaciones Geotécnicas, CIG; como institución contraparte la cual brindó transporte, información topográfica y personal, esto según el convenio entre las dos naciones. La Misión Geológica Alemana entregó al CEIG, desde su primer año de trabajo, 3 reportes anuales y 5 reportes especiales; además, cumpliendo con lo que se estipuló en el literal "d)", se entregaron 10 tomos del Estudio Técnico-Económico de la Industria de Minerales no Metálicos, Rocas y Suelos de El Salvador. El levantamiento geológico del país fue hecho en 54 hojas manuscritas con escala 1: 50 000, cuyos resultados fueron publicados en Alemania en forma de mapas de 6 hojas en escalas de 1: 100 000, que también fueron entregadas al CEIG (1 000 ejemplares de cada hoja); las cuales cubren: Sonsonate, Santa Ana, San Salvador, Chalatenango, San Miguel y Carolina. También fue entregado un mapa geológico general de todo el país, escala 1: 500 000, y un mapa de Area Metropolitana en escala 1: 15 000; así como documentos prácticos para planificación urbana.

En el documento "Léxico Estratigráfico de El Salvador" [Baxter, 1984], se encuentran referencias de consulta para los trabajos geológicos que se efectuaron en el programa de exploración de hidrocarburos realizado en El Salvador en los años 80. El objetivo de este documento es la recopilación de los diferentes aportes geológicos que se realizaron en el país hasta esa fecha, para dar un acceso fácil de consulta. Cubre la secuencia litológica del Mesozoico, el Terciario, y unidades recientes, para lo cual se realiza una descripción en orden cronológico. Este documento viene a ser un complemento, una explicación si se quiere ver así, de los trabajos realizados en el área de Geología en el país.

En la publicación del Ministerio de Cultura y Comunicaciones [1986: p.31], se presenta un apartado sobre Geología, elaborado por Lic. Carlos Aguilar, donde se describe cronológicamente los estudios realizados en el área centroamericana, en los cuales se investigó su composición y origen; luego de la descripción general de la región, se describe la Geología de El Salvador, destacándose los aspectos más relevantes como son: la fosa central, volcanismo y la tectónica. También, las clases de rocas de las que está formado el país, para lo cual se presenta un perfil estratigráfico general, que incluye un resumen de la estratigrafía, desde las sucesiones más jóvenes hasta las más antiguas. Además, detalla la geomorfología del país, en la que se encuentran 6 unidades estructurales, de las cuales se hace una descripción de cada una de ellas: Planicie Costera, Cadena Costera, Fosa Central, Cadena Interior, Fosa Interior y Montaña Fronteriza. Finalizando el estudio geológico con un resumen de la investigación geológica, tanto histórica como científica, que se ha realizado en El Salvador, la cual se detalla cronológicamente.

1.1.2 Mecánica de Suelos

[Guzmán y Burgos, 1980]: "Propiedades Mecánicas de los Suelos del AMSS". El estudio se propone: "Dar una visión de las características físicas, propiedades mecánicas y problemas que presentan los suelos del área metropolitana de San Salvador". Las pruebas y ensayos en las cuales se basan los autores, se llevaron a cabo en la urbanización Ciudad Satélite, urbanización Santa Clara y en la zona franca de San Bartolo; y fueron realizadas por: el Centro de Investigaciones Geotécnicas, CIG, a través de su laboratorio de Mecánica de Suelos; y el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador, concentrándose en la evaluación de la compactación de los suelos, por medio de la prueba Proctor. También se realizaron análisis granulométricos, límites de consistencia, gravedad específica y clasificación del suelo; todo esto se consiguió a través de la extracción de muestras inalteradas de pozos a cielo abierto. La presentación de los resultados se hizo por medio de tablas comparativas y basándose en ellas se llegó a obtener varias conclusiones, de donde destaca la siguiente: "El suelo presenta por consiguiente una gran susceptibilidad a la erosión, tubificación, socavación, licuación y a disminuir rápidamente su resistencia cuando se satura", que va acompañada de su respectiva recomendación: "...Proteger las terracerías, excavaciones, taludes contra el escurrimiento superficial o filtraciones de cualquier tipo por la

susceptibilidad que presenta el suelo del Area Metropolitana a la erosión, tubificación, socavación, licuación y a disminuir rápidamente su resistencia cuando se satura".

El trabajo "Elaboración de normas para la realización de estudios de Mecánica de Suelos, cimentaciones y control de terracerías" [Barrientos et al, 1988]; tuvo como objetivo general elaborar una norma para la realización de estudios de Mecánica de Suelos para la ejecución de los trabajos en suelos, así como el control de estos; a la vez, esta norma se propone garantizar las cimentaciones de las obras construidas en terrenos con problemas de suelos, minimizando los daños debidos a la actividad sísmica, erosión y socavación en épocas lluviosas. Y como objetivos específicos la elaboración de un programa de exploración del subsuelo: determinando el número, separación y profundidad de las perforaciones de la Prueba de Penetración Estándar, SPT; en función del área y del tipo de estructura; establecer criterios para la selección del equipo adecuado, en la compactación, para diferentes tipos de suelos y elaborar un formato con información mínima necesaria.

La Norma Técnica para Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes, [MOP, 1994], en su capítulo 4: "Investigación Geotécnica", propone una metodología para llevar a cabo una investigación geotécnica, la cual comprende la inspección del lugar, métodos de exploración del subsuelo, esfuerzos permisibles y capacidad de carga, parámetros dinámicos del suelo y cómo debe estar conformado un reporte geotécnico. Es importante mencionar que esto último queda abierto al criterio del que elabora el reporte geotécnico: "...Así como todos los ensayos adicionales que a criterio del geotecnista y diseñador, se requieran". Además, el capítulo 6: "Estabilidad de Taludes", define los criterios básicos para el análisis y el diseño de taludes, así como las medidas de protección requeridas para los mismos. Como se puede apreciar, ninguna de las dos fuentes antes mencionadas, propone la elaboración de documentos que ayuden a identificar problemas geotécnicos debido a actividad sísmica.

En el trabajo: "Guía para pruebas de Suelos que se realizan en campo y en el laboratorio, aplicadas en obras de ingeniería civil", [Calderón et al, 1993]; se agrupan los distintos tipos de pruebas necesarias para los diferentes tipos de obras civiles y a la vez, se establece una guía operativa que contiene los resultados de estas pruebas. En este trabajo se encuentran antecedentes de los primeros estudios de suelos elaborados en el país: "Los primeros estudios de suelos hechos en el país, datan a partir de 1955, con la construcción de la

Carretera del Litoral, época en la cual ya existía el Laboratorio de Pruebas y Materiales de Obras Públicas, careciendo éste del personal y equipo adecuado, por lo cual fue necesario contratar a la empresa Norte Americana KNAPEN TIPPET ABBOT MCARTY, la cual dotó al laboratorio de Obras Públicas de equipo y capacitó a su personal; otro aporte fue, los problemas descubiertos a causa del terremoto de 1965, el cual dio la pauta para que los estudios de suelos se volvieran más necesarios". Por otro lado, en el artículo "Construcción, Destrucción y Reconstrucción del Puente San Marcos Lempa", [Cuellar, 1999: p.27], se menciona lo siguiente: "...Fue así que se proyectó la llamada Carretera del Litoral, siendo el paso del río Lempa el elemento de mayor envergadura en su trayecto de unos 300 km. Ya que en ese tiempo no había ninguna experiencia local en obras de esa naturaleza y magnitud, el gobierno promovió en marzo de 1948 un concurso conocido hoy como "Llave en Mano", que comprendía tanto el diseño como la construcción de la Obra. El concurso fue ganado por la corporación John A. Roebling´s Son´s de los Estados Unidos de América...El puente San Marcos Lempa estuvo en servicio durante 29 años (1952-1981)...". Pero, la construcción del puente San Marcos Lempa fue posterior a la construcción del puente Cuscatlán, siempre sobre el río Lempa, atendiendo a este comentario en "Breve Historia del Puente Cuscatlán", [CEL, 1984: p.41], se encuentra lo siguiente: "En el mes de mayo de 1942 quedo terminada la magnifica estructura y el día lunes 25, ante los delegados de la Subsecretaría de Fomento y Obras Públicas...se firmó el acta de recepción correspondiente. Dos semanas después, el sábado 6 de junio tuvo lugar la inauguración...". Siendo esto así, no cabe duda que los primeros estudios en el área de la Mecánica de Suelos no fueron en 1955, sino que se iniciaron mucho antes de esta fecha.

Uno de los estudios realizados a la tierra blanca, publicado bajo el título "Propiedades mecánicas de la tierra blanca y la inestabilidad de taludes", [Bommer et al, 1998: p.15]; tiene como objeto realizar una exploración de las características de los suelos volcánicos y en particular de la tierra blanca; para encontrar las causas de su alta vulnerabilidad a la inestabilidad frente a las lluvias fuertes y a los sismos; refiriéndose principalmente a su cementación. El estudio se realizó a una muestra inalterada de tierra blanca extraída del parqueo anexo de la UCA, trasladándola posteriormente al Imperial College de la Universidad de Londres, en Inglaterra; obteniéndose resultados de granulometría, plasticidad, peso volumétrico, contenido de humedad, etc. Estos resultados

fueron comparados con los obtenidos en el estudio realizado por Guzmán y Melara [1996], siendo los valores obtenidos similares. Además, para estimar la cementación, se realizaron dos pruebas que midieron la succión de la muestra de tierra blanca inalterada: papel filtro en contacto íntimo con el suelo y por medio de un tensiómetro, desarrollado en el Imperial College. Finalmente se hace referencia a la prueba del doble edómetro, que sirve para investigar el colapso o la expansión de suelos parcialmente saturados, concluyendo de las pruebas realizadas que: "Cuando esta muestra se satura una vez sometida a esfuerzos experimenta el colapso debido a la pérdida de los meniscos que proporcionan la succión entre las partículas".

1.1.3 Problemas geotécnicos asociados a terremotos en El Salvador

A continuación se describen algunos casos de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica, los cuales fueron documentados por instituciones nacionales y extranjeras, que en su respectivo momento realizaron estudios de la actividad sísmica en el país:

The Salvador Earthquake of December, 1936, [Levin, 1940]

El antecedente más antiguo, al cual se tuvo acceso, que detalla los problemas geotécnicos debido a actividad sísmica, describe que el sismo fue el día sábado 19 de diciembre de 1936, en San Vicente; el cual ocasionó más de 100 muertes y destruyó muchas viviendas. El artículo, en un primer momento, menciona en forma general la Geología del país, en especial la del área de San Vicente; y la intensidad que se estimó en las diferentes partes del país e incluso de los países vecinos; entre otros muchos factores. En especial se extrae un párrafo del artículo en el cual se evidencia los problemas debido al movimiento de masa que se observaron en los alrededores del volcán de San Vicente: "...De los pocos encontrados por el autor, todas fueron grietas de tensión superficial desarrolladas atrás de los deslizamientos; ninguna más larga de 100 pies ni más profunda de 20. De hecho, los deslizamientos, fueron los fenómenos geológicos superficiales más importantes, causados por el terremoto, y ocurrieron abundantemente en todo el distrito, especialmente en los perfiles más escarpados del volcán. La autopista y las vías del tren fueron especialmente afectadas por los deslizamientos. Estas fueron bloqueadas u obstruidas en aquellos puntos donde las paredes de los taludes de cenizas volcánicas presentaban cortes verticales o muy inclinados. En parte de ceniza consolidada, lo suficientemente suave como para ser cortada fácilmente con la

mano, se ha situado sin soporte en cortes verticales arriba de los 25 pies de altura, deslizándose sobre la vía cuando estos fueron excitados por el terremoto".

The San Salvador Earthquake of May 3, 1965; [Lomnitz y Schultz, 1966]

La misión de reconocimiento de la Organización para la Educación Científico Cultural de las Naciones Unidas, UNESCO, solicitada por el Gobierno de El Salvador, visitó el país en mayo de 1965, y estuvo integrada por las siguientes personas: G. Dengo, G. Fiedler, C. F. Knudson, E. Rosenblueth y C. Lomnitz; el propósito de la visita fue el de estudiar los aspectos sismológicos y geológicos del terremoto, observar los daños y reportar lo observado a la UNESCO. "El día 3 de mayo de 1965 un terremoto destruyó San Salvador, de magnitud de entre 6 y 6,25 según Berkeley, y 5,1 según el USCGS; causando alrededor de 120 muertes". En un primer momento el artículo se enfoca a la descripción de los instrumentos de registro sismológico que poseía el país, dando tanto su ubicación como su número, también describe brevemente la historia de la actividad sísmica en el país; así mismo se enfoca el estudio a los estratos de pómez fluviales, desde el punto de vista geológico, comparando la zona de mayor espesor de estos estratos contra la intensidad asignada en dicha zona: "...Es también notorio que la tendencia general en los lugares de mayor intensidad fueron bruscamente alineados en la dirección de los depósitos de pómez fluviales". La misión evaluó el tipo de daño tanto en estructuras como en el terreno, interesándose en los alrededores del lago de Ilopango, zona en la cual la misión observó movimientos de masa y al parecer licuefacción; atribuyendo el fenómeno a la actividad sísmica, al grado de saturación del terreno y a la gran erosión que presentaba la zona: "El oeste del lago de Ilopango es una región de quebradas espectacularmente erosionadas con paredes inclinadas de 300 a 400 pies de profundidad. Estas quebradas, llamadas Arenales, cortan el estrato de pómez sobre el cual está situada la ciudad. La erosión de los Arenales a la orilla del lago, ha producido depositación de partículas de arena, en el cual se han observado lanzamientos y brotes extensivos. Lodo y agua fueron expulsados a través de grietas y montículos en suelos saturados, como fue el caso el 1880, 1917 y 1919...Grandes deslizamientos fueron observados en estos cortes, pero que esto implique una intensidad alta es dudoso, erosión interna a lo largo de las fisuras de los planos de flexión pudo causar que los taludes fallaran con un poco de provocación externa. Numerosos deslizamientos en cortes naturales y artificiales fueron observados...".

Informe técnico sobre aspectos sismológicos del terremoto en El Salvador, del 19 de junio de 1982; [Alvarez, 1982]

"El día sábado 19 de junio de 1982 se registró un sismo, en la zona de subducción, a las 00 horas con 22 minutos (hora local), con epicentro a unos 70 km, al suroeste de San Salvador, en el Océano Pacífico, entre los 13°21' de latitud norte y 89°38' de longitud oeste, con una profundidad focal estimada preliminarmente de 80 km. La magnitud de este evento fue calculada en 7,0 en la escala de Richter, con una intensidad máxima en San Salvador de VII, en la escala de Mercalli Modificada". Es de hacer notar que los parámetros obtenidos son aproximados, debido a que el equipo con que se contaba en aquellos días falló en el momento de ocurrir el sismo: "...Ya que debido a la violencia del terremoto y a nuestros actuales sismógrafos, que son en su mayoría mecánicos, antes del inicio de la fase sísmica S, los estiletes o plumillas registrantes, fueron lanzados fuera de sus soportes, no obteniéndose por consiguiente, gráficos confiables para el cálculo de las diferencias entre S-P...". También, es importante mencionar que las áreas más afectadas por este sismo fueron las ubicadas en el centro y suroccidente del país: San Salvador, Ahuachapán, Ataco, Comasagua, San Pedro Nonualco y San Miguel Tepezontes. Además, el número de muertes fue de 8 y un promedio de 5 000 personas resultaron damnificadas, un total de 300 viviendas fueron destruidas y unas 1 330 fueron dañadas. En lo referente a los problemas geotécnicos, se detalla lo siguiente: "Con respecto a los deslizamientos del terreno, que en algunos casos obstruyeron el paso de algunas vías de comunicación secundarias, podemos también decir que estos no se debieron tanto a la severidad del terremoto, sino que más bien a la clase de suelo existente en dichas áreas. Por ejemplo, tanto los deslizamientos de los taludes ocurridos sobre la carretera que conduce a Comasagua, como los acaecidos en la carretera hacia la ciudad de Apopa (Troncal del Norte) presentaron dichos problemas", Ver figura 1.1.



Figura 1.1 Deslizamiento en talud de Tierra Blanca sobre carretera Troncal del Norte. [Alvarez, 1982: p.35].

Informe técnico sismológico del terremoto de San Salvador del 10 de octubre de 1986, [Alvarez, 1987], y [LPG, 1986].

El 10 de octubre de 1986, San Salvador sufrió un sismo de magnitud 5,4 Ms a una profundidad focal de 8 km, según datos proporcionados por el Centro de Investigaciones Geotécnicas, CIG; en el cual se apreciaron numerosos problemas geotécnicos, entre ellos el hundimiento de la calle que conduce a los Repartos Santa Marta N°1 y N°2, y que según La Prensa Gráfica [1986: p.4]: "Los repartos Santa Marta N°1 y N°2, se hallan incomunicados entre sí, por el hundimiento de una de sus más importantes arterias viales. Más de 200 metros de vía se han hundido a una profundidad máxima de 2 a 3 metros de su nivel normal...", esto se puede ver en las figuras 1.2 y 1.3. También, se encuentra referencia gráfica de derrumbes y grietas en San Salvador, asociados al evento sísmico en Alvarez [1987], véase las figuras 1.4 y 1.5.

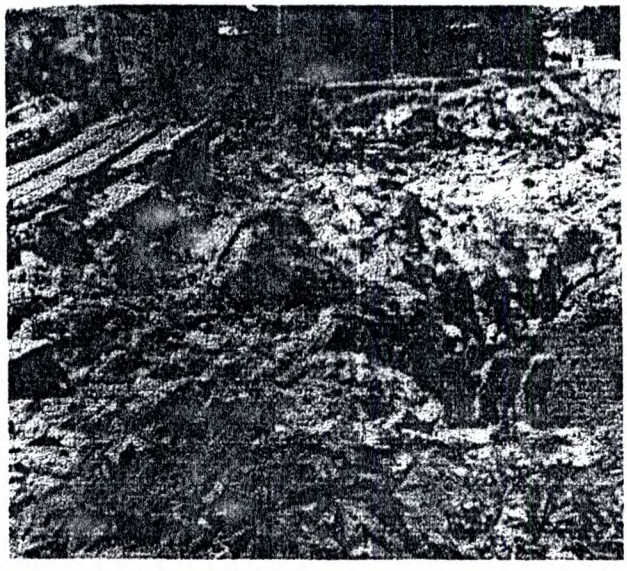


Figura 1.2 Hundimiento de calle en el reparto Santa Marta, San Salvador. [LPG, 1986: p.7].

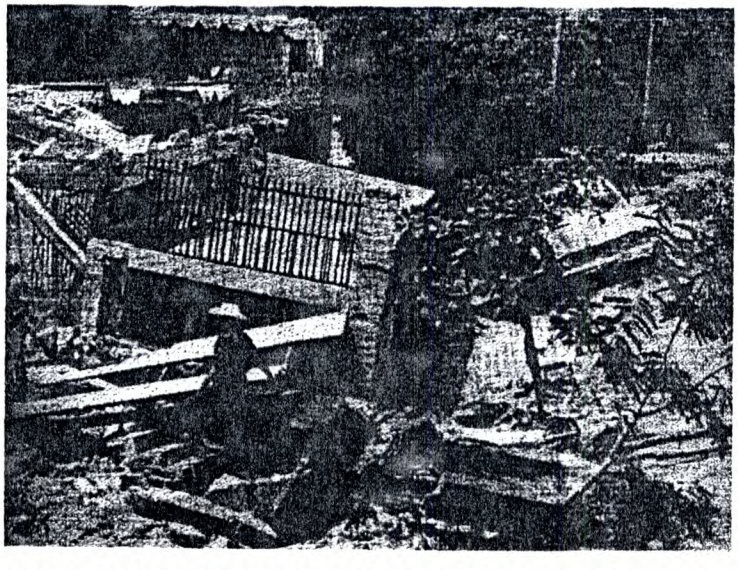


Figura 1.3 Asentamiento de vivienda en el reparto Santa Marta, San Salvador. [LPG, 1986: p.16].



Figura 1.4 Deslizamiento en talud de Tierra Blanca en San Salvador. [Alvarez, 1987: p.49].

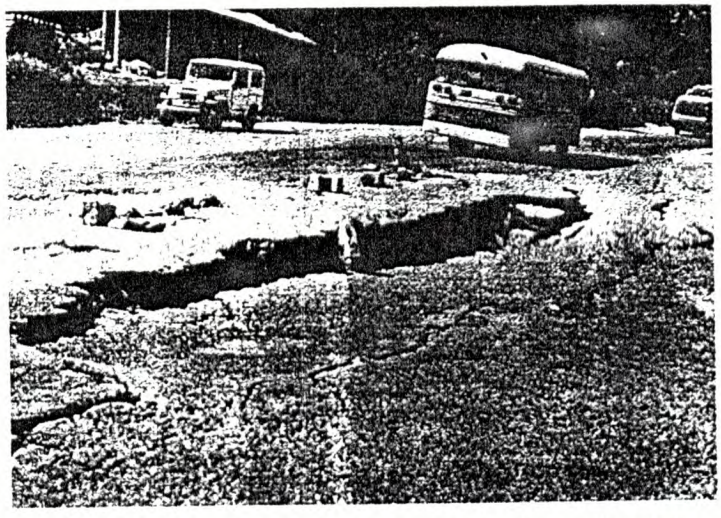


Figura 1.5 Hundimiento y agrietamiento de calle en San Salvador.
[Alvarez, 1987: p.50].

Curiosamente en el trabajo de Barrientos et al [1988], se describe lo siguiente: "Durante el terremoto del 10 de octubre de 1986, se generaron en el suelo, una serie de problemas, entre los cuales se mencionan: a) en la Autopista a Comalapa, existieron asentamientos o grietas que se suscitaron en el subsuelo debido a una mala compacidad. Se realizaron inmediatamente después del terremoto una serie de estudios del subsuelo de dicha autopista y se comprobó una mala compactación; resultado de un suelo con baja capacidad de carga... Este problema se continuará observando, debido a que estamos ubicados en una zona

altamente sísmica. Se puede predecir que ante un movimiento tectónico, habrá de ocasionar nuevos asentamientos y agrietamientos en mayor escala".

También, se describen hundimientos y agrietamientos causados por el sismo: "En la zona del boulevard de los Héroes, a la altura del edificio del MAG, se presentaron problemas de asentamientos, debido a que toda el área que ocupa la colonia Buenos Aires, es una zona de relleno. Esta zona de relleno fue mal compactada, y debido al peso del edificio del MAG, tuvo asentamientos diferenciales hasta de 5 cm de profundidad, lo cual provocó que la estructura colapsara". Además, la misma fuente hace referencia a lo siguiente: "Las diferentes redes hidráulicas sufrieron grandes daños, especialmente las de agua potable... Estas obras son en general susceptibles al pandeo y pueden romperse en un terremoto, provocando tubificación y hundimientos, como sucedió en el puente a la altura del río Acelhuate, sobre la carretera Panamericana (frente a fábrica Eureka)".

Geologic Aspects and Geotechnical Effects [Rymer y Chieruzzi, 1987]

Dentro de los aspectos geológicos se mencionan la magnitud (Ms=5,4), la corta duración del evento (3 a 5 s) y otros datos de interés: como el número aproximado de muertes (1 500) y el número de damnificados (250 000). Otros puntos desarrollados son la estratigrafía, la geología y la tectónica de placas sobre la que está formada la ciudad de San Salvador. Luego, se desarrolla una descripción técnica de todos los fenómenos observados en la capital salvadoreña provocados por el movimiento sísmico, tales como: fallas, brotes de agua, grietas superficiales, desprendimientos y deslizamientos de suelo y rocas, hundimientos y asentamientos, flujos de suelos, fracturas en cresta de cordillera, mala compactación y efectos de licuefacción. Sin embargo, se aclara que este fenómeno de licuefacción sólo pudo ser observado en las zonas de los cerros al norte y al sur de la ciudad. Posteriormente, se hace una discusión general de los efectos del evento sísmico y las causas que pudieron provocar los fenómenos identificados. En el tema de los efectos geotécnicos provocados por el sismo del 10 de octubre de 1986, se describe de forma técnica y geológica las condiciones de las superficies del suelo perteneciente al área de estudio (San Salvador), mencionando elementos históricos del origen, edad geológica y formación del suelo. Así mismo, se hace una descripción técnica más generalizada de los aspectos de deslizamientos de tierra, licuefacción, cimentaciones, la relación de la geología local y las condiciones del suelo con respecto al grado de vibración y destrucción provocados por el sismo.

Hazards in El Salvador from Earthquake Induced Landslides, [Rymer y White, 1989]

El objetivo de este estudio es el de analizar los movimientos de masas ocasionados por el sismo del 86, lo que sirvió para ejemplificar el potencial de movimientos de masas ocasionados por sismos en El Salvador; y presentar un cuadro resumen con 10 casos históricos de movimientos de masas, en el país, inducidos por actividad sísmica.

Entre los movimientos de masa que se describen en el estudio están: flujos de suelo, deslizamientos y desprendimientos. Un dato interesante es el hecho de que el número de muertes por movimiento de masas para el sismo del 86 fue de 200 personas, contra 1 500 personas que fueron reportadas muertas como dato general, representando el 13,3%; mientras que el porcentaje de estructuras destruidas por los movimientos de masas es despreciable en comparación con las estructuras que destruyó el movimiento sísmico. En el caso de los deslizamientos especifican, que la mayor parte de ellos fueron en suelos poco consolidados de cenizas volcánicas y una combinación de suelo y roca en taludes de carreteras y de quebradas; se caracterizó por la falla de taludes debido al corte de su base, caso presentado más que todo a lo largo de carreteras, y al no respetar la zona de protección cerca de quebradas. Los flujos en suelo se dieron en cenizas volcánicas poco consolidadas, en general estos fueron de dimensiones despreciables y no causaron gran daño; solo un flujo se reportó de grandes dimensiones en la parte sur de la cuidad capital. Finalmente se presenta la tabla de movimientos de masas históricos, a los cuales los autores les llaman deslizamientos, del inglés "Landslides", activados por sismos ocurridos en El Salvador; la cual fue uno de los objetivos de este estudio:

Año	Magnitud	Descripción	Referencia
1857	6,25	Muchos deslizamientos en colinas y cañones al este del lago de Ilopango.	Lardé, 1960
1878	6,25 – 6,5	Deslizamientos en los costados de volcanes cercanos a Santiago de María, un gran deslizamiento en el cerro El Tigre 14 personas muertas.	Lardé, 1952
1915	7,9	Muchos grandes deslizamientos en toda la parte oeste de El Salvador.	Lardé, 1960

1919	6,0	Muchos deslizamientos en el cerro de San Jacinto.	Anónimo, 1919
1936	6,1	Muchos deslizamientos en el volcán de San Vicente.	Levin, 1940
1947	7,2	Deslizamientos en el volcán Conchagua.	Meyer-Abich, 1956
1951	6,0 y 6,2	Deslizamientos en pendientes de volcanes cerca de Santiago de María.	Meyer-Abich, 1952
1965	6,0	Deslizamientos en San Salvador y lago de Ilopango.	Lomnitz y Schultz, 1966
1982	7,0	Muchos deslizamientos al sureste de San Salvador.	Lara, 1982
1986	5,4	Cientos de deslizamientos entre San Salvador y el lago de Ilopango con cerca de 200 muertes y al menos unas 100 casas destruidas.	Rymer, 1987

Tabla 1.1 Terremotos históricos que han ocasionado movimientos de masa en El Salvador. [Rymer y White, 1989].

Landslide Hazard at the San Salvador Volcano [Bäcklin y Finnson, 1994]

Esta tesis fue realizada tomando como base de estudio el derrumbe en el volcán de San Salvador en el año de 1982, se realiza una descripción geológica y topográfica del país. También, mencionan las razones por las que los terremotos causan catástrofes en nuestro territorio. Luego, se describen los factores generales de deslizamientos y la clasificación respectiva de los movimientos de masa. El trabajo de la tesis incluye una serie de pruebas realizadas en campo: método volumétrico de la arena de Ottawa y prueba triaxial, presentando sus correspondientes cálculos y resultados.

Remedial Measures Against Landslide Hazards at the San Salvador Volcano, El Salvador [Hrafn y Ledru, 1996]

Dentro del estudio se hace mención de una clasificación de suelos que los autores presentan desde el punto de vista ingenieril, la cual se define a partir de grados de limitación:

bajo, medio y severo; que están basados en la clasificación de suelos de la US Agriculture Departament, Soil Conservation Service. Estos grados están afectados por varios parámetros referentes a las condiciones geotécnicas e hidrológicas del área en estudio. En el estudio se determinan los cuatro tipos de suelo con los que cuenta el AMSS. Luego, se mencionan las principales fuentes sísmicas que afectan a El Salvador y Centro América. A continuación, establece un análisis de estabilidad de taludes sobre la base de la Geología, Geotecnia y la Hidrología. Finalmente, se presenta una metodología para determinar la peligrosidad de deslizamiento de taludes, la cual puede ser asociada a sismo y lluvia.

1.1.4 Terremotos de enero y febrero de 2001 en El Salvador. Informes técnicos.

Dentro de la información técnica proporcionada en los artículos de Cepeda y Salazar [2001: p.14], se describen los parámetros de origen de los terremotos ocurridos el 13 de enero; 13 y 17 de febrero, según el National Earthquake Information Center (NEIC). En estos artículos se describe para el terremoto del 13 de enero, que el evento sísmico se dio lugar a las 11:33:30.3 (hora local de El Salvador), con una ubicación del epicentro frente a las costas salvadoreñas, en la zona de subducción, en las coordenadas geográficas13,063°N y 88,787°W, teniendo el foco una profundidad de 39 km y una magnitud estimada en 7,7 en la escala de Richter. En cuanto al sismo ocurrido el 13 de febrero, a las 8:22:05 (hora local de El Salvador), se localizó en las coordenadas 13,613°N y 89,069°W, dentro del sistema de fallas locales; ubicado en la cadena volcánica, al sur del lago de Ilopango con una profundidad de 13 km y una magnitud de 6,6 en la escala de Richter. Al referirse al sismo del 17 de febrero, ocurre a las 14:25 (hora local de El Salvador), con epicentro ubicado al sur del AMSS, en las coordenadas 13,660°N y 89,248°W; con una profundidad focal de 5,1 km y magnitud de 5,1 según el CIG de El Salvador.

Luego del primero de los dos eventos sísmicos destructores, ocurridos el 13 de enero y el 13 de febrero en El Salvador; se hicieron presente varias instituciones de carácter tanto humanitario como técnico. El objetivo común de estas instituciones fue hacer un estudio técnico de los problemas geotécnicos observados en las áreas afectadas; para esto, se apoyaron con informes geológicos de la Misión Alemana, mapas y estadísticas proporcionadas por el COEN, parámetros publicados por la USGS y también por los resultados obtenidos de la red acelerográfica de la UCA, entre otros. El trabajo realizado por estas instituciones; tanto nacionales como extranjeras, en su mayoría, se resumió en reportes

que describen: los tipos de fenómenos observados, Geología y geomorfología del lugar, análisis, conclusiones y recomendaciones a tomar en cuenta para la mitigación de desastres.

Estudio geológico preliminar de la ladera norte de la sierra del Bálsamo. (Santa Tecla. Departamento de La Libertad. El Salvador) [Dévoli et al, 2001]

El documento contiene un informe preliminar de evaluación de riesgo, realizado durante el período de atención de emergencias y daños, en enero y febrero, como consecuencia del terremoto ocurrido el 13 de enero de 2001. El objetivo del informe es, a partir de un estudio esencialmente visual, dar respuestas inmediatas a las inquietudes más comunes de los pobladores de Santa Tecla referente al riesgo existente en la zona. Los aspectos observados fueron: geomorfología, estructura geológica, hidrogeología, etc. También, se incluye en el informe una metodología de evaluación de riesgo, tablas de clasificación de suelos, límites y alcances. Finalmente, define una serie de recomendaciones a corto, mediano y largo plazo.

Assessment of Landslide Hazards Resulting from the February 13, 2001, El Salvador Earthquake [Baum et al, 2001a]

El reporte, como resultado del trabajo de campo, tiene el objetivo de determinar la probabilidad de desplazamientos de tierra que puedan provocar más pérdidas materiales y humanas en los meses posteriores al sismo del 13 de febrero. Los investigadores efectuaron una calificación de peligrosidad de las zonas afectadas a partir de una clasificación del tipo de suelo, según fue el problema geológico observado, de los cuales se describen los siguientes aspectos: volumen de la cantidad de tierra desplazada, ubicación del lugar donde ocurrió el evento, cuantificación de daños materiales y pérdidas humanas, espesores de las capas de suelo y ancho de grietas en rocas y suelo. El trabajo de campo se desarrolló, específicamente, en los siguientes lugares: río El Desagüe, río Jiboa, volcán de San Vicente, cordillera del Bálsamo y San Agustín. Así mismo, el reporte menciona los efectos de tipo geológico y estructural causados por estos desplazamientos de tierra en cada una de las zonas de estudio, por ejemplo: inundaciones o desbordes de agua, etc. Finalmente, menciona las posibles opciones de mitigación a cada uno de los problemas con soluciones tanto estructurales como geológicas.

U.S. Geological Survey Reconnaissance Field Observations and Recommendations Landslides Induced by the 13 February 2001 Earthquake – Preliminary Conclusions [Baum et al, 2001b]

Los problemas evaluados en este reporte son los siguientes: el riesgo de deslizamiento en los diques del río Jiboa y El Desagüe; la potencialidad de flujo de desperdicios o escombros en el flanco noroeste del volcán de San Vicente, específicamente las quebradas del Muerto y el Blanco; también, la potencialidad de flujo de tierra en el cantón y caserío San Agustín, sobre la orilla noreste del lago de Ilopango. Luego desarrolla una descripción técnica de cada una de las áreas afectadas; los datos obtenidos en cada una fueron: localización, volumen de tierra movilizada, tipo de material desplazado, profundidad del agua, volumen y dimensiones del lago, época de llenado del lago, descargas pico de agua y opciones de mitigación.

Observations and Recommendations Regarding Landslide Hazards Related to the 13 January 2001 M-7,6 El Salvador Earthquake: Preliminary Report [Jibson y Crown, 2001]

Principalmente, este reporte hace una descripción de la situación geológica y topográfica de los lugares que experimentaron movimientos de masas, para luego identificar las áreas que representan un riesgo inminente para los pobladores de estos lugares. Dentro del reporte se presenta un informe de los datos recopilados en cada una de las zonas observadas, los cuales describen: localización geográfica, recomendaciones de urgencia, situación geológica y poblacional. Los lugares observados fueron los siguientes: Santa Elena, riscos altos arriba de Santa Elena, colegios La Floresta y Lamatepec, poblados de Zaragoza (El Tránsito, camino entre El Tránsito y Zaragoza, Altos del Río, Santa Teresita), Alpes Suizos, calle de Las Delicias a Comasagua, Madreselva, La Cima III y IV, carretera Panamericana, Geotérmica de Berlín, calle de Berlín a Alegría, laguna de Alegría, calle de Alegría a Santiago de María, calle de Santiago de María a Usulután y San Pedro Masahuat. Cabe señalar que para la cordillera del Bálsamo se presenta un estudio un poco más detallado, que incluye: estratigrafía del suelo, prioridades de mitigación de riesgo a deslizamiento de tierra, estudio geológico, inventario de deslizamientos de tierra ocurridos, estudio geotécnico, análisis y resultado del mismo donde incluye un mapa con áreas de mayor riesgo a deslizamientos de tierra.

Landslides Triggered by the January 13, 2001 El Salvador Earthquake; Initial Reconnaissance Observations and Recommendations [Evans, 2001]

Los problemas de carácter geotécnico aquí mencionados son los siguientes: desprendimiento de rocas, deslizamiento de suelos en laderas, hundimientos y desplomes, avalancha de escombros, fluidos, esparcimientos laterales de tierra y fallas en suelo y rocas. Este reporte centra sus observaciones geológicas en los deslizamientos de tierra ocurridos en la cordillera del Bálsamo, aunque en sus recomendaciones generales incluye otros lugares reconocidos por vista aérea como: Los Amates, colonia La Palma, colegio Lamatepec, colonia Las Piletas y quebradas en los alrededores del lago de Ilopango.

Evaluación de riesgos y prevención de desastres en el municipio de Colón, departamento de La Libertad [COSUDE, 2001]

Dentro de los objetivos de este estudio están: la contabilización de daños ocasionados por los terremotos del 13 de enero y 13 de febrero de 2001 en el municipio de Colón, promover la capacitación de profesionales salvadoreños en la evaluación de riesgos y prevención de desastres ocasionados por deslizamientos en cada una de las zonas de estudio, así como de las amenazas de inundaciones a través de la elaboración de un documento técnico. La metodología de la investigación para dicho informe cuenta con la adquisición de fotografías aéreas, mapas, hojas cartográficas disponibles y datos climatológicos y de la población. El análisis para la evaluación de riesgos y prevención de desastres combina el efecto que puede ocasionar un deslizamiento de un determinado volumen de tierra, relacionándolo con el caudal de los ríos de interés. El elemento principal del estudio recae sobre la elaboración de fichas de campo, las cuales cubren aspectos como: lugar visitado, caracterización de la amenaza geológica e hidrológica, elementos expuestos y medidas recomendadas. También se agregan un estudio hidrológico y geológico así como la identificación y zonificación de las zonas de riesgo. Además, se dan recomendaciones para el corto y mediano plazo en las zonas bajo amenaza.

Estudio de la crisis sísmica de enero y febrero de 2001 en El Salvador [Misión Técnica Española, 2001]

El estudio comprende la redacción de las observaciones y acciones hechas por la Misión Técnica Española en su visita a El Salvador en el primer trimestre del año 2001. La

información inicial son los parámetros de los sismos ocurridos en enero y febrero, lo cual los lleva a concluir, basándose en la información tomada de las fuentes antes mencionadas, aspectos relacionados con las réplicas de los sismos, la energía liberada, las magnitudes registradas, la profundidad de los focos, etc. A continuación el informe presenta relaciones porcentuales, haciendo uso de tablas y de gráficos de barra de las diferentes distribuciones, por departamento, tales como fallecidos, heridos, damnificados, soterrados, viviendas dañadas y destruidas, edificios públicos e iglesias dañadas y derrumbes; también, se hace un análisis general de daños y elaboran conclusiones, en base a estos porcentajes. Luego, se describen los itinerarios que la delegación recorrió, la valoración de daños que se realizó y las posibles medidas de corrección; los lugares que la delegación visitó fueron los siguientes: sur del lago de Ilopango, San Pedro Masahuat, San Antonio Masahuat, San Miguel Tepezontes, Santiago Texacuangos, Santa Tecla, Las Colinas y Comasagua, ruta carretera del Litoral hasta Berlín pasando por Santiago de María; tomando datos y emitiendo recomendaciones de acciones correctoras a estructuras dañadas: casas de uno y dos pisos, de adobe, bahareque, mampostería confinada y mampostería con refuerzo integral; movimientos de masas, etc.; asignando una intensidad en cada lugar de acuerdo al nivel de daño observado en personas, estructuras y suelos. La segunda parte del informe se concentra en los deslizamientos que fueron visitados por la delegación, cordillera del Bálsamo sur, norte y zona urbana, y la zona de Berlín, Tecapán y Santiago de María; describiendo de estos su ubicación, litología y geomorfología; se hace una introducción a lo que son los distintos tipos de deslizamientos, entendiendo aquí la palabra deslizamientos como movimientos de masas; también, se hace referencia a las propiedades mecánicas de las cenizas volcánicas y sus consecuencias en la inestabilidad de taludes, así, se refieren a las edades de los materiales, sus respectivas clasificaciones, topografía, elevaciones y propiedades geotécnicas; para lo cual se tomaron muestras alteradas al sur del lago de Ilopango y se les hicieron ensayos de laboratorio. Posteriormente, elaboraron un inventario de los deslizamientos visitados: cordillera del Bálsamo sur y norte, zona de la ciudad de Santa Tecla, zona de Berlín; en el cual se describe todo lo observado. Además, se presenta un breve análisis de riesgo previendo lo que pueda suceder en el invierno próximo. Se finaliza el reporte con recomendaciones y conclusiones de carácter general, de donde se extrae lo siguiente: "La alta vulnerabilidad de estos suelos es un factor decisivo en la explicación del número de deslizamientos debidos a los terremotos. Esta vulnerabilidad depende tanto de las condiciones in situ (humedad, succión) como de los

efectos locales que producen importantes amplificaciones. La naturaleza no saturada de estos suelos y su fragilidad, explica en buena medida su facilidad al deslave".

Landslide Hazards in El Salvador Triggered by the 13 January 2001 Earthquake [Harp y Vallance, 2001]

En colaboración con la U.S. Agency for International Development, AID; el equipo del USGS, integrado por Edwin Harp y James Vallance, elaboró un breve informe de lo observado en la mitad sur del país: lago de Ilopango, lago de Coatepeque, cordillera del Bálsamo, carretera Panamericana cerca de San Vicente, Usulután y zonas vecinas. El informe inicia con la descripción de los datos que caracterizaron al evento sísmico del 13 de enero: magnitud, tipo de movimientos de masa, volumen de masa desplazado, número aproximado de muertes, etc.; luego se mencionan la clasificación de los materiales geológicos observados en cada uno de los lugares que fueron visitados, destacando en esta clasificación: el origen geológico, la edad geológica, el tipo y espesor de los estratos; los reconocimientos de los lugares antes mencionados fueron hechos vía aérea y vía terrestre, basándose en la observación de los profesionales antes mencionados, con el objetivo de advertir al gobierno salvadoreño del riesgo y de la probabilidad del movimiento de masas en un futuro. Luego se tipifican los riesgos a los que la población cercana a los lugares de desastre está expuesta, así como también aquellas áreas propensas a presentar problemas en la época de invierno; estos riesgos son la existencia de taludes muy inclinados de tierra blanca y laderas de volcanes, que no colapsaron con el sismo, pero están próximas al colapso debido a la saturación del suelo y a posteriores movimientos sísmicos. Finalmente, recomiendan medidas de mitigación a corto plazo, las cuales son preliminares debido a lo prematuro del estudio: evacuación y restricción de las zonas urbanas afectadas; y a largo plazo recomiendan un estudio geotécnico con el objetivo de proponer medidas de protección contra los movimientos de masas, el cual incluye: estudios de drenajes, estudios de suelos, elaboración de un plano con áreas de peligrosidad, adquisición de fotografías 1:6 000 de un área de 15 x 40 km y la supervisión de una empresa consultora en el área de geotecnia.

Deslizamientos y flujos de tierra en Las Colinas, Nueva San Salvador [Mendoza y Domínguez, 2001]

Este artículo cubre solamente el área de la colonia Las Colinas, en Santa Tecla, y tiene el objetivo de realizar un diagnóstico del movimiento de masa y sugerir propuestas de posibles medidas de estabilización. El estudio geotécnico elaborado fue complementado con mediciones topográficas aproximadas, que se efectuaron con equipo electrónico portátil: distanciómetro, clinómetro, altímetro, brújula y Sistema de Posicionamiento Global (GPS). También, se tomaron muestras del material de la zona con el objeto de identificarlo, clasificarlo y conocer sus propiedades mecánicas; para este fin se recolectaron 6 muestras en el lugar, las cuales fueron llevadas al laboratorio de dinámica de suelos del CENAPRED, cuyos resultados: porcentaje de humedad, índice de plasticidad, porcentaje de gruesos, porcentaje de finos, gravedad específica y clasificación según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS); se detallan en el artículo. Además, se dan las medidas de mitigación, que ellos consideran necesarias, para la estabilización de la ladera.

Technical Mission to El Salvador, Following the January 13 Earthquake [Lindholm et al, 2001]

La misión noruega y sus colaboradores realizaron el reporte en febrero de 2001, cubriendo la mayor parte de los lugares afectados por el evento del 13 de enero. El objetivo de la misión fue el de evaluar el daño ocasionado por el terremoto por medio de la elaboración de estudios de riesgo, y aprovechar la oportunidad para que los profesionales del área centroamericana aprendan de los daños ocasionados por el evento. Basándose en la información recolectada por las estaciones acelerográficas de la UCA, se presenta el detalle de las aceleraciones observadas en distintos lugares, correspondientes a la ubicación de cada estación. Además, se describen las particularidades del evento: no se registro ningún Tsunami, reporte de daños menores a lo largo de la costa y la gran cantidad de movimientos de masas, que "Según los argumentos de Young et al (1997): a mayores ángulos en el plano de falla normal, existen mayores daños debido a los efectos de la directividad". Seguidamente, se aborda el tema de la amplificación de las ondas sísmicas causada por los depósitos de suelo y la topografía de cada lugar, observando en gran escala estos fenómenos en la Villa de San Agustín y la cordillera del Bálsamo. La recolección de datos de los daños observados cubre cuatro categorías: daños en estructuras de mampostería, daños en estructuras de adobe, daños

causados por deslizamientos y daños causados por licuefacción. Prácticamente la observación de los daños en mampostería y adobe fue realizada en Comasagua; mientras que los daños causados por deslizamiento y licuefacción fueron observados en la cordillera del Bálsamo y el Bajo Lempa, respectivamente.

Earthquake Disaster in El Salvador due to the Earthquake of January 13,2001 [Salazar y Seo, 2001]

Con el objetivo de observar los daños causados por el sismo del 13 de enero en la infraestructura y terreno, y el análisis del registro del movimiento fuerte de la red de acelerógrafos de la UCA; se realizaron visitas a distintos lugares de El Salvador: San Salvador, Armenia, Las Colinas, Comasagua, carretera Panamericana cerca de San Vicente, Santiago de María, Berlín y Alegría. De este reporte se presentan importantes conclusiones: "Las características del movimiento fuerte, de corto período, y las condiciones topográficas y geológicas de los distintos lugares afectados fueron los factores que contribuyeron a la mayoría de los movimientos de masas; los daños en las estructuras fueron debidos a la baja calidad en las reparaciones hechas después del sismo de 1986; el bahareque se comporta mejor que el adobe desde el punto de vista de la ingeniería sísmica y que la educación de la población en cuanto a los movimientos sísmicos es importante para entender lo que implican estos eventos".

Provisional Report on the January 13, 2001 Earthquake Occurred off the Ooast of El Salvador [JSCE, 2001]

Cubriendo las siguientes áreas afectadas: Las Colinas y Los Chorros, Bajo Lempa, San Agustín, Berlín y Santiago de María; el equipo se dividió en dos grupos: el primer grupo que se ocupó de los movimientos de masas elaborando levantamientos en tercera dimensión de la configuración de estos, realizando pruebas in-situ y tomando muestras para ser ensayadas por medio del anillo de corte; y el segundo grupo que se ocupó del análisis del movimiento fuerte del terreno midiendo microtemblores y la observación de los daños a la infraestructura. Los objetivos perseguidos por el equipo fueron: evaluación general de los movimientos de masa y licuefacción, inspección de daños en estructuras y análisis de movimiento fuerte del suelo. Los volúmenes de masa desplazada lo obtuvieron por medio de un teodolito láser (láser ACE 300) el cual está conectado a una computadora portátil y posee

una brujula digital que ubica, por medio del láser, distintos puntos del terreno, generando una imagen tridimensional. Para las pruebas realizadas in-situ se utilizó el cono de penetración, para medir la variación de N con la profundidad. Finamente, las siguientes recomendaciones fueron elaboradas: "Se recomienda la elaboración de estudios y medidas siguientes: mapa de grietas con su respectivo monitoreo de movimiento, remoción del material colapsado, análisis de las propiedades mecánicas de los sedimentos volcánicos, anclaje de los taludes propensos a colapsar y trabajos de drenaje preventivos".

Le Seisme du 13 Janvier 2001 au Salvador [AFPS, 2001]

La misión francesa presenta el reporte más completo, en comparación con las demás delegaciones extranjeras que elaboraron sus respectivos reportes, debido a que analiza tanto el sismo del 13 de enero como el del 13 de febrero, además presenta el contexto social, político e histórico del país; los lugares visitados cubren casi por completo toda las zonas de daños, análisis de los efectos del sitio, fenómenos inducidos, reconocimiento de infraestructura y además un estudio y análisis psicológico de las poblaciones afectadas. Los lugares visitados por la misión son: el aeropuerto de El Salvador, Cerro Verde, lago de Coatepeque, lago de Ilopango, la Libertad, Las Colinas, Comasagua, Santa Tecla, Armenia, La Herradura, Las Hojas, San Pedro Masahuat, San Salvador, San Vicente, carretera Panamericana, Bajo Lempa, Usulután, Santiago de María, puerto el Triunfo, San Agustín y San Miguel. En esos lugares se describió la geodinámica y la geomorfología, la sismotectónica, el historial sísmico y el contexto geológico. Se evaluaron los parámetros de los sismos, haciendo comparaciones porcentuales por departamento, utilizando gráficos de barra; también el registro de movimiento fuerte, tomado como fuente la red de acelerogafos de la UCA y de la Geotérmica Salvadoreña (GESAL), de los cuales se elaboraron espectros elásticos de respuesta comparándolos con los que propone la Norma Técnica para Diseño por Sismo de El Salvador: "...Resultando aceleraciones espectrales mayores en los registros elaborados, al compáralos con los de la Norma Técnica para Diseño por Sismo de El Salvador, en zonas de períodos bajos...Pero para las zonas de alto período las aceleraciones espectrales elaboradas fueron más bajas que las propuestas por dicha Norma". Los efectos del sitio se dividieron en tres categorías, según las zonas visitadas: los efectos geológicos fueron estudiados en San Salvador, Santa Tecla, puerto de la Libertad y Usulután; los efectos topográficos en Las Colinas y Armenia y los efectos a los que se les dió la denominación de indeterminados en

San Agustín, san Pedro Nonualco y en toda la cordillera central del país. También, estudiaron los fenómenos inducidos: licuefacción y movimiento de masas en: Las Hojas, pista del aeropuerto y Bajo Lempa; Las Colinas, Los Chorros y La Leona, respectivamente; en los cuales hacen un análisis en base a las grietas encontradas en los respectivos lugares, de compresión y cizallamiento, producidas por el efecto de las ondas superficiales. La infraestructura fue evaluada en casas de adobe, bahareque y mampostería, describiendo los respectivos sistemas constructivos; de las cuales se comparó el daño con el tipo de construcción. También, se realizó el reconocimiento de los puentes y las centrales hidroeléctricas sobre el río Lempa, muelles, hospitales, capillas y catedrales, las torres del funicular del Teleférico, vías terrestres y del ferrocarril, red de tuberías de drenaje y alcantarillado y red de distribución de energía. Entre las conclusiones que se elaboraron figuran las siguientes: "Realización de un esfuerzo de microzonificación sísmica y elaboración de una cartografía más precisa, esfuerzo en materia de reglamentación y técnicas constructivas, aplicación de los reglamentos desde el punto de vista constructivo y jurídico, elaboración de planes de gestión de crisis y de reconstrucción". Las recomendaciones elaboradas se dividen en dos grupos, las de prevención: haciendo énfasis en el área sísmica, cartográfica, instrumental, institucional y normativa; y las de difusión de los fenómenos naturales por medio de las instituciones correspondientes y por medio de la cartografía.

1.1.5 Trabajos de graduación

Evaluación del peligro sísmico secundario para planeamiento urbano en El Salvador [Alvarado et al, 1999]

El objeto de esta investigación es el de evaluar el peligro derivado de fenómenos sísmicos, para la creación de herramientas, mapa de susceptibilidad al peligro sísmico secundario, que puedan utilizarse en la planificación de obras civiles. El peligro derivado de fenómenos sísmicos fue dividido en dos categorías: fenómenos primarios, que se define como la peligrosidad asociada directamente a las ondas sísmicas; y fenómenos secundarios, que son la amplificación de movimiento del terreno, deslizamientos de tierra y licuefacción; basándose en el mapa de usos ingenieriles, propuesto por el mismo trabajo, que es una simplificación del Mapa Geológico de El Salvador elaborado por la Misión geológica Alemana. Cabe hacer notar que el resultado final de esta investigación no busca sustituir los

estudios geotécnicos de detalle en el campo, es decir, no se pretende alcanzar definitivamente un diagnóstico de las condiciones del lugar.

Asentamiento de los suelos [Rodríguez, 1980]

En este estudio se aborda el problema de la consolidación del suelo, la cual causa asentamientos; bajo un enfoque matemático, es tratada la expulsión de agua de poros en el proceso de consolidación. A través de modelos matemáticos y físicos, bajo el nombre de vibraciones en sistemas físicos ideales, se trata de explicar el fenómeno del asentamiento en los suelos, para lo cual se evalúa el comportamiento de los suelos ante cargas dinámicas, que a su vez valida los modelos.

Criterios geotécnicos de microzonificación y estimación de las propiedades mecánicas de los suelos del AMSS [Aguilar y Bendaña, 1984]

Se presentan los estudios geotécnicos básicos para llevar a cabo una microzonificación sísmica en el AMSS y se explica la importancia de estos en el proceso general. La región de estudio se ubica dentro del marco sismo-geológico regional, con especial énfasis en los aspectos tectónicos.

Estudio geológico y geotécnico del río Las Cañas y sus problemas relacionados con la erosión [Posada et al, 1986]

Estudio del cual se toman recomendaciones tanto del tipo ingenieril, medidas mecánicas, como también de conservación, con lo cual se pretende que estas sean de utilidad para aminorar el problema que en aquellos días se percibía en la mayoría de los ríos de El Salvador y en especial en el río Las Cañas. También se plantean lineamientos con respecto a los aspectos legales en el área de medio ambiente, y a la vez, se dan alternativas de solución a los problemas de erosión encontrados en el río Las Cañas, realizando para ello un análisis costo-beneficio de las obras propuestas.

Investigación geológica y geotécnica del río Acelhuate y quebrada Arenal de Montserrat, localización de zonas críticas y recomendaciones [Barrios et al, 1987]

Se detallan los problemas de riesgo, basándose en el estudio hidrológico, geológico y geotécnico de la zona, con el propósito de conocer tres parámetros determinantes: densidad

relativa, altura crítica de taludes y máxima crecida que podría ocurrir en un periodo de retorno dado.

Características físicas y mecánicas de los suelos del la ciudad de San Miguel [Granada et al, 1995]

Estudio realizado en la ciudad de San Miguel, con el objetivo de determinar las características físicas y mecánicas de los suelos de esa ciudad por medio de la elaboración de pruebas triaxiales y de Penetración Estándar, y un programa de ensayos de las muestras extraídas de los sondeos ubicados en zonas urbanizadas y urbanizables a corto plazo. Para esto se define una zonificación de la ciudad con el fin de plasmar gráficamente sus características mecánicas.

Correlaciones entre propiedades mecánicas, estáticas y dinámicas en los suelos del AMSS. Primera etapa [Castaneda et al, 1996]

Se utilizan los resultados obtenidos del péndulo de torsión libre para la determinación del módulo de rigidez al cortante del suelo de 40 sondeos realizados en el AMSS. Los resultados experimentales que fueron obtenidos son comparados con correlaciones existentes, hasta esa fecha, entre las propiedades mecánicas estáticas y dinámicas, a fin de comprobar la aplicabilidad de éstas últimas para los suelos del AMSS. Se propone una ecuación para obtener el módulo de rigidez al cortante en función de la presión de confinamiento del suelo.

Microzonificación geotécnica del Area Metropolitana de San Salvador. Primera etapa [Guzmán et al, 1996]

Este estudio es una propuesta de microzonificación geotécnica del AMSS en base a los parámetros dinámicos proporcionados por el péndulo de torsión libre; se elabora el estudio de la Geología del AMSS, enfatizando en la determinación aproximada de la profundidad del estrato de roca, para ello se realizaron 40 sondeos para los cuales se cálculo el período fundamental de la columna litológica de cada uno de ellos, dando como resultado un mapa de curvas de iguales condiciones de comportamiento dinámico construidas en base a la información de estos sondeos.

Los terremotos destructores en El Salvador en el siglo XX [Madrid et al, 1998]

Análisis de los sismos ocurridos en El Salvador en el siglo XX, basándose en la revisión de diferentes catálogos sísmicos existentes hasta la fecha de realización del trabajo, e información macrosísmica recopilada. Como resultado se elaboró un listado unificado en donde para cada terremoto se describen sus aspectos sismológicos, su historia sísmica y un recuento de efectos observados; esto después de haber analizado cada uno de los terremotos destructores que presentan los catálogos. Se tiene como objetivo que el listado constituya una fuente de datos en la cual se encuentre unificada la información existente hasta esa fecha.

Introducción al estudio de los suelos parcialmente saturados e inicio de la caracterización de la tierra blanca del AMSS [Amaya y Hayem, 2000]

Introducción al concepto y teoría básica de los suelos parcialmente saturados, justificando a su vez el estudio de estos suelos, a partir de la caracterización de la tierra blanca del AMSS, proponiendo para tal propósito una metodología de investigación multidiciplinaria en la que se hace énfasis en el estudio de los fenómenos de succión y cementación del suelo.

Práctica, situación y proyecciones de la ingeniería geotécnica en El Salvador [Trigueros y Vaquerano, 2000]

Se realiza un análisis basándose en numerosas entrevistas realizadas a laboratorios de suelos, empresas diseñadoras-supervisoras de obras civiles y distribuidoras de algunos sistemas de retención. El objeto de estudio fue realizar un diagnóstico de las prácticas de diseño y construcción de estructuras geotécnicas, con el propósito de identificar los criterios de los profesionales dedicados a esta área y estimar proyecciones de la ingeniería geotécnica en el país.

1.1.6 Generales

A Suggested Method for Reporting a Landslide [UNESCO, 1989]

Recopilando información de apoyo para la realización de la guía de identificación, se encontró el método sugerido por The Internacional Geotechnical Societies [UNESCO, 1989], el cual, a través de un boletín fija establecer un inventario histórico mundial de deslizamientos de tierra, con el propósito de disminuir los desastres naturales. En este boletín se incluye una descripción técnica de cada uno de los aspectos que se deben incluir en el reporte del estudio

de campo. Al final, se presenta el formato guía de una ficha para recopilar la información de campo.

Métodos utilizados para mitigar la licuación y mejorar el comportamiento sísmico de los suelos, [Báez et al, 1997].

El propósito del artículo es presentar los métodos más utilizados y efectivos para mitigar, prevenir la licuación y cómo controlar sus efectos. El artículo también define condiciones específicas bajo las cuales se da el fenómeno de licuación, según el Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos (U.S.NRC, 1985). Otros temas que se desarrollan brevemente, son los métodos utilizados para prevenir el fenómeno, hasta esa fecha, entre los que menciona Métodos Vibratorios: vibro compactación, vibro sustitución, columnas de vibro concreto y consideraciones de diseño de los sistemas vibratorios; así también, menciona otros métodos como: Inyecciones, Jet Grouting y Deep Soil Mixing (DSM). Luego, se mencionan algunos eventos sísmicos donde se ha experimentado el fenómeno de licuación y que a la vez se han aplicado algunos de los métodos antes mencionado, explicando su consiguiente comportamiento ante el fenómeno ocurrido. Los eventos que cita son los siguientes: Terremoto de Loma Prieta 1989 (San Francisco), Terremoto de Northridge1994 (Los Ángeles) y Terremoto de Hyogoken-Nambu 1995 (Kobe, Japón). Finalmente, refiere algunas conclusiones ante el fenómeno de licuación.

1.1.7 Tabla de antecedentes documentados

Referencia	Contexto	Institución	Tipo de bibliografía
Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación [2001]	Misión de reconocimiento post-sismo	COSUDE	Informe técnico
Aguilar, R.A., J.E. Bendaña Salinas y R.A. Cedillos Ortiz [1984]	Mecánica de Suelos	UCA	Trabajo de graduación
Alvarado, J.C., S.E. Campos Villegas y S.J. Pérez Hernández [1999]	Sismología	UES	Trabajo de graduación

Alvarez, S. [1982]	Sismología	MOP	Informe técnico
Alvarez, S. [1987]	Sismología	MOP	Informe técnico
Amaya, C.A. y E.A. Hayem Brevé [2000]	Mecánica de Suelos	UCA	Trabajo de graduación
American Society of Civil Engineering [1979]	Geotecnia	ASCE	Artículo
Association Francaise du Genie Parasismique [2001]	Misión de reconocimiento post-sismo	AFPS	Informe técnico
Bäcklin, C. y H. Finnson [1994]	Estudio de riesgo a deslizamientos	RIT	Trabajo de graduación
Báez, J.I. [1997]	Mecánica de Suelos	ASIA	Artículo
Barrientos, M.J., R.F. Monroy Ayala y J.G. Solís Rivas [1988]	Mecánica de Suelos	UES	Trabajo de graduación
Barrios, H.L., M.I. Henríquez Chávez y M.H. Hidalgo Somoza [1987]	Geotecnia	UCA	Trabajo de graduación
Baum, R.L., A.J. Crone, D. Escobar, E.L. Harp, J.J. Major, M. Martinez, C. Pullinger y M.E. Smith. [2001a]	Misión de reconocimiento post-sismo	AID y USGS	Informe técnico
Baum, R.L., A.J. Crone, D. Escobar, E.L. Harp, J.J. Major, M. Martinez, C. Pullinger y M.E. Smith. [2001b]	Misión de reconocimiento post-sismo	AID y USGS	Informe técnico
Baxter, S. [1984]	Geología	CEL	Publicación
Bommer, J., R. Rolo y P. Méndez [1998]	Mecánica de Suelos	ASIA	Artículo
Calderón, N.M., O.R.	Mecánica de Suelos	UES	Trabajo de graduación

Chávez Gallo, R.A. López Rivera y H.L. Perdomo Ulloa [1993]			
Castaneda, J.R., J.R. Duarte Saldaña y R. Menéndez Espinoza [1996]	Mecánica de Suelos	UCA	Trabajo de graduación
CEL [1984]	Historia	ASIA	Artículo
Cepeda, J. y W. Salazar [2001]	Sismología	UCA	Artículo
Cuéllar, E. [1999]	Historia	ASIA	Artículo
Dévoli, G., C. Egger, D. Ferrés y J. Rubio [2001]	Misión de reconocimiento post-sismo	CEPRODE, Geólogos del Mundo e INETER	Informe técnico
Evans, S.G. [2001]	Misión de reconocimiento post-sismo	GSC	Informe técnico
Granada, S.E., D.E. Santos Romero, R.A. Aparicio Echegoyen y R.A Samayoa Lara [1995]	Mecánica de Suelos	UCA	Trabajo de graduación
Guzmán, C.L., R.E. Linares Guzmán y M.R. Morales Huezo [1996]	Geotecnia	UCA	Trabajo de graduación
Guzmán, M.A. y E. Melara [1996]	Mecánica de Suelos	ASIA	Artículo
Guzmán, M.A. y R. Burgos [1980]	Mecánica de Suelos	ASIA	Artículo
Harp, E. y J. Vallance [2001]	Misión de reconocimiento post-sismo	USGS	Informe técnico
Hrafn, S. y O. Ledru	Mitigación de riesgo a	RIT	Trabajo de graduación

[1996]	deslizamientos		
Japan Society of Civil Engineers [2001]	Misión de reconocimiento post-sismo	JSCE	Informe técnico
Jibson, R.W. y A.J. Crone [2001]	Misión de reconocimiento post-sismo	USGS	Informe técnico
Lardé y Larín, J. [1952]	Geología	-	Publicación
Levin, S.B. [1940]	Sismología	SSA	Informe técnico
Lindholm, C., H. Heyerdahl, S. Remseth, E. Camacho, V. Schmidt, G. Marroquín y G. Cruz [2001]	Misión de reconocimiento post-sismo	NORSAR, NGI y NTNU.	Informe técnico
Lomnitz, C. y R. Schultz [1966]	Sismología	SSA	Informe técnico
Madrid, K.I., L.G. Moreno Gutiérrez y D.C. Saracay Pineda [1998]	Sismología	UCA	Trabajo de graduación
Mendoza, M.J. y L. Dominguez [2000]	Misión de reconocimiento post-sismo	ASIA	Artículo
Misión Geológica Alemana [1973]	Geología	BFB	Publicación
Misión Geológica Alemana [1974]	Geología	BFB	Publicación
Misión Técnica Española [2001]	Misión de reconocimiento post-sismo	-	Informe técnico
Posada, M.E., R.A. Martínez Abarca y F.A. Escobar Hidalgo [1986]	Geotecnia	UCA	Trabajo de graduación
Rodríguez, J.E. [1980]	Mecánica de Suelos	UCA	Trabajo de graduación

Rymer, M.J. y R. A. White [1989]	Misión de reconocimiento post-sismo	EERI	Artículo
Rymer, M.J. y R. Chieruzzi [1987]	Misión de reconocimiento post-sismo	EERI	Artículo
Salazar, W. y Seo K. [2001]	Misión de reconocimiento post-sismo	-	Informe técnico
Trigueros, V.J. y R.A. Vaquerano Quijano [2000]	Geotecnia	UCA	Trabajo de graduación

Tabla 1.2 Antecedentes documentados

1.2 Definición del tema.

1.2.1 Problemática.

Ante los evidentes efectos desastrosos experimentados debido a los problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica, se han tomado acciones pasivas por parte de las instituciones gubernamentales y privadas, tanto así que no tiene en el país una formación académica orientada al estudio de la geología y se ha olvidado la continuidad en la investigación en el campo de la geotecnia, dejando así que misiones extranjeras sean las que asimilen a través de sus investigaciones y estudios las experiencias que este tipo de eventos dejan. A pesar de haber existido esfuerzos individuales no se ha concretado un trabajo conjunto del estudio en detalle de estos problemas.

1.2.2 Alcances.

Desarrollar un marco teórico que cubra los conceptos básicos de Geología, Sismología, Mecánica de Suelos, problemas geotécnicos debidos a actividad sísmica y factores asociados a estos problemas geotécnicos.

Formular y validar la Guía de Identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica, la cual tipificará estos problemas geotécnicos de manera preliminar; además de evaluar la vulnerabilidad de las zonas afectadas por dichos problemas. Esta Guía tendrá un carácter de aplicación en la región centroamericana.

Formular y validar un Documento de Capacitación para el personal ejecutor de la Guía de Identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica.

1.2.3 Objetivos.

1.2.3.1 Generales.

Elaborar y validar una "Guía de Identificación de campo" para la caracterización de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica.

Elaborar y validar un "Documento de Capacitación" para el personal que realice la identificación de campo.

Ante la ocurrencia de eventos sísmicos poseer las herramientas necesarias para identificar plenamente problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica, tanto a nivel nacional como centroamericano.

1.2.3.2 Específicos.

Evidenciar la existencia de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica, de los que se tiene registro de El Salvador; además la insuficiencia de estudios de identificación de estos problemas en campo.

Desarrollar conceptos geológicos básicos que sirvan al observador para la identificación en campo de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica.

Conocer el equipo que se utiliza y las pruebas que se realizan en campo para obtener parámetros físicos y mecánicos del suelo in situ.

Conocer otros problemas hidrogeológicos y explicar la influencia que tienen en la ocurrencia de los fenómenos geotécnicos asociados a sismos.

Caracterizar y tipificar cada uno de los problemas geotécnicos determinados en el trabajo.

Determinar preliminarmente el nivel de vulnerabilidad en los lugares donde sea identificado el problema geotécnico.

1.2.4 Limitaciones.

El tiempo con el que se cuenta para la elaboración del trabajo de graduación es limitado, y dada la amplitud del tema, éste se restringe a identificar el tipo de problemas

geotécnicos y los daños causados; pero sin la evaluación del riesgo, ni la determinación de medidas de mitigación.

Las pruebas de campo están sujetas a la capacidad del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Cimentaciones de la UCA.

Los diferentes estudios en el área geotécnica realizados en el país por instituciones nacionales y extranjeras, no son de fácil acceso, perdiendo así el carácter público con el que fueron creados, siendo esta una de las principales limitantes del trabajo.

La validación ideal y deseada de la Guía de Identificación, sólo puede realizarse inmediatamente después de un evento sísmico destructor y no en zonas afectadas que ya han sido mitigadas.

CAPITULO 2

GEOLOGÍA Y SISMOLOGÍA EN EL SALVADOR

2.1 Introducción a la Geología

2.1.1 Conceptos básicos de Geología

2.1.1.1 Minerales y rocas

La Tierra es un cuerpo de forma aproximadamente esférica con un radio de alrededor de los 6 400 km, y está constituida principalmente por tres partes de naturaleza diferente [Judson y Leet, 1990: p.11]:

- Núcleo, mezcla de níquel y hierro dividido en interior (sólido) y exterior (líquido), de unos 3 500 km de espesor aproximadamente.
- Manto, capa viscosa de rocas que fluyen lentamente, de aproximadamente 2 900 km.
- Corteza, compuesta por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, la cual posee un espesor promedio de 5 a 15 km en el fondo del mar, y de 30 a 80 km en las zonas montañosas.

La base de la corteza apoyada sobre el manto se conoce como discontinuidad de Mohorovicic, y la base del manto apoyada sobre el núcleo se conoce como discontinuidad de Wietcher-Gutenberg. El estudio de la Tierra: origen, composición, estructura interna, sucesión de fenómenos físicos, historia y evolución de la vida y su pasado; es de lo que se encarga la Geología, siendo un conjunto ordenado de conocimientos de la Tierra y teniendo un carácter regional debido a que abarca áreas bastante extensas en superficie y profundidad. Cabe mencionar que la corteza terrestre es la más importante desde la perspectiva humana, así como geológica.

La Geología utiliza los recursos de otras ciencias, que resultan auxiliares de ésta, debido a que el estudio de la Tierra es sumamente complejo. Prácticamente existe la relación con todas las ramas de saber humano, ver figura 2.1.

Es importante mencionar que para llevar a cabo el estudio de la Tierra, la Geología está en función del tiempo, ya que la Tierra se encuentra en un proceso continuo de cambios, desde su mismo origen hace millones de años; y precisamente la unidad de tiempo adoptada por la Geología es un millón de años, debido a que es una cantidad suficiente de tiempo para que se verifiquen cambios verdaderamente geológicos.

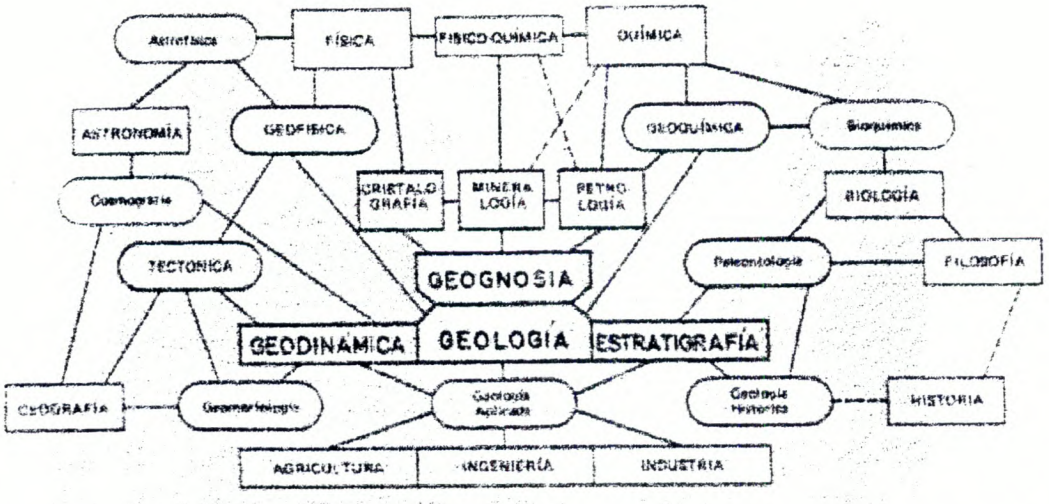


Figura 2.1 La Geología y su relación con otras ciencias [Fuster y Melendez, 1981: p.20]

La Tierra tiene una edad aproximada de 5 000 millones de años [Judson y Leet, 1990: p.13]. Esta edad se ha dividido en etapas, eras y periodos, según la antigüedad de las rocas encontradas en la corteza terrestre, restos fósiles, etc.; desde la Arcaica hasta la Cuaternaria, más antigua y más reciente, respectivamente, ver tabla 2.1.

ERA	PERIODO	SERIE	BIOGENIA (APARICIONES)	EDAD (M.A.)
CENOZOICA	Cuaternario	Holoceno	Hombre, animales y plantas actuales	0,01
		Pleistoceno	Hombre de Neanderthal	0,96
			Hombre de Steinheim	
			Hombre de Heidelberg	
	Terciario	Plioceno	Hombre de Kenya y Hominidos	13
		Mioceno	Mamiferos	25
		Oligoceno	Simios	36
		Eoceno	Placentarios	58
		Paleoceno	Equinidos	65
MESOZOICA	Cretácico	Superior	Grandes reptiles	110
		Inferior		135
	Jurásico	Superior		180
		Medio	Plantas con flores	
		Inferior	Belemnites	

	Triásico		Superior	Ammonites	230
			Medio		
			Inferior		
PALEOZOICA	Pérmico		Superior	Peces y reptiles	280
			Inferior		
	Carbonífero	Pennsylvánico	Superior		345
			Medio	Grandes plantas sin flores	
			Inferior	Anfibios	
		Mississípico	Superior	Desarrollo de Braquiopodos	
			Inferior		
	Devónico		Superior		405
			Medio	Edad de oro de los peces	
			Inferior	Extincion de Graptolites	
	Silúrico		Superior		425
			Medio	Plantas terrestres	
			Inferior	Braquiopodos	
	Ordovícico		Superior	Desarrollo de Graptolites	500
			Medio	Primeros peces	
			Inferior	Desarrollo de Trilobites	
	Cámbrico		Superior	Desarrollo de los invertebrados	600
			Medio	Graptolites y Trilobites	
			Inferior	Moluscos e invertebrados	
PRECAMBRIANA	Precámbrico		Algonquiano	Animales y plantas primitivas	2 300
			Huroniano		
	Arcaico		Sudburico	Probable vida primitiva	
			Keewatiano		
AZOICO				Sin vida	4 500

Tabla 2.1. Escala del Tiempo geológico, adaptado [Bolt, 1999: p. 315]

De esta división, en función del tiempo, que realiza la Geología, surge uno de los principios básicos de ésta: "El principio de la superposición de estratos por orden cronológico riguroso", además se establece que cualquier proceso geológico afecta a los

suelos y a las rocas formados con anterioridad, pero no a los que se formaron posteriormente. La estratigrafía, sucesión de materiales en sentido vertical, relaciona la posición de los suelos y las rocas con su edad. Así el estrato superior es el más joven y el estrato inferior es siempre el más antiguo.

La corteza terrestre está formada por suelos y rocas, superpuestos en sentido vertical, que son casi en su totalidad elementos sólidos y compuestos formados por procesos inorgánicos. Cada uno de estos elementos sólidos, llamados minerales, tienen una composición constante de elementos en proporciones definidas, tal como se puede ver en la tabla 2.2.

Nombre y Símbolo	Porcentaje en volumen
Oxigeno (O)	93,77
Potasio (K)	1,83
Sodio (Na)	1,32
Calcio (Ca)	1,03
Silicio (Si)	0,86
Aluminio (Al)	0,47
Hierro (Fe)	0,43
Magnesio (Mg)	0,29

Tabla 2.2 Elementos más abundantes en la corteza de la Tierra [Judson y Leet, 1990: p.43]

En cada mineral se encuentra una composición química definida y una estructura atómica interna única, llamada estructura cristalina, que es el arreglo ordenado de sus átomos; lo cual permite distinguir un mineral de otro. Así, los minerales cristalinos, a diferencia de los amorfos, necesitan de mucho tiempo para poderse formar completamente.

También se puede identificar a los elementos sólidos basándose en sus propiedades físicas: forma cristalina, dureza, peso específico, clivaje, color y raspadura.

- Forma Cristalina: atiende a la regularidad en la forma de cada mineral, producida por su estructura cristalina, la cual se evidencia cuando éste ha crecido sin ningún tipo de interferencia (cristalinos), de lo contrario la forma cristalina se distorsiona (amorfos). Entre las principales están: cubica, monoclínica, triclínica, hexagonal, ortorrombica y tetragonal.

- Dureza: esta propiedad está gobernada por el arreglo atómico interno de los elementos de los minerales, y se define como la medida de la resistencia que la superficie de un mineral ofrece a ser rayada; la cual se mide normalmente en la escala de Mohs que asigna un valor de 1 para el yeso y de 10 para el diamante, siendo el más blando y el más duro, respectivamente.
- Peso específico: es el peso por centímetro cúbico de cada mineral, y se obtiene generalmente comparando el peso del mineral con el peso de un volumen igual de agua desplazado por dicho mineral.
- Clivaje: esta propiedad se define como una dirección de debilidad, y es la tendencia de un mineral a romperse a lo largo de planos paralelos a esta dirección.
- Color: aunque no es una propiedad que se presente exclusivamente para cada uno de los minerales, se usa para hacer distinciones de carácter general.
- Raspadura: color que presentan los minerales al ser rayados contra un pedazo de porcelana, llamada placa de raspaduras; el color del polvo que queda en la placa ayuda a identificar al mineral.

Existen más de 2 000 clases de minerales, pero sólo unos cuantos de estos son los que forman los suelos y las rocas, [Judson y Leet, 1990: p.48]; se clasifican en diversos grupos, de los cuales el principal es el de los silicatos, por ser los que más abundan en los suelos y las rocas de la corteza terrestre. Los silicatos están compuestos por silicio y oxígeno y uno o más metales, y se dividen según su contenido de hierro y magnesio, su contenido de sílice (SiO_2) y la temperatura a la cual fueron formados (cristalización fraccionada).

Atendiendo al orden de cristalización fraccionada, desde los 1 000 °C hasta los 400 °C, los primeros minerales en formarse son los minerales Petrográficos: olivino, piroxenos, anfiboles, biotita, plagioclasas, ortosa, feldespatoides y cuarzo. Los primeros cuatro minerales reciben el nombre de melanocráticos por su color oscuro, y los últimos cuatro reciben el nombre de leucocráticos por su color blanco. También, los minerales melanocráticos poseen un porcentaje bajo de sílice (45 % a 52 %), por lo cual se les llama básicos, mientras que los leucocráticos poseen un porcentaje alto de sílice (mayor que 66 %), por lo que reciben el nombre de ácidos. Además, por su contenido de hierro y

magnesio se les llama ferromagnesianos o no-ferromagnesianos, a los minerales melanocráticos y leucocráticos, respectivamente, [Aguilar, 2001]. Véase tabla 2.3.

Temperatura	Mineral	Color		% de sílice		Contenido de hierro y magnesio	
1 000 °C	Olivino Piroxenos Anfiboles Biotita	Oscuro	Melanocráticos	Bajo 45-52%	Básicos	Alto	Ferromagnesianos
400 °C	Plagioclasas Ortosa Feldespatoides Cuarzo	Blanco	Leucocráticos	Alto > 66%	Acidos	Bajo	No-Ferromagnesianos

Tabla 2.3 Clasificación de los minerales petrográficos [Aguilar, 2001]

La unión de dos o más minerales es lo que forma las rocas, estos minerales existen en gran variedad en la corteza continental, la cual está formada principalmente por rocas graníticas y basálticas, reconociéndose otra discontinuidad dentro de ésta, denominada "Discontinuidad de Conrad"; la corteza superior se conoce como la capa granítica, y la corteza inferior como la capa basáltica, [Bommer, 1996: p.8]. Así, se pueden cuantificar los porcentajes de los componentes de cada tipo rocoso de la corteza continental, [Fuster y Melendez, 1981: p.68], ver tabla 2.4.

Composición media en %			
Componentes	Corteza continental	Granitos	Basaltos
SiO_2	61,9	72,3	50,8
TiO_2	0,8	0,3	2,0
Al_2O_3	15,6	14,0	14,1
Fe_2O_3	2,6	0,9	2,9
FeO	3,9	1,5	9,1

MnO	0,1	0,05	0,2
MgO	3,1	0,5	6,3
CaO	5,7	1,4	10,4
Na_2O	3,1	3,1	2,2
K_2O	2,9	5,1	0,8
P_2O_5	0,3	0,15	0,2
H_2O+		0,6	0,9
CO_2			

Tabla 2.4 Composición química media de la corteza continental y de los tipos de rocas frecuentes en la superficie [Fuster y Melendez, 1981: p.68]

Los tipos de rocas se clasifican en tres grupos principales: las rocas ígneas, que son las primeras en formarse y toman su nombre del latín ignis, "Fuego", debido a que se forman del enfriamiento del magma; las rocas sedimentarias, del latín sedimentum, "Materia que se asienta", constituidas de partículas derivadas de la desintegración de las rocas preexistentes; y las rocas metamórficas, que significa cambio de forma, son básicamente rocas existentes que han cambiado debido a factores que las afectan, como la presión y la temperatura.

a. Rocas Igneas

Las rocas ígneas han sido formadas a partir de la solidificación del magma, que es una sustancia viscosa que se encuentra en la corteza terrestre o en la parte superior del manto, y posee una composición química variable: silicio, oxígeno, aluminio y hierro; donde predominan los silicatos, también posee compuestos volátiles, los cuales le dan su composición gaseosa: agua, bióxido de carbono, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, sulfato de hidrogeno, etc. En el estado líquido-gaseoso el magma se encuentra soportando temperaturas mayores a los 1 000 °C, esto se da dentro de la cámara magmática, recinto dentro del cual el magma ejerce presión interior a los estratos superiores a ésta; estos estratos superiores están ejerciéndole una presión exterior, la cual no deja que el magma avance hacia la superficie de la corteza. Cuando la presión interior es mayor que la presión exterior el magma asciende hacia la superficie de la corteza, a través de una erupción

volcánica, perdiendo así su condición gaseosa y denominándose con el nombre de lava, [Aguilar, 2001].

Luego, según Aguilar [2001], las rocas ígneas se clasifican de acuerdo a su origen como: rocas intrusivas o plutónicas y volcánicas o extrusivas. Las *rocas intrusivas o plutónicas* son aquellas que se forman en el interior de la corteza terrestre, a través de un enfriamiento muy lento, lo que requiere del paso de muchos años, llamado proceso de cristalización, el cual se lleva a cabo cuando el magma inicia su enfriamiento en el interior de la corteza terrestre, formándose los minerales que constituyen las rocas. El magma en este proceso de enfriamiento adquiere diferentes estados:

- Estado ortomagmático, en el que se forman los silicatos.
- Estado pegmátitico, donde la presión interna alcanza su valor máximo.
- Estado pneumatolítico, el cual produce la liberación de vapor.
- Estado hidrotermal, que acusa la presencia de agua en estado caliente.

A medida que la temperatura continúa bajando, el magma se solidifica y se forma la roca ígnea.

Las *rocas volcánicas o extrusivas* son aquellas que se forman en la superficie de la corteza terrestre, y se dividen en rocas volcánicas efusivas y piroclásticas. Las *rocas volcánicas efusivas* son formadas por lavas que se derraman sobre la superficie terrestre, teniendo un proceso de enfriamiento acelerado, dando lugar a la formación de minerales microscópicos; las *piroclásticas* son materiales que son proyectados al aire, los cuales recorren distancias variables hasta que se depositan sobre la corteza terrestre.

También, las rocas ígneas se clasifican por su porcentaje de sílice (SiO_2) en: básicas, 45-52%; intermedias, 52-66%; y ácidas, mayor que 66%; las cuales tienen un color oscuro, gris y blanco, respectivamente.

Dos de las características de las rocas ígneas son su estructura y su textura; refiriéndose a la forma exterior y al tamaño que presentan los minerales, y al aspecto general que presentan las rocas en la naturaleza, respectivamente. La *estructura* de una roca ígnea se puede dividir en tres clases: *granuda*, ésta se presenta cuando los minerales que forman la roca pueden verse a simple vista (Fenocristales), lo que quiere decir que su período de formación fue prolongado; *vitria*, formada extremadamente rápido; y *porfídica*,

toda la matriz de la roca está formada por minerales microscópicos (Microlitos), los cuales encierran a otros de mayor tamaño.

Luego, la *textura* de las rocas ígneas está clasificada como: *compacta*, no se presentan poros ni aberturas en la matriz de la roca debido a que no hubo escape de gases en el proceso de solidificación; *laminar*, se presenta como una superposición de laminas; *porosa*, presenta gran cantidad de poros de tamaño pequeño debido al escape de gases en el proceso de solidificación; *vacuolar*, presenta poros de mayor tamaño que la porosa; y *columnar*, al solidificarse la roca formó columnas generalmente de seis lados asimétricos, [Aguilar, 2001].

Cuando las rocas volcánicas piroclásticas que se proyectan por los aires forman fragmentos de tamaño reducido, se denominan lapilli, que en italiano significa "piedrecitas"; pero si estos fragmentos son más finos, se denominan puzolanas, [Fuster y Melendez, 1981: p.570]. También, se le denomina toba a la ceniza volcánica endurecida que se convierte en roca. Cuando una roca volcánica efusiva contiene bloques angulares relativamente grandes incluidos en una matriz de ceniza, recibe el nombre de brecha volcánica, y si los bloques son redondeados se le llama conglomerado volcánico, [Judson y Leet, 1990: p.75]. En la tabla 2.5, se muestran algunos ejemplos de las distintas rocas ígneas según su clasificación.

Clasificación		**Nombre**	**Porcentaje de sílice**	**Color**	**Característica**
Rocas intrusivas o plutónicas		Granito Diorita Gabro	Acida Intermedia Básica	Claro Gris Oscuro	Matriz de grano grueso
Rocas volcánicas extrusivas	Rocas volcánicas efusivas	Dacita Riolita Andesita Basalto	Acida Acida Intermedia Básica	Claro Gris claro Gris Oscuro	Matriz de grano fino

	Rocas volcánicas piroclásticas	Ceniza volcánica	Acida	Claro	Granulometría fina
		Toba de pómez	Acida	Claro	Granulometría gruesa
		Ignimbrita	Intermedia	Gris	Consolidado de ceniza volcánica y lapilli
		Aglomerado volcánico	Básica	Oscuro	Fragmentos de roca en matriz arenosa
		Escoria volcánica	Básica	Oscuro	Pequeños fragmentos bastante porosos

Tabla 2.5 Ejemplos de rocas ígneas según su clasificación [Aguilar, 2001]

b. Rocas Sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman a partir del proceso de sedimentación, que no es más que el transporte producido por la erosión, por medio del viento o del agua, de partículas desprendidas (denudación) de las rocas de la corteza terrestre en su mayoría ígneas, en forma mecánica o química; las cuales se depositan y forman capas horizontales; de esta manera y por medio del un tiempo prolongado se forman en estas capas de material, más o menos compactado, las rocas sedimentarias, [Fuster y Melendez, 1981: p. 241].

El origen mecánico se debe a la erosión de las rocas existentes o de los productos intemperizados, desintegrados, de estas rocas; así, las capas de materiales depositados toman el nombre de detríticos, en latín "desgastado", y las rocas sedimentarias que se forman se llaman rocas sedimentarias detríticas; mientras que, cuando los depósitos son productos de origen químico, sedimentados generalmente por la precipitación del material disuelto en agua, se les llama depósitos químicos, por tanto rocas sedimentarias químicas. Estos dos grupos de rocas sedimentarias, detrítica y químicas, generalmente se presentan combinados, [Judson y Leet, 1990: p.107].

También, es importante hacer notar que los tres minerales más comunes que forman las rocas sedimentarias son la calcita, el cuarzo y la arcilla (caolinita e illita); siendo la calcita el principal componente de este tipo de rocas. Estos tres minerales no son los únicos que están presentes en la formación de las rocas sedimentarias, también se pueden mencionar: dolomita, feldespatoides, hematita, limonita, halita, yeso, etc. Según Judson y Leet [1990: p.111], otra característica importante de las rocas sedimentarias es su textura, referida al aspecto físico general, la que puede ser *clástica*, que atiende al hecho de que la

roca se presenta rota o fragmentada; y *no-clástica*, que atiende al hecho de que los granos de los minerales están entrelazados.

El proceso por medio del cual los depósitos sedimentarios se convierten en rocas sedimentarias se denomina litificación, este proceso se encarga de convertir los materiales sin consolidar, en roca consolidada y coherente; el término litificación proviene de la palabra griega latina que significa "roca" y "hacer", respectivamente, [Judson y Leet, 1990: p.113]. El proceso de litificación se divide de la siguiente manera: *Cementación*, consiste en el relleno de los espacios, entre las partículas que no están consolidadas, con minerales que son transportados en solución por el agua que pasa a través de estos espacios; *compacción*, los espacios porosos entre los granos individuales se reducen gradualmente debido a la presión que ejercen las capas de sedimentos arriba de ellos; *desecación*, como resultado de la compacción, el agua contenida en los poros de los granos individuales es forzada a salir, también se puede dar por evaporación; y *cristalización*, proceso de cristalización de los minerales, nuevos o ya existentes, aumentando de tamaño.

Luego, la clasificación de las rocas sedimentarias atiende a su origen, detrítico y químico, como se puede ver en la tabla 2.6.

Origen		**Textura**	**Tamaño de la partícula o composición**	**Nombre de la roca**
Detrítico		Clásticas	Gránulo o mayor	Conglomerado
			Arena	Arenisca
			Limo y arcilla	Lodolita y lutita
Químico	Inorgánico	Clásticas y no Clásticas	Calcita	Caliza
			Dolomita	Dolomita
			Halita	Sal
			Yeso	Yeso
	Bioquímico		Calcita	Caliza
			Restos vegetales	Carbón

Tabla 2.6. Clasificación de las rocas sedimentarias, [Judson y Leet, 1990: p.114]

c. Rocas Metamórficas

Las rocas metamórficas son modificaciones en el estado sólido como consecuencia de intensos cambios en la temperatura, presión y ambiente químico que sufren las rocas, ígneas y sedimentarias, en el interior de la corteza terrestre; el nombre de metamórficas proviene del griego meta "más allá de", y morphe "forma", de donde deriva metamorfis "cambio de forma". El metamorfismo produce cambios en los granos minerales de las rocas ígneas o sedimentarias, esta roca así formada recibe el nombre de roca metamórfica, [Judson y Leet, 1990: p. 307].

La temperatura y la presión actúan simultáneamente, produciendo los cambios en la textura y composición de las rocas sólidas que se encuentran en el interior de la corteza; mientras que el ambiente químico que se presenta hacia el final de la solidificación de un magma afecta a las rocas circundantes a éste, mediante fluidos químicamente activos, generando nuevos minerales en las rocas, este proceso recibe el nombre de metasomatismo.

Existen dos tipos básicos de metamorfismo: *metamorfismo de contacto*, que se produce debido al contacto de las rocas con la cámara magmática, alrededor de ésta. Este contacto ejerce una presión y a la vez una alta temperatura, afectando a las rocas circundantes; y *metamorfismo regional*, el cual se da a grandes profundidades donde la presión es mucho mayor y se llama regional debido a que afecta áreas extensas en el interior de la corteza. Algunos tipos de rocas metamórficas son las siguientes: pizarra, filita, esquisto, gneis, mármol y cuarcita.

2.1.1.2 El ciclo de las rocas

A partir del magma se forman las rocas ígneas, como ya se explicó anteriormente, las cuales pueden encontrarse en la corteza terrestre; así se da inicio al ciclo de las rocas, ya que debido al proceso de erosión, que se encarga de transportar en forma fragmentada estas rocas ígneas, proceso producido por el intemperismo, se llegan a formar las rocas sedimentarias las cuales sufren un proceso de litificación y posteriormente, con el paso del tiempo, pueden quedar sepultadas a grandes profundidades, dando paso a la formación de rocas metamórficas. Las rocas ígneas plutónicas, también están expuestas a ser transformadas en rocas metamórficas. Las rocas metamórficas así formadas, están

propensas a sufrir el proceso de fusión en el interior de la corteza, convirtiéndose en magma, el cual inicia el ciclo de la roca nuevamente; ver figura 2.2.

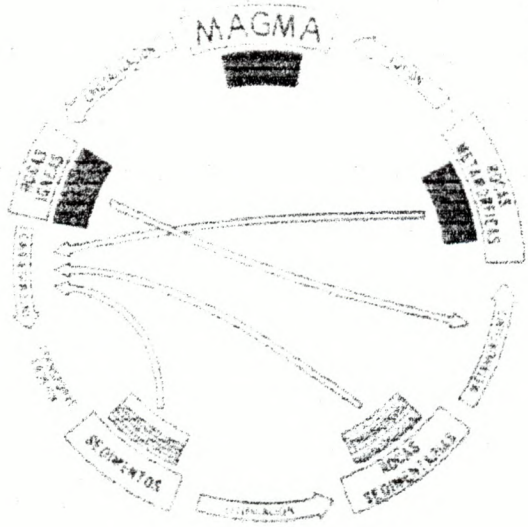


Figura 2.2. El ciclo de las rocas [Judson y Leet, 1990: p.17]

2.1.1.3 Permeabilidad y Granulometría

La mayor o menor resistencia que presentan los materiales geológicos, suelos y rocas, al paso del agua a través de estos se define como *permeabilidad*. Esta permeabilidad está en función del tamaño que presentan las partículas de los materiales geológicos, granulometría, así las partículas finas, menores que una micra, poseen una permeabilidad baja, porque permiten el paso del agua de forma restringida; no así las partículas gruesas, del tamaño de una grava, que presentan una permeabilidad alta, debido a que el paso del agua a través de estas es sumamente fácil. Teóricamente aquellos materiales que no permiten el paso del agua se clasifican como *impermeables*. También, existe otra manera de clasificar la permeabilidad: Primaria, en la cual se permite el paso del agua, a través de los materiales geológicos, de manera fácil o difícil; y secundaria, que se da cuando existe infiltración de agua en las fracturas que presentan las rocas; [Aguilar, 2001].

2.1.1.4 Procesos Geomórficos

Comprenden todos los cambios físicos y químicos que suceden tanto en la superficie de la corteza, como en las cercanías de ésta. Estos cambios son realizados por el

agua y el viento, denominados agentes geomórficos. Existen tres clases de procesos geomórficos: gradación, diastrofismo y vulcanismo.

La *gradación* es un proceso geomórfico de carácter externo o exógeno, esto es debido a que actúa sólo en la superficie de la corteza, y tiene la finalidad de destruir todo el relieve, hasta llevarlo al nivel del mar. Se divide en degradación, que ataca las partes más elevadas por medio de la erosión, la meteorización y los movimientos de tierra; y la agradación, que es la que se encarga de acumular todo el material desprendido y arrastrado, por la degradación, en cuencas o depresiones.

El *diastrofismo* es un proceso geomórfico de carácter interno o endógeno, debido a que se origina en el interior de la corteza, y tiene la finalidad de reconstruir todas aquellas partes afectada por la gradación. Se divide en: procesos epirogenéticos, que son los que se encargan de la formación de los continentes por medio de levantamientos y hundimientos que se dan en la corteza; y procesos orogenéticos, que se encargan de la formación de montañas debido al movimiento de fallas y pliegues.

El *vulcanismo* es un proceso geomórfico de carácter interno o endógeno, al igual que el diastrofismo. Este es un proceso constructivo debido a que su finalidad es la formación de las rocas ígneas, como ya se ha explicado anteriormente.

De todo lo explicado de los procesos geomórficos, se puede decir que existe un equilibrio entre los procesos que construyen y destruyen el relieve de la corteza, pero ninguno de estos predomina.

2.1.1.5 Formación del suelo

En la formación del suelo está involucrada la meteorización, la cual consiste en el proceso al que están sometidas las rocas debido a la acción de agentes *físicos*, que las desintegran, y a agentes *químicos*, que las descomponen; los cuales actúan al mismo tiempo y tienen como resultado final la formación del suelo. Este proceso se lleva a cabo durante un largo período de tiempo, y siempre tiene lugar de arriba hacia abajo en las rocas. Entre los agentes físicos están: la temperatura y la actividad física de las plantas que crecen en las fracturas de las rocas; entre los agentes químicos están: la hidratación, hidrólisis, carbonatación, oxidación y reducción.

La roca que ha dado lugar a la formación del suelo recibe el nombre de roca madre, y los suelos que permanecen sobre ella reciben el nombre de *suelos residuales*; también, se le da el nombre de suelos transportados a aquellos que son trasladados a otro lugar y depositados sobre otra roca que no tuvo nada que ver con su formación; los medios de transporte son el agua, el viento y la gravedad. Los suelos transportados se clasifican como: suelos aluviales, suelos eólicos y suelos coluviales; según el transporte al cual fueron sometidos: agua, viento y gravedad, respectivamente.

Un suelo adquiere la categoría de completamente desarrollado cuando se han formado en el suelo tres horizontes distintos: *horizonte A*, compuesto de materia orgánica; *horizonte B*, compuesto de arcilla; y *horizonte C*, transición entre el suelo y la roca madre. Es importante decir que cuando una roca sufre el proceso de meteorización todos sus minerales se transforman en arcillas: caolín, illita, montmorillonita; entre otros, [Aguilar, 2001].

2.1.1.6 Pliegues y Fallas

Los pliegues tienen origen en el interior de la corteza terrestre a profundidades indefinidas, y se dan cuando las rocas se doblan, debido a esfuerzos de compresión elevados, sin llegar a fracturarse; este proceso tiene lugar en períodos largos de tiempo. Existen tres tipos de pliegues: *monoclinales*, formados en planicies de la corteza, y debidos al empuje del magma; *anticlinales*, ondulación de las rocas hacia arriba; y *sinclinales*, ondulación de las rocas hacia abajo, ver figura 2.3.

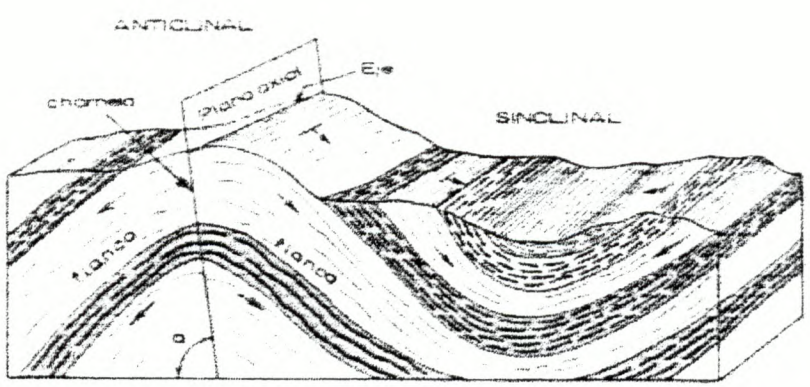


Figura 2.3 Pliegues en las rocas [Fuster y Melendez, 1981: p.414]

Las fallas geológicas consisten en un fracturamiento que sufren las rocas de la corteza, a lo largo de un plano de fractura, en el que existen desplazamientos de un bloque respecto a otro. Las fallas se presentan en forma individual: vertical, horizontal, normal e inversa; y en grupo: escalonadas, serie de fallas orientadas en una misma dirección; graben, consiste en un bloque central que se ha hundido a lo largo de dos planos de falla normal; y horst, que consiste en un bloque central que se ha desplazado hacia arriba a lo largo de dos planos de falla inversa. Estos tipos de falla se muestran en la figura 2.4.

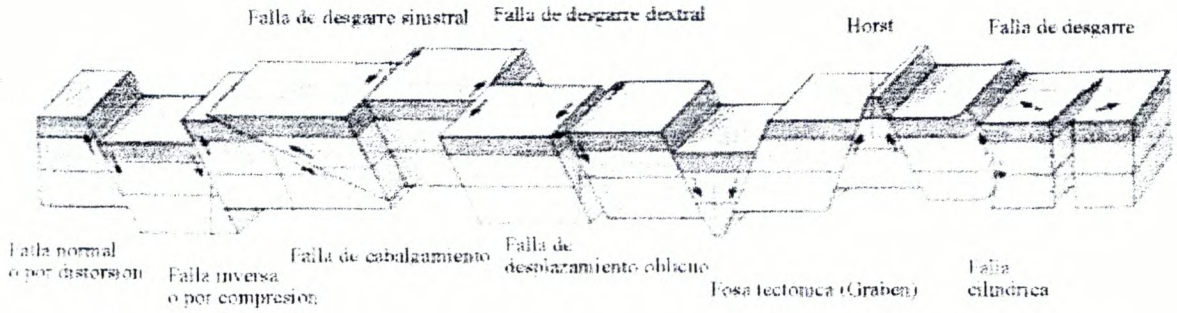


Figura 2.4 Tipos de fallas geológicas, adaptado [Diccionarios Visuales Altea, 1993: p.15]

2.2 Geología de El Salvador

2.2.1 Estudio de la Geología en El Salvador

El estudio más antiguo relacionado con los aspectos geológicos del país lo constituye un mapa enviado al rey de España en el año de 1576, que fue elaborado por D. García de Palacio [Aguilar, 1986]. Posteriormente, transcurrieron tres siglos sin evidencias significativas de trabajos en el área geológica del país, hasta que en 1868 dos geólogos franceses, A. Dollfus y E. Montserrat, elaboraron una investigación geológica del área centroamericana y plasmaron su estudio en la obra "Voyage Geologique dans les Republiques de Guatemala et de Salvador". Como resultado de este estudio, se publicó en 1869 un mapa geológico general de Guatemala y de El Salvador, [Misión Geológica Alemana, 1974].

Hacia el año de 1871 el geólogo salvadoreño David J. Guzmán dio inicio a una serie de estudios concernientes a distintos aspectos geológicos del país; el primero de estos

estudios fue publicado en 1903 bajo el nombre de "Rasgos geológicos de El Salvador", en el cual se presenta un cuadro geológico del área centroamericana, ver tabla 2.7.

Primera época	Los granitos levantan los esquistos. Aparece el primer archipiélago. Islas principales: las de Soconusco y Guatemala, las de Honduras y Costa Rica. Estrechos principales: el de Tehuantepec, el de Goascorán, el de San Juan y Panamá.
Segunda época	Los pórfidos completan el relieve y cierran el Istmo.
Tercera época	Baja todo el sistema del Istmo y se depositan los calizos.
Cuarta época	Se levanta el sistema por las erupciones traquíticas. Existe otra vez el Istmo.
Quinta época	Otra depresión. Se depositan las arcillas amarillas.
Sexta época	Otro levantamiento por los basaltos. Los volcanes de la costa se forman y con ellos la zona del Pacífico, las llanuras de Nicaragua, El Salvador y la boca costa de Guatemala.

Tabla 2.7 Cuadro de la Geología de Centroamérica, [Aguilar, 1986]

El segundo de sus estudios, también publicado en el año de 1903, bajo el nombre de "Geología de El Salvador"; se asocia a la cal como el componente principal de la mayor parte de los terrenos del país. En el tercer estudio, publicado en 1903 bajo el nombre de "Formación volcánica del sistema del litoral de El Salvador. Estructura geológica de los terrenos", se estudian las teorías elaboradas por Mr. Luciano Platt, las cuales hacen referencia a una enorme grieta de dirección paralela a la costa del Pacífico, y se asocia a esta grieta la formación de las rocas duras y porosas, así como también, se le asocia a ser el lugar de apoyo de las costas, de las colinas, montes y altiplanicies del país; también, se menciona que todos los volcanes del área centroamericana están alineados prácticamente en la misma dirección, y que su estructura mineralógica es idéntica.

La siguiente publicación de D. J. Guzmán, es "Una lección de Geología centroamericana", realizada en 1907. Se considera en este estudio que la corteza del área centroamericana estaba formada por rocas sedimentarias y orgánicas, también se describen las características de los períodos geológicos. En la última de sus publicaciones, "Geología de El Salvador", D. J. Guzmán, describe aspectos petrográficos del país, considerando a El

Salvador formado por rocas volcánicas, en su mayor parte, y sedimentarias; [Aguilar, 1986].

Otro de los investigadores salvadoreños que se preocupó por el estudio geológico del país fue Jorge Lardé y Larín, que junto a Karl Sapper estudiaron la geología del país, en especial la del volcán de Izalco y del lago de Ilopango; esto se publicó en las obras "El volcán de Izalco" y "Los cerros Quemados del lago de Ilopango", en 1923 y 1950, respectivamente; [Aguilar, 1986]. El libro "Geología Salvadoreña", publicado en 1952, fue otra de las investigaciones documentadas por Jorge Lardé y Larín. En ésta se describe a El Salvador atendiendo a sus distintas formaciones volcánicas, así como también se describen los principales volcanes de El Salvador.

En 1960 Meyer-Abich diseñó un mapa geológico provisional de El Salvador, en escala 1:900 000; en 1961 Weyl en su obra "Geología centroamericana" expone otro mapa geológico para la región, en escala 1:700 000; en 1964 se elaboró un mapa geológico de El Salvador, en escala 1:400 000, por Chapman, Dürr, Levy, Meyer-Abich, Rode, Weyl, Williams, Dengo y Harrouch, a pedido del CEIG, el cual fue impreso en blanco y negro en escala de 1:500 000; y finalmente Weyl, en 1966, publicó un mapa geológico general de El Salvador, en escala 1:160 000, [Misión Geológica Alemana, 1974: p.6].

La Misión Geológica Alemana, integrada por los siguientes profesionales: Dr. G. Wieseman, Dr. H. R. Bosse, Dr. M. Schmidt-Thome, Dr. H. S. Weber, Dr. A. Mihm, Dr. W. Lorenz, Ing. A. Thormann y con el apoyo en el año de 1969 del Dr. K. Rode, además con la colaboración del geólogo A. Merino por parte del CEIG; realizó investigaciones geológicas en el país entre los años 1967 y 1973, como ya se ha mencionado anteriormente; el resultado de estas investigaciones fue el siguiente:

a) Minerales no metálicos, rocas y suelos de uso industrial en la República de El Salvador, que comprende las siguientes partes:
   - Primera, la industria de minerales no metálicos, rocas y suelos en El Salvador.
   - Segunda, materias primas para el cemento, cal cáustica y puzolanas en El Salvador.
   - Tercera, yacimientos de rocas para piedras talladas en El Salvador.
   - Cuarta, agregados para hormigón en El Salvador.
   - Quinta, materias primas para cerámica fina en El Salvador.
   - Sexta, materias primas para fabricación de vidrio en El Salvador.

- Séptima, materiales para la construcción de carreteras en El Salvador.
- Octava, yacimientos de perlita en El Salvador.
- Novena, materia prima para la cerámica de tejas y ladrillo en El Salvador.
- Décima, yacimientos de diatomita y azufres en El Salvador.

b) Seis hojas geológicas, escala 1:100 000: Sonsonate, Santa Ana, San Salvador, Chalatenango, San Miguel y Carolina.

c) Mapa geológico general de El Salvador, escala 1:500 000.

d) Investigaciones geológicas para la planificación urbana de San Salvador.

e) Investigaciones minero-geológica del yacimiento de azufre en la laguna de Alegría.

f) Investigación preliminar de las arenas litorales de El Salvador.

g) Consultación hidrogeológica para la hacienda San Isidro.

Otros de los estudios geológicos realizados en el país se detallan a continuación:

TITULO	AUTOR	AÑO
Geología general de la República de El Salvador	Fleury L.	1915
Estudio de la tierra blanca en los alrededores de San Salvador	Lahúd M. A.	1944
Contribución a la Mineralogía y Geología de El Salvador	Basuari D.	1945
Las cenizas de pómez en los alrededores de San Salvador	Weyl R.	1955
Situación actual de la Minería en El Salvador	Dürr F.	1956
Sucesión normal de los estratos de Metapán	Dürr F. y Stober G.	1956
El agua subterránea en los alrededores de San Salvador	Hoelting	1960
Estudio sobre la erosión y sus causas en el lado sur del lago de Ilopango	Martínez M.	1966
Estructura geológica, historia tectónica y Morfología de América Central	Dengo O. G.	1968
Proyecto minero de las Naciones Unidas	varios	1967-1977

Tabla 2.8 Trabajos geológicos realizados en El Salvador [Aguilar, 1986]

2.2.2 Descripción geológica de El Salvador

El Salvador forma parte de la estructura geológica septentrional de Centroamérica, que abarca desde Guatemala hasta la parte media norte de Nicaragua, siendo la zona restante, mitad sur de Nicaragua hasta Panamá, la estructura geológica meridional. La América Central septentrional, ubicada sobre un geosinclinal, inició su proceso de levantamiento en el Paleozoico, a través de procesos orogéneticos, los cuales causaron intrusiones plutónicas en el geosinclinal y sometieron a los sedimentos acumulados en el geosinclinal a grandes deformaciones tectónicas.

Continuaron los procesos orogéneticos en el Triásico, dejando al geosinclinal en posición emergente; en el Mesozoico se deformó en gran proporción el geosinclinal, siempre debido a la orogénesis, luego se registró un período de acumulación de sedimentos, entre el Paleoceno y el Eoceno; y entre el Eoceno y el Oligoceno se presentó un levantamiento general acompañado de fallas normales en el geosinclinal. Los primeros procesos que le siguieron al levantamiento fueron los de epirogénesis en el Jurásico y luego en el Cretácico superior la transgresión marina, responsable de la deposición de las calizas en Metapán.

A esta transgresión le siguió un período de deposición de sedimentos, Cretácico a Terciario inferior, como consecuencia de un segundo levantamiento epirogénetico general acompañado de fallamiento en bloques; finalmente se registró un volcanismo desde el Terciario hasta el Cuaternario, originado luego de la fase post-orogénica del levantamiento, [Aguilar, 1986: p.31].

Debido a todo el proceso que llevó la estructura geológica Septentrional de Centroamérica a emerger, se formó la siguiente secuencia estratigráfica, [Aguilar, 1986: p.32]:

- Rocas volcánicas e intrusivas del Terciario y el Cuaternario.
- Rocas sedimentarias del Terciario.
- Sedimentos Mesozoicos, especialmente rocas carbonatadas del Cretácico.
- Rocas sedimentarias del Paleozoico superior.
- Rocas metamórficas del Paleozoico inferior.
- Rocas metamórficas del Precámbrico.

La Geología de El Salvador inició en la era Secundaria, Cretácico medio y Cretácico superior. Esto hace aproximadamente 80 millones de años, con la formación de las rocas sedimentarias marinas. Un pequeño porcentaje de las rocas, aproximadamente un 25 %, del país se formó en el Pleistoceno, y la mayor parte de las rocas, el 75 % restante, entre el Oligoceno y el Mioceno; debido a este proceso de formación, el país se caracteriza por tener una edad geológica relativamente joven; así el país está compuesto por las siguientes clases de rocas, [Aguilar, 1986: p.39]:

- Rocas volcánicas, las cuales cubren más de un 90 % del país, que por su composición química y mineralógica comprenden rocas efusivas riolíticas y dacíticas en menor proporción; andesíticas y basálticas, así como también materiales piroclásticos, en una escala mucho mayor.
- Rocas sedimentarias marinas, localizadas en el extremo noroeste del país, más exactamente en el norte del departamento de Santa Ana, y parte del de Chalatenango. Estas comprenden en su mayoría calizas, conglomerados de cuarzo y areniscas.
- Rocas sedimentarias de origen orgánico, localizadas en diferentes partes de la República, formando generalmente pequeños depósitos de diatomita y lignitos.
- Rocas de carácter intrusivo, clasificadas petrográficamente como granitos, granodioritas, monzonitas y dioritas.

Basándose en las condiciones geológico-tectónicas del país, se elaboró en forma general un perfil normal esquemático de la posible sucesión estratigráfica de El Salvador, [Dürr, 1960: p.12], el cual se presenta a continuación:

Edad	Unidad Estratigráfica	Observaciones
Reciente	Aluvión	Gravas, arenas y arcillas a lo largo de ríos y en depresiones locales. Depósitos de este material en gran escala en las planicies costeras en el suroeste y el sureste de la República.
Holoceno hasta Pleistoceno	Estratos de San Salvador	Productos efusivos de los volcanes individuales de la cadena volcánica joven, que atraviesa la parte sur de El Salvador. Corriente de lava, cúpulas de lava, tobas fundidas, tobas, pómez, escorias y cenizas volcánicas; a veces con intercalaciones de sedimentos lacustres (lignito y diatomita). El espesor y

		sucesión de los estratos varía de volcán a volcán. Suelos fósiles: suelo café y suelo negro (según la tipología de KUBIENA: Braunlehm y Pesudogley Tirsoide, respectivamente).
Pleistoceno inferior hasta Plioceno superior	Estratos de Guazapa	Productos efusivos de los volcanes individuales de la cadena volcánica vieja, que atraviesa la parte norte de El Salvador. Corriente de lava, aglomerados, tobas, escorias y cenizas volcánicas endurecidas, tobas fundidas; intercalaciones de sedimentos lacustres y fluviales. El espesor de sucesión de los estratos varia de volcán a volcán. Suelos fósiles: suelo rojo de poca profundidad (hasta 4 m) (según la tipología de KUBIENA: ROTLEHM).
Plioceno	Estratos de Bálsamo	Productos volcánicos, prevalecencia de aglomerados; intercalaciones de tobas volcánicas endurecidas y corrientes de lavas basáltico-andesítica. El espesor alrededor de 500 m: en el este de El Salvador solamente restos rudimentarios de esta serie. Suelos fósiles. Suelo rojo de gran profundidad (hasta 20 m) (según tipología de KUBIENA: ROTLEHM). Cubiertas de rocas extrusivas, con pocas intercalaciones de tobas volcánicas y aglomerados. Cubiertas en la parte inferior de carácter andesítico, en la parte superior de carácter basáltico. Protusiones más ácidas (hasta carácter riolítico) sobre todo en el este de El Salvador. espesores probablemente mayores de 1 000 m.
Mioceno superior Mioceno inferior	Estratos de Chalatenango	Rocas volcánicas de carácter riolítico-dacítico. Prevalecencia de tobas muy endurecidas de colores claros. El espesor de esta serie es probablemente bastante mayor de 500 m. Probablemente es la facies extrusiva de intrusiones grano-dioríticas, las cuales son más contemporáneas con la serie media de los estratos. Areniscas finas de color rojo violeta, con bancos de conglomerados rojos de caliza con capas de areniscas. En su lecho, conglomerados monomixtos de caliza de color rojo-violeta y cantos de tobas volcánicas andesíticas. Esta serie representa los productos de erosión de las capas inferiores. Espesor mayor de 400 m.
Albiano Cretácico inferior	Estratos de Metapán	Tobas volcánicas de carácter andesítico de color violeta. Espesor 0-?-10 m. Serie de caliza en dos facies: caliza gris claro en bancos gruesos, y caliza oscura laminada. Espesor: aproximadamente 100 m. Areniscas rojas de grano fino con cemento arcilloso y estratificación fina; hacia abajo, conglomerados de cuarzo, que en su parte inferior generalmente están silificados. En el lecho de estas capas hay areniscas rojas finas de componentes arcillosos, en parte con estratificación diagonal.

Tabla 2.9 Perfil normal esquemático de la posible sucesión estratigráfica de El Salvador, [Dürr, 1960: p.12]

Este perfil general fue mejorado en posteriores estudios, más amplios y detallados; obteniéndose mayor información litológica y estratigrafica, según Aguilar [1986: p.41]; la cual se presenta en forma resumida a continuación:

- Sedimentos Cuaternarios: comprenden sedimentos fluviales que rellenan el valle del río Lempa, los cuales alcanzan su mayor extensión entre Nueva Concepción y Chalatenango. Se componen primordialemete de material volcánico redepositado (transportado de un lugar a otro), variando en su textura de cantos rodados a arena pumicítica.
- Rocas volcánicas Cuaternarias: la actividad volcánica más reciente de esta época se encuentra centralizada en los alrededores del lago de Güija, comprendiendo corrientes de basalto y conos de escorias. Dos áreas extensas del país cubiertas por materiales piroclásticos están localizadas, la primera al norte y noroeste de San Salvador; y la segunda, desde El Carmen, al este de San Miguel, hasta el río Lempa en el puente Cuscatlán.

  Los piroclásticos de la primera área están compuestos de una serie de tobas pumicíticas, conocidas localmente con el nombre de "tierra blanca", la cual representa varias series de deposiciones de cenizas volcánicas en periodos recientes y subrecientes de actividad volcánica explosiva, verificada a través de varias chimeneas separadas. La edad calculada para la "tierra blanca" es más o menos de 2 000 años, la cual ha sido determinada por medio del Carbón 14 y por la presencia de artefactos del período pre-clásico.

  La segunda área está compuesta en su mayoría de interestratificaciones de tobas escoriáceas y pumicíticas, expulsadas probablemente por el volcán de San Miguel y por el complejo volcánico de Tecapa. Lavas andesíticas que se encuentran en la ribera oeste del río Lempa en las cercanías del puente Cuscatlán, pertenecen posiblemente al Cuaternario inferior. Se incluye en esta era el volcán de Cacahuatique, ubicado al oeste de San Francisco Gotera, y en la actualidad completamente erosionado, formado de materiales piroclásticos intercalados con lavas andesiticas más jóvenes; y lavas andesíticas bien conservadas situadas sobre las rocas del Terciario, al sur de Santa Rosa de Lima. Finalmente, se incluyen los conos volcánicos situados entre Nueva

Concepción, Santa Ana y Masahuat, compuestos de lavas basálticas y andesíticas, asociadas en menor proporción con aglomerados volcánicos.

- Rocas intrusivas: todas las formaciones intrusivas del país pertenecen al Terciario superior, aflorando, en gran parte, en el área de Metapán, La Palma y más al sur de Tejutla. Algunos de estos cuerpos intrusivos cortan y metamorfizan a las tobas ácidas del Terciario inferior, principalmente en el oeste de Citalá, y en Metapán, en los yacimientos del Brujo y San Juan las Minas. De igual manera, donde estas rocas están en contacto con los sedimentos Cretácico-Terciarios, existe un metamorfismo y silicificación intensos, observándose una mineralización de plomo, zinc, cobre y en escala todavía menor, de plata.
- Rocas volcánicas del Terciario Superior: comprenden tanto rocas volcánicas ácidas como básicas. Las más antiguas se extienden hacia el norte desde la ciudad de Ilobasco hasta la frontera con Honduras; comprenden lavas andesíticas y materiales piroclásticos bien descompuestos, así también, rocas de esta misma clase, pero fuertemente silicificadas. Al norte de San Miguel, existen lavas andesíticas y tobas descompuestas, las cuales sirven como rocas encajantes para la mayor parte de mineralización de oro y plata de esa zona.

  Aglomerados andesíticos de gran espesor, con menor cantidad de lavas andesíticas y tobas interestratificadas, se extienden bien hacia el norte de la zona central del país, entre Tenancingo y el volcán Cacahuatique, que a lo largo del río Tituhuapa quedan sepultados por piroclásticos más jóvenes pertenecientes al Cuaternario. Desde Metapán hasta Concepción de Oriente se encuentra una serie de piroclásticos ácidos, formados de tobas líticas y pumicíticas, ignimbritas e intercalaciones de lavas riolíticas a dacíticas, las cuales entre La Palma y San Fernando tienen un espesor superior a los 700 m.
- Sedimentos del Cretácico Superior - Terciario Inferior: los sedimentos rojos más jóvenes de la formación subinal yacen discordantemente en las calizas, comprendiendo conglomerados de calizas en su parte inferior, cambiando en sentido ascendente de sedimentos muy arcillosos de grano fino a material tobaceo; este último aumenta en series más altas. Las rocas más antiguas de El Salvador pertenecen a la formación Todos los Santos, y se localizan en su extremo noroeste, más exactamente al norte, este

y oeste de Metapán, al sur de Citalá a orillas del río Lempa, y en el río Sumpul en jurisdicción de San Fernando. La formación Todos los Santos incluye sedimentos rojos de conglomerados de cuarzo y areniscas rojas con intercalaciones menores de pizarra. Esta formación fue cubierta por calizas masivas del Cretácico Superior en el cerro El Calichal, jurisdicción de Metapán. En ciertas zonas del distrito de Metapán, las calizas han sido metamorfizadas y mineralizadas por un cuerpo intrusivo de carácter dioríticotonalítico más joven. De igual manera junto al río Lempa y en San Fernando en el río Sumpul, existen calizas metamorfizadas.

Otro de los aspectos estudiados, fue la forma en que está construida la corteza terrestre del país, que según Dürr [1960: p.15], se conoce en El Salvador solamente la tectónica de fractura mientras que no existe ningún indicio para plegamientos. El Salvador posee tres sistemas tectónicos de fractura principales, que corren en distintas direcciones, los cuales se describen a continuación [Dürr, 1960: p.15]:

- Sistema WNW: este sistema es el más importante de los tres sistemas del país, siendo los desplazamientos verticales, que se observan a lo largo de toda esta dirección, en todo el país, lo más notable. Su actividad originó formas de tensión, Graben o Fosa Central, la cual se formó, según [Aguilar, 1986: p.35], de la siguiente manera: "en el Terciario superior, fuerzas de compresión regional dieron lugar a la formación de un geoanticlinal, paralelamente a la costa del Pacífico, posteriormente fuerzas de tensión a lo largo de la cresta de este geoanticlinal dieron lugar a las zonas de fallas, seguidas de hundimientos, formándose finalmente la Fosa Central".

  El sistema WNW posee cinco ejes principales: el primer eje forma el límite sur de la Montaña Fronteriza y presenta dislocaciones verticales de aproximadamente 1 000 m. Aparentemente no posee ninguna clase de volcanismo, ni actividad sísmica alguna.

  El segundo eje presenta dos características importantes: la primera consiste en la presencia de un volcanismo individual apagado en el norte del país, y la otra, en la formación de un Graben.

  Más hacia el sur queda el tercer eje, que parece ser el más prominente, sus dislocaciones tectónicas formaron continuamente fosas tectónicas (Fosa Central). Importante es el hecho de contar con un volcanismo individual joven, el cual todavía se

encuentra, en parte, activo. Se encuentra en esta fosa tectónica depresiones volcano-tectonicas (lagos de Ilopango y Coatepeque) y cúpulas de lava (cerro de San Jacinto), los movimientos tectónicos son bastante continuos.

El cuarto eje está situado en el Océano Pacífico, a unos 25 km de la costa, su actividad sísmica es muy notable.

El quinto eje, situado todavía más hacia el sur, forma una fosa marina que guarda una posición paralela a la costa, llamada "Trinchera Mesoamericana", su actividad sísmica no es muy notable.

- Sistema NNE: se caracteriza por poseer dislocaciones horizontales, aunque este sistema no es muy evidente. Este sistema probablemente fue el causante de la división en bloques de las formaciones actuales de Centroamérica. La actividad volcánica en este sistema es escasa, y alcanzó dimensiones pequeñas.
- Sistema NNW: todos los productos efusivos de las erupciones volcánicas ocurridas en tiempos históricos se originaron en volcanes pertenecientes al sistema WNW, tercer eje, pero a través de fallas con rumbo NNW. La actividad sísmica de este sistema es notable, aunque menos intensa que la del sistema WNW.

El mapa geológico general de El Salvador, resultado de los trabajos realizados por la Misión Geológica Alemana, está dividido en seis unidades volcano-estratigráficas: Formación de San Salvador, Formación de Cuscatlán, Formación de Bálsamo, Formación de Chalatenago, Formación de Morazán y Formación de Metapán; las cuales se dividen en sus respectivos componentes. A continuación se presenta una descripción de la división del mapa geológico general del El Salvador, en donde para cada símbolo la primera letra corresponde a la Formación a que pertenece, el número indica el orden de depositación y el resto corresponde a la composición, origen y/o forma, así:

- Formación de San Salvador:
  - Q´f: aluviones, localmente con intercalaciones de piroclastitas.
  - Q´s: barras costeras.
  - Q´m: manglares.
  - s5´c: efusivas basálticas, ´c: cenizas y tobas de lapilli.
  - s4´a: piroclastitas ácidas (tierra blanca), ´a: efusivas ácidas.

- s3´a: piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas (tobas color café), ´a: efusivas ácidas.
- s2: efusivas andesíticas y basálticas; piroclastitas.
- s1: piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, tobas ardientes y fundidas; efusivas andesíticas.

• Formación de Cuscatlán:
- c3: efusivas andesíticas y basálticas.
- c2: efusivas ácidas e intermedias-ácidas (ocurrencias aisladas eventualmente de ch2).
- c1´I: piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, tobas ardientes y fundidas, edad de ch localmente posible; ´I: sedimentos fluviales y lacustres con intercalaciones piroclásticas.

• Formación de Bálsamo:
- b3: efusivas andesíticas-basálticas.
- b2: efusivas andesíticas, piroclastitas, epiclastitas volcánicas subordinadas.
- b1: epiclastitas volcánicas (en parte fluvial-?lacustre), piroclastitas, corrientes de lava intercaladas

• Formación de Chalatenango:
- ch2: efusivas ácidas (ocurrencias aisladas eventualmente de c2); riolitas.
- ch1: piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas con tobas ardientes y fundidas; efusivas ácidas intercaladas, edad de c localmente posible.
- G: granito, granodiorita.

• Formación de Morazán:
- G: granito, granodiorita.
- m2: efusivas básicas-intermedias hasta intermedias-ácidas, piroclastitas, epiclastitas volcánicas; alteración regional por influencia hidrotermal.
- m1: efusivas intermedias-ácidas, piroclastitas, tobas ardientes, riolitas, epiclastitas volcánicas; ocurrencias aisladas eventualmente más jóvenes.

• Formación de Metapán:
- me3: conglomerados de cuarzo y caliza rojos, areniscas; intercalaciones de vulcanitas.
- me2: calizas y calizas margosas.
- me1´a: conglomerados de cuarzo, areniscas, silititas y lutitas; vulcanitas básicas-intermedias subordinadas; ´a: metasedimentos, metavulcanitas.

2.3 Sismicidad de El Salvador

2.3.1 Conceptos básicos de Sismología

a. Terremotos y Placas Tectónicas [Bolt,1999: p. 137] .

La teoría que explica el proceso tectónico a gran escala es llamada "Teoría de la Tectónica de Placas", la cual surgió de la ciencia geofísica, a mediados de 1960, a la que se agregaron nuevos descubrimientos sobre las propiedades de los terremotos y volcanes. Esta teoría, también explica el patrón de cambios de polaridad magnética (con orientación hacia el polo norte o sur) que adquieren las rocas sub-oceánicas a cada lado de la cordillera meso-oceánica. La polaridad magnética se presenta por tiras magnéticas alternadas, las cuales provienen de la formación de nuevas rocas que nacen en la cordillera meso-oceánica a partir del magma que fluye a lo largo de ella y que representa un proceso continuo que empuja las rocas ya existentes.

La idea básica que cubre al comportamiento de la parte exterior de la tierra se basa, dentro de la geología actual, en algunas planchas sólidas y relativamente rígidas llamadas "placas tectónicas". Estas placas han evolucionado desde la ruptura del supercontinente llamado Pangea, hace 200 millones de años. La energía que maneja el mecanismo de desplazamiento de dichas placas que se encuentran a la deriva proviene del flujo de calor (efecto de cocción) que producen los elementos radiactivos de las rocas que componen el interior de la tierra.

Cada una de estas placas posee un espesor entre 80 y 200 km. Los movimientos horizontales que experimenta cada placa continental u oceánica (1-5 cm/año) provocan fuerzas deformantes sobre las rocas que están en continuo contacto entre sus planos adyacentes causando cambios físicos y químicos sobre ellas. En la orilla de cada placa es donde se experimentan los mayores efectos geológicos de la Tierra, ya que se producen cambios geológicos radicales y masivos. Estos mecanismos de contacto entre placas es el causante directo de la mayoría de terremotos.

Existen cinco formas de interacción de placas que dependen del tipo de corteza en sus límites y su movimiento relativo [Bommer, 1996: p.21]:

- Primero, extensión en los dorsales meso-oceánicos, dando lugar a que emerja nuevo material que aumentan el tamaño y separación de las placas.

- Segundo, choque frontal entre placas oceánica-continental y oceánica-oceánica en la cual una de las dos desciende debajo de la otra, llamándose a este mecanismo "subducción".
- Tercera, se da una interacción donde placa oceánica y continental chocan de forma lenta, dándose un crecimiento continental a expensas de la oceánica, llamándose a este proceso "acreción".
- Cuarta, esta interacción es la falla de transformación, donde dos placas se mueven paralelamente, con rozamiento en la falla.
- Quinta, es la colisión entre dos placas continentales produciendo grandes montañas debido a su enorme presión, llegando a convertirse ambas placas en una sola.

En la actualidad, las placas que contienen a África, La Antártica, Norte y Sur América, se encuentran en crecimiento; mientras que la placa del Pacífico se está haciendo más pequeña.

Los terremotos ocasionados por las placas tectónicas pueden ser [Bolt, 1999: p.141]:

- Intraplaca. Los terremotos son originados lejos de los límites de las placas y representan un 10% de los terremotos registrados.
- Entreplacas. En este tipo de interacción de placas los terremotos se originan en el borde más superficial de ellas y representan un 90% de los terremotos percibidos en el mundo.

a.1 Teoría del Rebote Elástico.

Esta teoría fue publicada en 1911 por H. F. Reid, luego de estudios realizados a la falla de San Andrés. El concepto se presenta de forma sencilla: se sabe que las fuerzas tectónicas son las que actúan sobre la corteza terrestre haciendo que ésta se deforme acumulando esfuerzos dentro de las rocas, teniendo este mecanismo un comportamiento similar al de un resorte cuando se extiende o se comprime. Cuando el esfuerzo vence la resistencia máxima de las rocas ocurre la ruptura, entonces los dos lados de la fractura rebotan súbitamente hacia posiciones de reposo, así como lo haría un resorte que vuelve a su longitud inicial no deformado [Bommer, 1996: p.21,22].

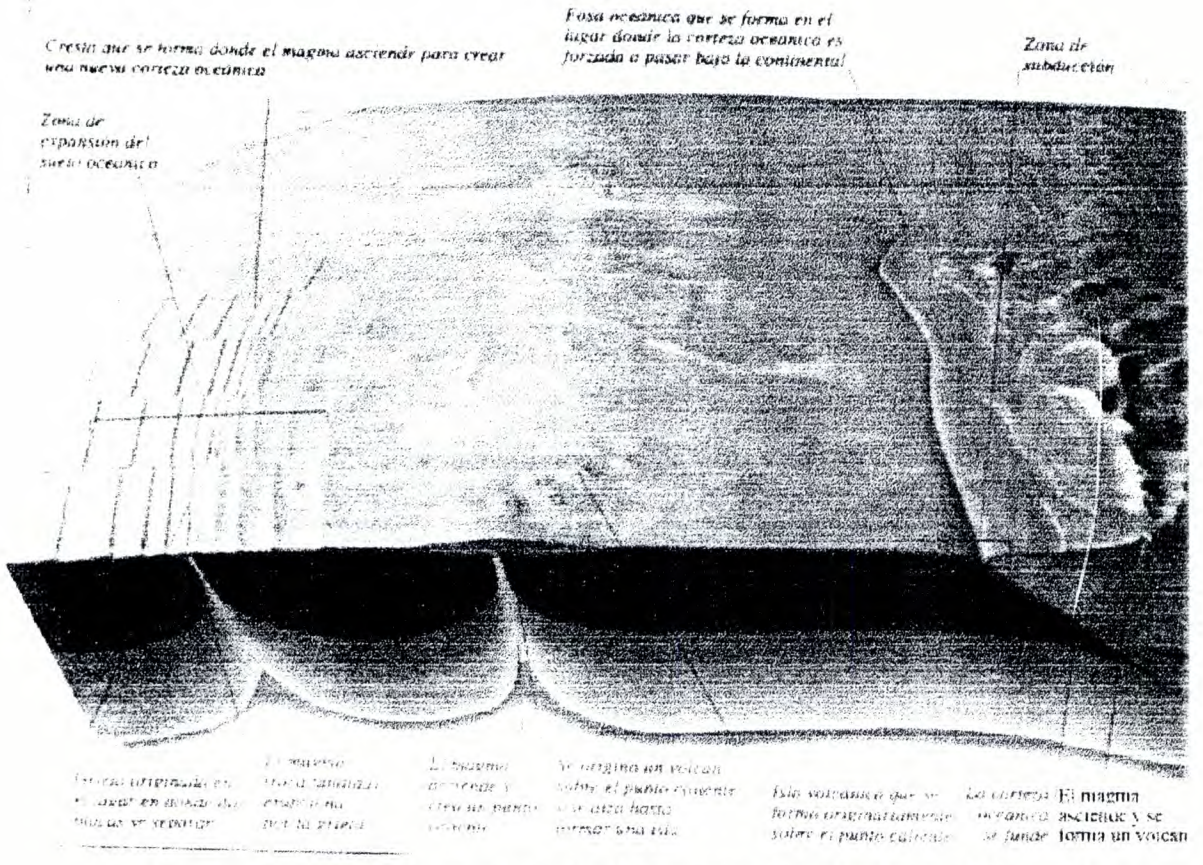


Fig. 2.5 Movimientos de placas, adaptado [Diccionarios Visuales Altea, 1993: p.12].

b. Tipos de Fallas geológicas

Las fallas pueden considerarse, según los geólogos, como una discontinuidad en la estructura de las rocas, las cuales tienen un alcance desde un metro hasta cientos de kilómetros. Algunas fallas pueden haber sido originadas desde hace mucho tiempo atrás y aún experimentar pequeños movimientos sin producir sismos; pero también las hay inactivas que experimentan una ruptura repentina que ocasiona un sismo desde poco sensible hasta uno de acciones destructoras. La presencia de fallas geológicas es marcada con su respectiva orientación en mapas elaborados por geólogos que se encargan de estudiar los fenómenos geológicos que se dan en la actualidad en diferentes partes del mundo, así también, sus causas y consecuencias, etc.

El corte lineal que la falla produce sobre la superficie del terreno es ocasionado por el movimiento de un bloque de roca sobre un plano de falla. Esta línea de falla es referenciada respecto al norte magnético por un ángulo llamado azimut; sin embargo, es

importante mencionar que la mayoría de los planos de falla que producen terremotos no llegan a ser visibles en la superficie terrestre.

Las fallas se clasifican de tres tipos, según sea su mecanismo de desplazamiento horizontal o vertical sobre su plano de falla: falla normal, falla inversa y falla de desgarre [Bolt,1999: p. 81].

- Falla Normal. El plano de ruptura de esta falla de profundiza con una inclinación entre 0° y 90°. Esta falla ocurre cuando el bloque superior sobre el plano de falla se desliza hacia abajo con respecto al bloque inferior.
- Falla Inversa. Cuando el bloque superior se desliza hacia arriba respecto al bloque inferior del plano de falla se produce una falla inversa.
- Falla de Desgarre. Esta está determinada por el desplazamiento horizontal a través del plano de falla el cual puede ser, según sea su movimiento relativo, de tipo dextral o sinistral. Por ejemplo, sí un bloque se ha movido respecto al otro hacia la derecha se denomina dextral y sí el movimiento es hacia la izquierda será sinistral. Esto debe de cumplirse desde cualquier bloque donde se tome el punto de referencia.

También es posible que ocurra una combinación de éstas dando lugar a las fallas oblicuas.

El daño ocasionado por un sismo puede variar de acuerdo al tipo de falla que afecte a una estructura. Las fallas de tipo vertical pueden causar efectos más destructivos a lo largo y ancho de una considerable área (por ejemplo deslizamientos de tierra, grietas, etc.); mientras que las fallas de *desgarre* u *horizontales*, generalmente, afectan áreas de menor extensión y causan menos daños en las estructuras cercanas. Véase figura 2.4.

Los tipos de terremotos, según el modo de generación, son los siguientes [Bolt, 1999: p.105]:

- Terremotos de origen tectónicos. Este es de los más comunes, se originan de la ruptura repentina de las rocas que se encuentran sometidas a fuerzas geológicas.
- Terremotos de origen volcánico. Esencialmente, están asociados a la actividad de un volcán, producto de las fuerzas tectónicas desatadas dentro de las rocas; sin embargo, no es necesario que ocurran ambos eventos a la vez, sismos y actividad volcánica. La propagación de ondas producidas por esta actividad volcánica son las mismas que las producidas por un terremoto de origen tectónico.

- Terremotos de colapso. Se originan por el repentino desprendimiento del techo de una mina o caverna, o también, por el movimiento a gran escala de masas de suelo, rocas, etc.
- Terremotos por explosiones causadas por el hombre. Estas son detonadas por efectos derivados de químicos o reactivos nucleares.

c. Tipos de ondas sísmicas.

Estas ondas son originadas por un movimiento sísmico y son esencialmente las que pueden llegar a provocar daños de diferente índole a la humanidad y a la naturaleza. Existen tres clases de ondas sísmicas, de las cuales dos se propagan dentro de las masas rocosas del suelo: ondas primarias o "P" y ondas secundarias o "S"; y la tercer onda es conocida como "onda superficial" [Bolt,1999: p. 20].

- Ondas primarias o "P". Su nombre se deriva de su rapidez, ya que es la más veloz de las tres y por lo tanto es la primera en llegar a la superficie terrestre. Esta onda P puede viajar a través de roca sólida (montañas de granito) como a través de materiales líquidos (magma, agua de mar, etc.); y además, tiene la cualidad de desplazarse de forma similar a una onda de sonido, por lo cual una fracción de ella se transmite dentro de la atmósfera como onda sonora pudiendo ser percibida por humanos y animales desde una frecuencia de 15 Hertz [Bolt, 1999: p.94]. Su desplazamiento se propaga en dirección longitudinal ejerciendo un efecto de compresión y tensión en las rocas.
- Ondas secundarias o "S". Esta es la onda que más lentamente se desplaza a través de las rocas y no puede pasar a través de los líquidos. Su propagación es en dirección transversal, perpendicular al desplazamiento de las ondas P, y es la causante de imprimir esfuerzos cortantes en rocas y suelos. Su movimiento vertical y horizontal representa mayor peligro de daño para las estructuras de origen humano.

La velocidad con que se desplazan cada una de estas dos ondas descritas anteriormente depende de la densidad y propiedades elásticas del medio donde se propaguen. Tanto las ondas P como S poseen la peculiaridad de transformarse parcialmente en otro tipo de onda S o P, respectivamente, a causa de una refracción o reflexión de ellas ocurridas en el límite de un cambio de estrato de roca.

- Ondas superficiales. El movimiento de este tercer tipo de ondas se desarrolla cerca de la superficie del terreno y su avance disminuye a medida se van profundizando más. El comportamiento de estas ondas de asemeja a las ondulaciones que se producen en el agua. Estas mismas ondas de dividen en: ondas Love y Rayleigh. Las ondas Love se comportan como una onda S, presentando un desplazamiento horizontal, pero describiendo cierto ángulo con respecto a la dirección de propagación, lo cual puede afectar seriamente una estructura. Las ondas Rayleigh provoca en los materiales perturbados por ellas desplazamientos verticales y horizontales, siempre sobre un plano vertical trazado en la dirección de su desplazamiento, lo cual describe un movimiento elíptico.

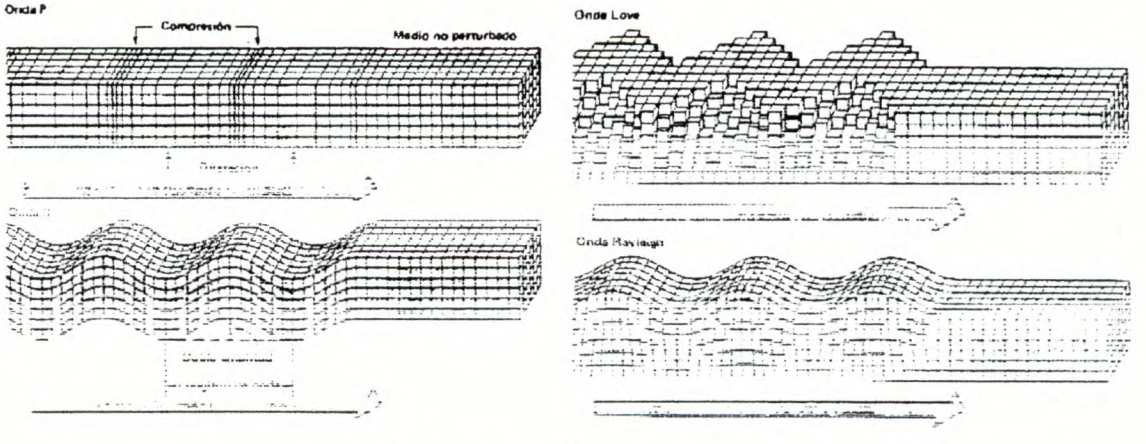


Figura 2.6 Tipos de ondas sísmicas [Bolt, 1981]

c.1 Ubicación de los terremotos

La fuente de energía puntual donde se originan las ondas sísmicas es llamada *foco* del terremoto o *hipocentro*. El punto que se proyecta desde el foco hasta la superficie de la tierra es llamado *epicentro* del terremoto. De acuerdo a la profundidad a la que se ubican los hipocentros, éstos se clasifican en intermedios (70 – 300 km) y los profundos que superan los 300 km. Los terremotos superficiales se dan a profundidades menores que los 70 km y representan un 75% de todos los terremotos que se perciben en el mundo; por estar cerca de la superficie terrestre son de carácter más devastador [Bolt,1999: p. 35].

d. Medición de los Terremotos.

- Intensidad de los movimientos sísmicos. La intensidad es obtenida por la medición del grado de daños producidos sobre estructuras de origen humano, cantidad de perturbaciones ocasionadas sobre la superficie del terreno y las reacciones perceptivas de humanos y animales ante la sacudida. El grado de daño es también calificado, en la actualidad, con base a una descripción escalonada llamada escala de Mercalli Modificada, la cual usa valores en números romanos de I hasta XII.

  Una calificación I, con base a dicha escala, de un lugar alcanzado por un sismo describe una percepción casi nula del evento sísmico y es sentida sólo bajo circunstancias especiales; mientras que una calificación de XII, en la misma escala, de otro lugar afectado representaría la destrucción total del mismo. Esta medición de la intensidad sísmica no se realiza con aparatos sino que es determinada bajo una observación subjetiva del observador encargado.

  La evaluación de las intensidades asignadas a las áreas afectadas por un sismo conllevan a la creación de un mapa de isosistas, el cual funciona de forma similar a un mapa de curvas de nivel, solamente que a cada área entre líneas isosistas consecutivas se le asigna un nivel de intensidad, comenzando desde la intensidad en el epicentro del sismo hasta llegar a las zonas de más baja intensidad y por ende, a mayor distancia al epicentro [Bolt,1999: p. 147]. De las líneas isosistas se deduce mucha información acerca de las características de un terremoto, en primer lugar proporciona una indicación de la ubicación de la fuente sismogeneradora; y en segundo lugar, si el sismo es grande las isosistas para intensidades mayores serán elongadas en la dirección de la falla [Bommer, 1996: p.85]. Ver tabla 7.1.

- Magnitud de los movimientos sísmicos. El cálculo de la magnitud de los sismos no depende de la densidad poblacional afectada o de las estructuras dañadas. Esencialmente, la magnitud de un sismo se determina con base a la amplitud de ondas, registradas por sismógrafos, a las cuales son aplicadas artificios matemáticos. En 1958, el profesor Richter definió la magnitud de un terremoto local (M_L) como: "el número logarítmico base 10 de la amplitud máxima de la onda sísmica (en miles de milímetros) registrada en un sismógrafo estándar a una distancia de 100 km desde el epicentro del

terremoto". Por cada unidad que aumenta la magnitud de un terremoto en una escala logarítmica, aumenta 10 veces la amplitud de las ondas sísmicas.

La escala de magnitud de un terremoto sólo es limitada por el esfuerzo que resistan las rocas de la corteza terrestre.[Bolt, 1999: p.152]. La magnitud también se relaciona con la energía sísmica liberada. Para la determinación de ésta se han creado diferentes escalas, asociadas al tipo de ondas que producen los sismos, las cuales se definen a continuación [CIG, 2001]:

- Magnitud de Ondas superficiales (Ms). Esta escala se basa en la amplitud máxima producida por las ondas superficiales Rayleigh con período en el rango de 18 a 22 segundos.
- Magnitud de Ondas de Cuerpo (mb). Esta magnitud se basa en la amplitud de ondas de cuerpo (ondas que viajan a través de las rocas, P) con períodos cercanos a 1 segundos.
- Magnitud de Momento (Mw). Se define como la energía liberada por un sismo a partir del momento sísmico.
- Magnitud de Energía (Me). El cálculo de esta magnitud requiere la suma del flujo de energía sobre un amplio rango de frecuencias generadas por un sismo.
- Magnitud de Duración (Md). Esta magnitud es una variación del concepto de magnitud local que se emplea en algunas redes. Es calculada en base a la duración de la señal sísmica.
- Magnitud local (ML). Esta magnitud está basada en la amplitud máxima del registro de un sismógrafo Wood-Anderson, fue desarrollada por Richter y es válida solamente en el sur de California.

2.3.2. Fuentes de sismos en El Salvador

El Salvador se encuentra situado en una zona afectada por la compleja configuración tectónica de la región centroamericana y del Caribe, la cual da lugar a la interacción de cinco placas importantes que se convierten en fuentes de terremotos: placa de Cocos, placa del Caribe, placa de Norteamérica, placa de Nazca, placa de Sur América.[Bommer, 1996: p.23-24]. Ver figura 2.7.

- Zona de subducción. Se encuentra ubicada al borde del océano Pacífico, a unos 50 km hacia afuera de la costa salvadoreña, afectando la región centroamericana desde

Guatemala hasta Costa Rica. Esta zona de subducción se encuentra limitada al sur por la trinchera Mesoamericana que es donde la placa de Cocos se sumerge bajo la placa del Caribe, debido al empuje que ejercen otras placas sobre la de Cocos. Los sismos que se producen en la trinchera tienen un rango de profundidad desde los 70 hasta los 300 km y pueden llegar a originar terremotos de gran magnitud.

- Cadena volcánica. El Salvador es afectado por una cadena de volcanes, generada por la subducción de la placa de Cocos, que se extiende desde Guatemala hasta Costa Rica registrando una longitud aproximada de 1 100 km. Esta cadena se encuentra orientada paralelamente a la trinchera Mesoamericana. Los terremotos que aquí se producen son de carácter más destructivos por ocurrir a poca profundidad, aunque sean relativamente de baja magnitud.
- Fallas de Motagua, Polochic-Chixoy y Jocotán-Chamelecón. Estas fallas atraviesan el centro de Guatemala y forman la frontera entre las placas del Caribe y de Norteamérica y continúan dentro del mar Caribe en la fosa del Caimán.
- Fallas locales. El Salvador ha experimentado estos efectos a través de su historia, ya que la localización de estos terremotos varía poco o nada y su incidencia periódica es casi siempre en lugares con alta densidad poblacional. Esta fallas corren en la dirección WNW y NNE principalmente.

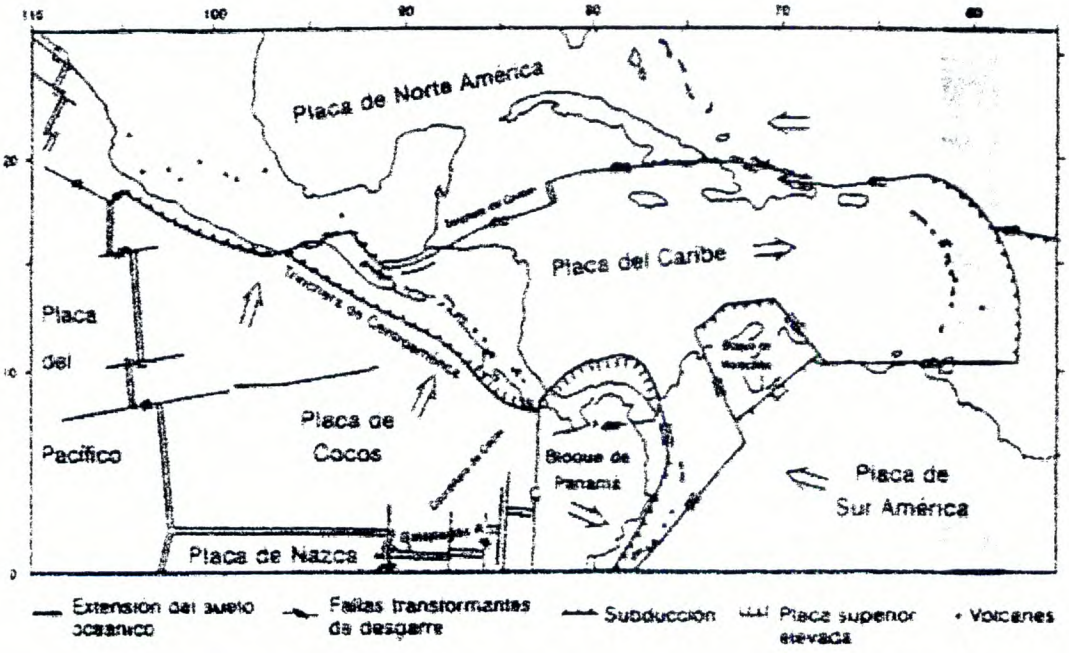


Figura 2.7 Tectónica del Caribe y de Centroamérica [Weyl, 1980]

2.3.3. Zonas Afectadas por Sismos en El Salvador

Con el fin de reconocer y presentar las áreas que más han sido afectadas, a través de la historia, por la ocurrencia de sismos en El Salvador, se muestra a continuación un catálogo depurado a partir de información macrosísmica del siglo XX (Tabla 2.10), en la cual sólo se incluyen sismos que han registrado una intensidad igual o mayor a VII en la escala Modificada de Mercalli [Madrid et al, 1998: p.243].

AÑO/MES/DIA	EPICENTRO N	W	M_S	MM	FUENTE	AREAS AFECTADAS
1915-09-07	13,900	89,600	7,7	IX	Subducción	Apaneca, Santa Ana
1917-06-08	13,820	89,310	6,65	VIII	Cadena volcánica	Armenia, Ateos, Sacacoyo, San Julian
1917-06-08	13,770	89,500	5,39	VIII	Cadena volcánica	Apopa, Nejapa, Quezaltepeque, San Salvador, Santa Tecla
1919-04-28	13,690	89,190	5,94	X	Fallas locales	Soyapango, San Salvador, San Marcos, San Jacinto
1930-07-14	14,120	90,250	6,85	VII	Cadena volcánica	Apaneca, Izalco, Ahuachapan
1932-05-21	12,800	88,000	7,1	VIII	Subducción	San Salvador, Sonsonate, La Paz, Usulután
1936-12-20	13,717	88,933	6,1	VIII	Fallas locales	San Vicente, San Sebastian
1937-12-27	13,933	89,783	5,9	VII-VIII	Fallas locales	Ahuachapán, Atiquizaya
1951-05-06	13,517	88,400	5,88	VIII	Fallas locales	Jucuapa, Chinameca, Santiago de María, San Buenaventura
1965-05-03	13,700	89,167	6,3	VIII	Fallas locales	San Salvador, Mejicanos, Soyapango, Ciudad Delgado, Ilopango
1982-06-19	13,300	89,400	7,3	VII	Subducción	Todo el país
1986-10-10	13,667	89,183	5,4	VIII-X	Fallas locales	San Salvador,
2001-01-13	13,063	88,787	7,7	VII-VIII	Subducción	Santa Tecla, alrededores lagos de Ilopango y Coatepeque, Usulutan, San Vicente. Fuente parámetros: NEIC; fuente intensidad: CIG.
2001-02-13	13,613	89,069	6,6	VII-VIII	Fallas locales	San Vicente. Fuente parámetros: NEIC; fuente intesidad: CIG.

Tabla 2.10 Sismos destructores en El Salvador en el siglo XX, adaptado [Madrid et al, 1998: p. 243]

En la tabla 2.11, se presenta la información de los enjambres sísmicos, que son una serie de pequeños sismos sin un evento principal, que suceden en un período corto de tiempo y en una región determinada; que han afectado el territorio nacional entre 1985 y 1999. En la tabla 2.12 se han agrupado estos enjambres en zonas, las cuales se visualizan en la figura 2.8 [CIG, 2001].

No.	UBICACION	PERIODO	NUMERO DE SISMOS
1	Berlín-Santiago de María	Abril /1985	> 5 000
2	San Salvador	Octubre / 1986	>10 000
3	San Vicente	Enero / 1987	250
4	Lago de Ilopango	Junio/1989	96
5	Ateos-Las Tres Ceibas	Octubre/ 1989	17
6	Volcán San Vicente	Agosto/ 1989	148
7	Ateos- Sacacoyo	Octubre / 1990	259
8	Tonacatepeque-San José Guayabal	Enero/ 1990	17
9	Guadalupe, Tepetitán, San Lorenzo, San Vicente	Marzo/1990	20
10	Juayúa- Apaneca	Marzo/1990	140
11	San Miguel Tepezontes	Junio/1990	76
12	Juayúa	Junio/1990	50
13	Conchagua	Febrero / 1991	7 211
14	Zapotitán, Tres Ceibas y El Rosario	Marzo/1991	5
15	Armenia- Zapotitán	Abril/1991	65
16	Ahuachapán	Enero/1992	18
17	Volcán San Salvador	Enero/1992	32
18	Ahuachapán	Julio / 1992	463
19	Volcán San Salvador	Agosto/1992	19
20	Lago de Ilopango	Noviembre/1992	24
21	Volcán San Vicente	Febrero/1993	22
22	Lago Ilopango-volcán San Vicente	Agosto/1993	38
23	Candelaria de la Frontera	Septiembre/1993	18
24	Candelaria de la Frontera	Enero / 1994	31

25	Chanmico-volcán de San Salvador-lago de Ilopango-volcán de San Vicente	Abril / 1994	90
26	Lago de Ilopango	Julio / 1994	51
27	Candelaria de la Frontera	Agosto/1994	82
28	Lago de Ilopango	Junio / 1995	50
29	Lago de Ilopango-volcán de San Vicente	Julio-Agosto / 1995	104
30	Volcán de San Vicente-río Lempa	Mayo / 1996	28
31	Volcán de San Vicente-río Lempa	Septiembre / 1996	38
32	San Lorenzo-frontera con Guatemala	Septiembre / 1996	29
33	Noreste volcán de San Vicente	Octubre / 1996	13
34	Antiguo Cuscatlán	Octubre / 1996	9
35	Lago de Ilopango-volcán de San Salvador-volcán de San Vicente	Enero-Febrero/1997	121
36	Volcán de San Vicente	Mayo/1997	49
37	Volcán de San Miguel	1997	268
38	Valle de Zapotitán	Octubre/1997	34
39	Lago de Ilopango	Enero/1998	15
40	Juayua, Sonsonate	Febrero/1998	16
41	Lago de Ilopango	Marzo/1998	18
42	Este del volcán de San Vicente	Abril/1998	24
43	Entre volcán de San Vicente y río Lempa	Noviembre/1998	115
44	Al norte, nor-este y este del volcán de San Vicente	Marzo-Abril/1999	940
45	Golfo de Fonseca, isla de Meanguera y sitios aledaños	Abril/1999	219

Tabla 2.11 Zonas de enjambres sísmicos [CIG, 2001]

Zona	Enjambres que comprende según Tabla 2.11
A	23, 24, 27 y 32
B	10, 12, 16, 18 y 40
C	5, 7, 14, 15 y 38
D	2, 4, 8, 17, 19, 20, 25, 26, 28, 34, 35, 39 y 41
E	3, 6, 9, 11, 21, 22, 29, 30, 31, 33, 36,42 , 43 y 44
F	1
G	37
H	13

Tabla 2.12 Consolidado de datos [CIG, 2001]

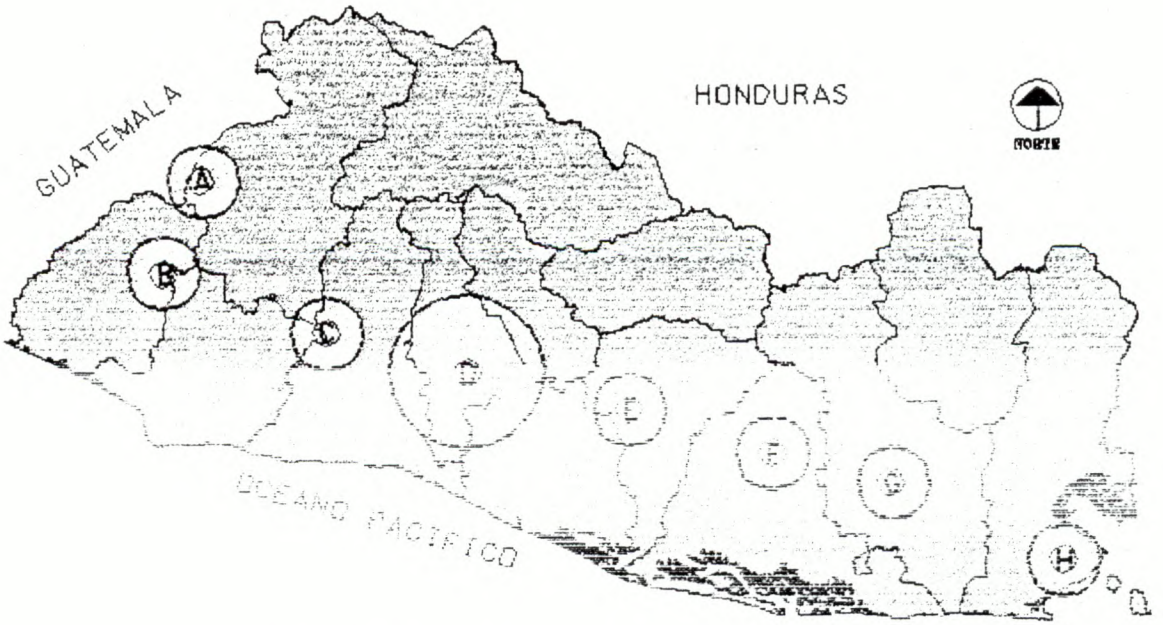


Figura 2.8 Zonas de enjambres sísmicos [CIG, 2001]

2.4 Geomorfología

2.4.1 Conceptos básicos de Geomorfología

La corteza terrestre está expuesta a una serie de procesos, que hacen que ésta cambie con el tiempo, pero estos procesos se complementan unos a otros, mientras unos destruyen, los otros construyen el relieve de la corteza. Estos procesos son llamados *procesos morfológicos*. Los que se dan en el interior de la corteza, actividad magmática, volcanismo, actividad sísmica, tectónismo (diastrofismo) y metamorfismo, son llamados *procesos de dinámica interna*; y los que se dan en el exterior de la corteza, intemperismo, acción geológica de los ríos, acción geológica de los mares y gradación, son llamados *procesos de dinámica externa*.

La formación del relieve de la corteza terrestre, afectado por estos procesos morfológicos, se puede agrupar en cuatro categorías, según [Pidwirny, 2000: p.10]:

- Relieves estructurales: son creados por movimientos masivos de la tierra, debidos a la tectónica de placas.
- Relieves de meteorización: son creados por la destrucción física y descomposición química de las rocas, a través del intemperismo.

- Relieves de erosión: formados a partir de la erosión de los materiales superficiales, causada por el viento, agua y gravedad.
- Relieves de depositación: formados a partir de la depositación de los materiales meteorizados y erosionados.

El estudio de las formas del relieve de la corteza terrestre, teniendo en cuenta su origen, naturaleza de las rocas, clima y las diferentes fuerzas endógenas y exógenas que de modo general entran como factores constructores y destructores del relieve, es de lo que se encarga la *Geomorfología*.

2.4.2 Geomorfología de El Salvador

El relieve de la corteza de El Salvador está constituido por seis unidades estructurales geológico-tectónicas, según [Aguilar, 1986: p.79]:

- Planicie Costera: esta unidad consta de dos zonas separadas entre sí: una ubicada en el oeste y la otra en el centro del país, abarcando ambas un poco más del 12 % del territorio nacional. En lo que respecta a su Petrografía y origen no existe uniformidad alguna. Los ríos que descienden de las regiones montañosas, situadas al norte de la Planicie Costera, transportan anualmente hacia el mar unos 16 km^3 de agua lluvia, lo cual ha contribuido decisivamente a la formación de la planicie, ya que su carga de suspensión, calculada en unos 16 000 000 de toneladas de material, se ha depositado en su mayor parte en esta región, pudiendo comprobarse esto por la presencia de material suelto como pómez, arena, limos, capas arcillosas, etc.
- Cadena Costera: al igual que la unidad anterior, cubre aproximadamente un 12 % de la superficie salvadoreña. Se ha considerado como un bloque con una inclinación de 5° hacia el sur con terminación en el mar o debajo de la Planicie Costera. La altura máxima que alcanza al llegar a la cumbre, en dirección norte, es de 1 200 msnm. La Cadena Costera ha sufrido cuatro plegamientos consecutivos:

  El primero comienza a orillas del río Paz con una altura de 300 msnm, con dirección este hasta alcanzar los 1 400 msnm en el altiplano de Tacuba-Apaneca, para descender a continuación en las cercanías de Sonsonate-Izalco.

  El segundo se inicia inmediatamente después del anterior, con una nueva subida, en las cercanías de Sonsonate-Izalco, entra en la cordillera del Bálsamo, en la cual avanza su

vértice, localizado al sur de Jayaque, en una altura de 1 500 msnm, después baja suavemente hacia el valle del río Jiboa, donde llega a una altura de 400 msnm.

El tercero es relativamente débil, su altura máxima es de 1 000 msnm, no es totalmente visible, ya que el cono del volcán de San Vicente lo recubre en parte.

El cuarto es la prolongación del tercero, atraviesa con una altura de 200 a 300 msnm el río Lempa y se pierde en el complejo volcánico de Tecapa. En esta depresión desagua el río Lempa y el río Grande de San Miguel, su máxima elevación es de 600 msnm.

El ancho de la Cadena Costera varía de acuerdo al tectonismo que ha sufrido, estrechándose en las partes más bajas, ocurriendo lo contrario en las elevaciones, alcanzando dos veces el mar. Petrográficamente la Cadena Costera está formada por aglomerados volcánicos gruesos y densos, originados a fines de la era Terciaria, o sea, en el Plioceno; están intercalados con capas delgadas de lava andesítica y estratos de tobas e ignimbritas, integrando una serie con un espesor mayor de 1 500 m, ésta unidad se denomina "Estrato del Bálsamo".

- Fosa Central: comprende un 20 % de la superficie del país. Se extiende a lo largo de éste con un rumbo WNW-ESE, limitada, tanto al norte como al sur, por escarpamientos de diversas alturas; posee un ancho que varía entre 10 y 30 km. La Morfología de esta unidad está ligada estrechamente a las condiciones geológicas de la misma; se supone que en el vértice de una gran geoanticlinal, el cual poseía un eje con una dirección WNW-ESE, se formó un graben o fosa en la extensión indicada. El lado norte de este geoanticlinal está constituido por la Cadena Interior, mientras que al sur lo está por la Cadena Costera.

  Los desplazamientos tectónicos de la Fosa Central, ocurridos a través del tiempo geológico, varían de 1 a 1,5 km, asumiendo que en los lugares de mayor altura los hundimientos deben de haber ocurrido de una manera muy intensa. Cerca de Ciudad Arce, al este de San Vicente, y entre El Carmen y Siramá, son bien notables los estrechamientos de la Fosa; en cambio cerca de Chalchuapa, San Salvador y Usulután su ensanchamiento es bastante visible. No se observa ninguna falla joven y marginal paralela que sirva de indicio a este proceso tectónico, todas las fallas recientes cruzan la Fosa en dirección diagonal.

Los cuatro plegamientos de la Cadena Costera están estrechamente conectados con los cuatro grandes macizos volcánicos de la Fosa Central. Estos últimos son estrato volcanes, estando petrográficamente formados por los siguientes elementos: materiales piroclásticos, pómez, escorias, lapilli, tobas y cenizas volcánicas; y lavas. Las calderas de Ilopango y Coatepeque son también centros de producción de materiales volcánicos. El espesor de los materiales geológicos depositados en la Fosa Central varía de 400 a 800 m.

- Cadena Interior: abarca un 20 % del área salvadoreña. En el oeste del país la Fosa Central y la Fosa Interior están separadas por esta unidad geomorfológica, lo cual no sucede en el este, ya que la Fosa Interior no existe en ese extremo; por lo tanto la Cadena Interior se une con la Montaña Fronteriza. La tectónica ha desempeñado un papel importante en lo que respecta a su elevación sobre el nivel del mar que oscila entre los 700 y 1 000 msnm. La Cadena Interior está formada aproximadamente por diez plegamientos. Su basamento está formado por aglomerados volcánicos de edad Pliocénica. En los departamentos de Cabañas y Morazán yacen sobre estas rocas sedimentos aluvio-volcánicos de carácter dacítico. Una de las características principales de esta unidad es la de estar formada por volcanes que geológicamente están considerados extintos, tales como el Guazapa, Sihuatepeque y Cacahuatique.
- Fosa Interior: esta es la unidad geomorfológica más pequeña del país, ya que ocupa únicamente un 5 % del territorio nacional. Está situada al noroeste del país, y cuenta con una longitud de 70 km. Desde el punto de vista morfológico su extremo oeste es una planicie, que se encuentra rellenada de cascajo; en cambio, el extremo este posee un pronunciamiento menor, constituido por el basamento. Los ríos Lempa y Desagüe atraviesan la Fosa Interior. El primero corre en el graben o fosa de Citalá, en tanto que el segundo lo hace por un graben de dimensiones pequeñas. Los materiales geológicos arrastrados por el río Lempa se han depositado en ésta.
- Montaña Fronteriza: comprende un 25 % del país. Está constituida por dos elementos estructurales, los cuales geológicamente son bien heterogéneos: la serie marina de Metapán, formada por las rocas más antiguas del país; y la serie de Chalatenango, que en parte está formada por rocas intrusivas. Las alturas máximas de la Montaña Fronteriza oscilan entre los 1 500 y 2 500 msnm, y abarcan grandes extensiones.

CAPITULO 3

MECANICA DE SUELOS.

3.1 Introducción a la Mecánica de Suelos

Es necesario mencionar que la Mecánica de Suelos práctica se basa principalmente en la experiencia, la cual al ser combinada con la ciencia aplicada revela las relaciones existentes entre los fenómenos geológicos y sus causas. Es por esta razón importante manejar una correcta investigación de las propiedades físicas de los suelos, por lo que a continuación se describe una serie de conceptos y parámetros para lograr tal objetivo.

Definiciones de suelo y roca desde el punto de vista ingenieril [Peck y Terzaghi, 1980: p.4].

- Suelo: "Todo agregado natural de partículas minerales separables por procesos mecánicos de poca intensidad, como agitación en agua".
- Roca: "Agregado de minerales unidos por fuerzas cohesivas poderosas y permanentes".

3.1.1 Tipos de suelos más comunes en el terreno [Peck y Terzaghi, 1980: p.4]

- Arenas y gravas. Son agregados sin cohesión de fragmentos granulares o redondeados, poco o no alterados, de rocas y minerales. Las arenas son clasificadas como tales cuando presentan partículas menores de 2 mm, mientras que las gravas poseen partículas con tamaños entre 15 y 20 mm.
- Limos. Una subdivisión de los limos presente en los suelos puede ser el *limo inorgánico*, el cual está formado por granos finos con poca o ninguna plasticidad. La variedad menos plástica consiste en partículas regularmente equidimensionales de cuarzo, y las más plásticas contiene un porcentaje considerable de partículas en forma de escamas, denominándoseles *limos plásticos*. Los limos también se presentan como suelos formados por granos finos más o menos plásticos, con una mezcla de partículas de materia orgánica finamente dividida, incluso presentando en ocasiones fragmentos visibles de material vegetal parcialmente descompuesto, designándosele *limos orgánicos*.
- Arcillas. Se originan de la descomposición química que sufren las rocas, las cuales producen agregados de partículas microscópicas y submicroscópicas. Las arcillas poseen una permeabilidad extremadamente baja, lo cual las convierte en suelos plásticos en estado húmedo y suelos duros en estado seco. Este tipo de suelo, además, puede presentar propiedades físicas significativas que derivan de la presencia de materia orgánica finamente dividida, lo que las convierte en *arcillas orgánicas*. Este tipo de arcilla es muy

compresible en estado saturado y de alta resistencia en estado seco. Su color puede variar desde gris oscuro hasta negro acompañado de un olor característico.

- Turbas. Son agregados fibrosos de fragmentos macro y microscópicos de materia orgánica descompuesta. Este tipo de suelos presenta una gran compresibilidad ante cualquier tipo de fuerza que soporte. Su color varía de un color castaño claro a negro.

3.1.1.1 Tamaño y forma de las partículas de los suelos [Peck y Terzaghi, 1980: p.9]

- Fracción gruesa y muy gruesa (>0,06 mm).
- Fracción fina (0,06 – 0,002) mm.
- Fracción muy fina (<0,002 mm).

3.1.2 Agregados del suelo [Peck y Terzaghi, 1980: p.22]

Cualitativamente. Los agregados pueden diferir entre sí en textura, estructura y consistencia. Estas cualidades, a excepción de la estructura, pueden ser determinadas a partir de una inspección visual en el campo, la cual es de vital importancia en la descripción de los consiguientes estratos del subsuelo.

- Textura. Describe el grado de fineza y uniformidad que se perciba del suelo a través del tacto, el cual puede catalogarse como: harinoso, suave, arenoso, áspero, etc.
- Estructura. Comprende la forma en que se encuentran acomodadas las partículas de la masa del suelo. Basándose a partir de la porosidad, la estructura puede ser de tipo: *dispersa*, las partículas se encuentran orientadas paralelamente entre sí; *floculenta*, el contacto de las partículas entre sí ocurre en sus bordes; *nidos de abejas*, presenta una disposición de manojo de partículas sueltas; *en esqueleto*, los granos gruesos forman un esqueleto con intersticios parcialmente llenos de un agregado más fino y relativamente suelto; *en conglomerado*, aglomeración de granos compuestos de tamaño relativamente grande.

  Cabe mencionar que este tipo de estructuras sólo son detectables en arcillas y se utiliza un microscopio electrónico para tal fin. Ver figura 3.1.
- Consistencia. Está relacionada con la adherencia entre las partículas del suelo y la resistencia que ofrecen ante las fuerzas deformantes de los agregados del suelo, la cual puede ser definida como: dura, resistente, frágil, friable, pegajosa, plástica y blanda. Ver apartado 3.2.2.

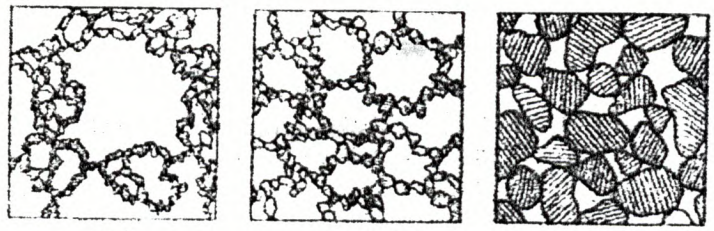


Figura 3.1 estructura de la masa del suelo: a) floculenta, b) nidos de abeja y c) conglomerado [Peck y Terzaghi, 1980: p.17]

Cuantitativamente. Los agregados difieren en porosidad, consistencia, densidad relativa, contenido de humedad y gas, los cuales son obtenidos a partir de ensayos de laboratorio o ensayos in situ. "Sin estos datos, toda descripción de un suelo resulta inadecuada".

- Porosidad (n). Se define por la relación entre el volumen de vacíos (volumen total no ocupado por los granos) y el volumen total del suelo (V). La relación de vacíos (e) está dada por la relación entre el volumen de vacíos (V_V) y volumen de los sólidos (V-Vv). La densidad relativa (Dr) expresa el estado de densidad de los suelos arenosos.

$$n = V_V / V \qquad \text{(Ec. 3.1)}$$

$$e = n / (1 - n) \qquad \text{(Ec. 3.2)}$$

$$Dr = (e_o - e) / (e_o - e_{mín}) x100 \qquad \text{(Ec. 3.3)}$$

e_o = relación de vacíos del suelo en su estado más suelto.

$e_{mín}$ = relación de vacíos en el estado más denso que puede obtenerse en el laboratorio.

e = relación de vacíos del suelo natural en el terreno.

- Consistencia. La forma más directa para medir éste parámetro es a través de valores de la resistencia a la compresión simple (no confinada) de muestras prismáticas y cilíndricas del suelo estudiado. [Juárez y Rico, 1984:p.127], ver tabla 3.1.

Consistencia	Resistencia a la compresión simple q_u (kg/cm^2)
Muy blanda	Menos de 0,25
Blanda	0,25 – 0,5
Medianamente compacta	0,5 – 1,0
Compacta	1,0 – 2,0
Muy compacta	2,0 – 4,0
Dura	Mayor de 4,0

Tabla 3.1 Parámetros para determinar cuantitativamente la consistencia [Juárez y Rico, 1984:p.127]

- Contenido de humedad (w). Este se define por la relación entre el peso del agua contenida en el suelo y el peso del suelo seco, expresado en porcentaje. En arenas y otros suelos superficiales que se ubican arriba del nivel freático, parte de los espacios vacíos pueden ser llenados por aire. Siendo (e_w) el contenido de agua por unidad de volumen de material sólido, entonces el porcentaje de grado de saturación de agua es expresado por:

$$w\ (\%) = (Ww / Ws) \times 100 \qquad \text{(Ec. 3.4)}$$

Ww : peso del agua

Ws : peso del suelo seco

- Peso unitario (γ). Se define como el peso total del agregado de suelo por unidad de volumen (g / cm^3).
- Gravedad específica (G_s). Se aplica a la partícula sólida del suelo y se define como la relación del peso unitario, γ_s, del suelo y el peso unitario del agua, γ_w, a la temperatura de 4°C. [Juárez y Rico, 1984: p.58]

$$G_s = \gamma_s / \gamma_w = W_s / (V_s \cdot \gamma_w) \qquad \text{(Ec. 3.5)}$$

3.2 Clasificación de los suelos

La clasificación del suelo es un sistema de ordenamiento que consiste en catalogar los diferentes tipos de suelos en base a las propiedades físicas semejantes que identifican a cada uno de sus grupos. Con esta clasificación se logra una mayor facilidad al momento de estimar las propiedades que ayudan a determinar una descripción precisa de un suelo que pertenece a un grupo con similares características: tamaño de la partícula, plasticidad y contenido de orgánico.

Para realizar descripciones de tipo general y preliminar, la clasificación basada en la granulometría, representa gran utilidad; sin embargo, la variedad de sistemas de clasificación es amplia, atendiendo a las muchas propiedades individuales y combinadas que se presentan en los depósitos naturales de suelo. Se han desarrollado diferentes sistemas de clasificación de acuerdo al objetivo que se pretenda lograr con el estudio de éstos. Entre ellos se puede mencionar:

- Sistema geológico de clasificación del suelo.
- Sistema agronómico de clasificación del suelo.
- Sistema de clasificación del suelo por su textura.
- Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).
- Clasificación de los suelos de la AASTHO.

El sistema desarrollado en este capítulo, para su posterior empleo en la identificación de los suelos, será el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Este fue introducido originalmente por el Dr. A. Casagrande, en 1948, y adoptado por el cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos (U.S. Bureau of Reclamation), en 1963. Esencialmente, este sistema divide los suelos en tres grupos principales: de grano grueso, de grano fino y altamente orgánico (suelos-turbas) [Peck y Terzaghi, 1980: p.39].

3.2.1 Requerimientos mínimos para una descripción adecuada de los suelos [Peck y Terzaghi, 1980: p.41]

Al momento que se establece el grupo al que pertenece un suelo determinado, ya se asocian las características físicas más significativas del suelo en estudio. Sin embargo, estos suelos pueden contener más propiedades y formas dentro del mismo grupo, lo cual obliga a realizar una distinción más precisa. Una clasificación más detallada sólo se consigue con la disposición de datos suplementarios. Con el fin de obtener esta información, existen dos métodos de gran aplicación: subdividir cada grupo principal, o agregar al nombre del grupo los valores numéricos de las propiedades índices que le correspondan.

El *primer método* es efectivamente aplicable a suelos ubicados dentro de zonas con poca variación de estados y características, esencialmente aplicable a zonas muy demarcadas territorialmente. Este método presenta limitantes al momento de establecer un procedimiento universal de clasificación.

El *segundo método* cubre todas las expectativas de una clasificación universal. El método depende de una buena elección de las propiedades índices que son indicativas de las características físicas esenciales del suelo. En la tabla 3.2 se muestran estas propiedades.

Tipo de suelo	Información general						Resultado de los ensayos de clasificación											
							Muestras inalteradas						Muestras alteradas					
	Color	Olor	Textura	Dilatancia	Angulosidad de los granos	Resistencia del suelo seco	Relación de vacíos	Contenido de humedad	Peso unitario natural	Peso unitario seco	Resistencia a la compresión	Sensitividad	Relación de vacíos máxima	Relación de vacíos mínima	Límite líquido	Límite plástico	Análisis granulométrico	Contenido de carbonato
Arena, Grava	x				x								x	x			x	
Limo inorgánico	x		x	x		x		x	x	x	x	x			x	x	x	x
Limo orgánico	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x			x	x	x	x
Arcilla	x		x			x		x	x	x	x	x			x	x		x
Arcilla orgánica	x	x	x			x		x	x	x	x	x			x	x		x
Turba	x	x	x		x				x	x								

Tabla 3.2 Datos requeridos para la identificación de los suelos [Peck y Terzaghi, 1980: p. 45]

3.2.1.1 Granulometría

El suelo está compuesto por partículas de diferente tamaño, que en forma general se pueden dividir en gruesos y finos, como ya se mencionó anteriormente; así, las partículas gruesas se subdividen en gravas y arenas, y las finas en limos y arcillas. Siendo este tamaño un criterio utilizado para clasificar en forma descriptiva los suelos, ver tabla 3.3.

División	Subdivisión	Tamaño (mm)
Gruesos	Gravas	> 4,75
	Arenas	> 0,075 y < 4,75
Finos	Limos	< 0,075
	Arcillas	< 0,075

Tabla 3.3 Clasificación de los suelos según el tamaño de las partículas [ASTM, 1995: p.208]

La combinación de estas partículas es lo que forma la masa del suelo, siendo necesario realizar un análisis granulométrico para conocer la distribución de tamaños de las partículas, que el suelo posee. El análisis granulométrico no es más que un procedimiento manual o mecánico por medio del cual se puede separar las partículas del suelo según su tamaño, de tal manera que se puede conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total.

Para tal fin, se hace uso de un juego de tamices (mallas) de diferentes tamaños de abertura, ver tabla 3.4.

Designación de malla	Abertura (mm)
12 plg	300
4 plg	100
3 plg	75
2 plg	50
1 ½ plg	37,5
¾ plg	19
3/8 plg	9,5
½ plg	12,5
N° 4	4,75
N° 10	2
N°20	0,850
N° 40	0,425
N°100	0,150
N° 200	0,075

Tabla 3.4 Abertura estándar de diferentes mallas [ASTM, 1995: P.85]

El suelo se hace pasar a través de estos tamices, los cuales proporcionan el tamaño mínimo de partícula en cada uno de ellos; así, aquellas partículas que quedan retenidas por el tamiz N° 4 se denomina gravas, mientras las que pasan la malla N°4 pero no logran pasar la malla N° 200 son las arenas; y los finos, limos y arcillas, son aquellas partículas que logran pasar la malla N° 200. Ver apartado 3.2.2.

Lo más significativo del análisis granulométrico es el hecho de graficar estos porcentajes según el peso retenido en las diferentes mallas contra el tamaño de cada malla,

esta gráfica es conocida como gráfica granulométrica, la cual se realiza en papel semilogaritmico, graficando el tamaño de malla en el eje de las abscisas (escala logarítmica) y el porcentaje que pasa en el eje de las ordenadas (escala normal), ver figura 3.2.

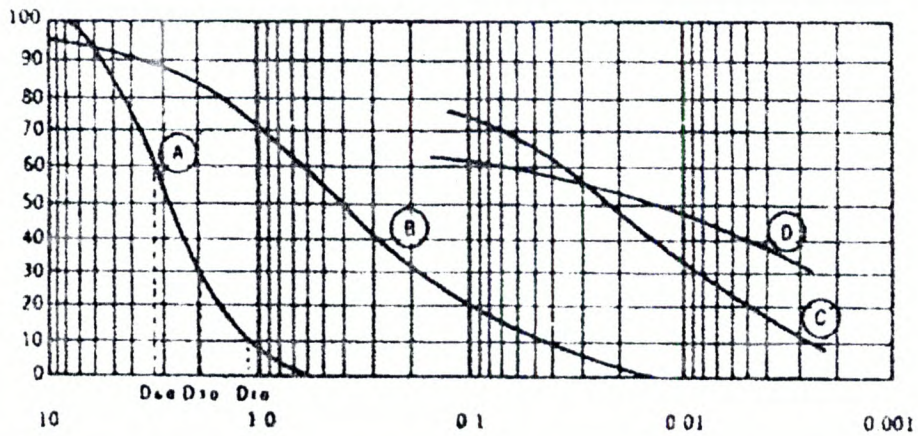


Figura 3.2 Gráfica granulométrica [Juares y Rico, 1984: p.100]

Es importante hacer notar varias consideraciones generales acerca de las curvas de distribución de tamaños de partículas representadas en la gráfica granulométrica:

- La gráfica granulométrica está dividida en zonas: arcillas, limos, arenas y gravas; atendiendo al tamaño, en mm, máximo para cada uno de ellos.
- A mayor pendiente de la curva el material se clasifica como mal graduado y a menor pendiente, de la curva, el material se clasifica como bien graduado; curva A y B en la figura 3.2, respectivamente.
- También, el material se clasifica como bien graduado atendiendo al hecho de que está compuesto por partículas de diferentes tamaños, curva C en la figura 3.2.

Además, a partir de la curva de distribución de tamaños se obtienen diámetros característicos: D_{10}, D_{30} y D_{60}; el D se refiere al tamaño del grano, o diámetro aparente de la partícula; y el subíndice ($_{10}$, $_{30}$ y $_{60}$) denota el porcentaje de material más fino. Con estos diámetros característicos es posible calcular el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de concavidad (Cc), así:

$$Cu = D_{60} / D_{10} \qquad \text{(Ec. 3.6)}$$

$$Cc = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60}) \qquad \text{(Ec. 3.7)}$$

Estos coeficientes también son indicativos de la buena graduación de las partículas del suelo, lo que según Juares y Rico [1984: p.101], un Cu < 3 indica una graduación muy uniforme, también Cc entre 1 y 3 es indicativo de suelos con buena graduación. Cabe mencionar que ambos coeficientes se complementan.

3.2.1.2 Plasticidad

Los suelos a los cuales es necesario aplicar una cierta cantidad de fuerza para separar sus partículas, unidas por fuerzas de atracción mutua que produce una tensión interna llamada cohesión, se les llama *suelos cohesivos o coherentes*.

En general los suelos cohesivos son arcillosos, y suelen ser impermeables. Las partículas de arcilla son de dimensiones coloidales, esto es que estas partículas de arcilla son tan pequeñas que la actividad de la superficie de sus granos tiene una influencia apreciable sobre las propiedades de éstas.

En los suelos cohesivos una de las propiedades más importantes es la plasticidad. La plasticidad de un suelo cohesivo, la proporciona la cantidad de partículas de arcilla que éste contiene y se mide por la consistencia, que representa la mayor o menor resistencia que el suelo ofrece a cambiar de forma. Así, la plasticidad, según Whitlow [1994: p.13] es la capacidad que un suelo posee a adquirir o retener una nueva forma cuando éste se moldea.

La consistencia es función del contenido de agua y de los minerales de arcilla que contienen las partículas finas de un suelo. El comportamiento plástico de un suelo con un porcentaje de minerales de arcilla, varía con el contenido de agua en forma directa.

En 1911, Atterberg realizó estudios físicos de los suelos, principalmente para determinar la influencia que tiene el contenido de diversos tipos de arcillas en la permeabilidad de los suelos. Así, propuso una serie de pruebas para averiguar y correlacionar el comportamiento de los suelos por su mayor o menor plasticidad. Estas pruebas fueron perfeccionadas y aplicadas en Mecánica de Suelos, con el nombre de *límites de Atterberg* o *límites de consistencia*. Los límites de consistencia de los suelos cohesivos son índices importantes para la clasificación del suelo y para definir su comportamiento y relacionarlo con las propiedades mecánicas del suelo.

Los límites de consistencia representan los distintos estados que experimenta una muestra de arcilla al perder humedad gradualmente debido a la acción de mezclado de la muestra. Así, el *estado líquido* es aquel en el cual la muestra posee un exceso de agua que

hace que este se comporte como un fluido, al perder agua por evaporación llega al punto en que la muestra puede ser moldeada, comportándose como una masa plástica, designándosele *estado plástico*; el *estado semisólido* se presenta cuando la muestra ha perdido otra fracción de agua dificultándose la acción de moldearla y agrietándose al ser deformada; y al reducirse aún más el contenido de agua, se llega al *estado sólido*, donde una deformación produce una fractura sin plasticidad apreciable.

Entre el estado líquido y el estado plástico, la muestra de arcilla posee un mínimo de esfuerzo cortante para un cierto contenido de agua, es decir, deja de ser francamente un líquido y pasa a ser otro material, el cual se encuentra en estado plástico. El contenido de agua para este punto se denomina como *límite líquido* (LL). De la misma manera existe un contenido de agua, entre el estado plástico y el semisólido, que define el *límite plástico* (LP). También, a la transición entre el estado semisólido y sólido se le denomina *límite de contracción* (LC).

A la diferencia en el contenido de humedad entre el límite líquido y el límite plástico se le denomina *índice de plasticidad* (IP), y representa la variación de humedad que puede tener un suelo que se conserva en estado plástico, además, el índice de plasticidad caracteriza el comportamiento plástico de un suelo e indica su grado de cohesividad, ver tabla 3.5.

Indice de plasticidad	Características del suelo debidas a plasticidad	Tipo de suelo	Cohesividad
0	No plástico	Arena	No cohesivo
7	Baja plasticidad	Limo	Parcialmente cohesivo
7 a 17	Mediana plasticidad	Limo arcilloso Arcilla limosa	Cohesivo
17	Alta plasticidad	Arcilla	Cohesivo

Tabla 3.5 Clasificación de los suelos por su índice de plasticidad [González y Ruiz, 1999: p.41]

3.2.2 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Según González y Ruiz [1999: p.38], la clasificación de los suelos es el complemento lógico de su identificación.

En el origen geológico de los suelos intervienen una gran variedad de factores que actúan simultáneamente o alternadamente con distintos grados de intensidad. Luego, es de

esperar que las propiedades físicas de los suelos varíen en gran medida de un lugar a otro en una misma zona. Esta característica, ha hecho indispensable el desarrollo de sistemas de clasificación. Como se ha mencionado anteriormente existen varios sistemas de clasificación de suelos que permiten catalogar a los suelos en grupos de propiedades físicas semejantes, con el objeto de poderlos identificar y adaptar a diversos fines.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), propuesto originalmente en 1948 por A. Casagrande con el nombre de Sistema de Clasificación de Aeropuertos y modificado posteriormente por el U.S. Army Corps of Engineering y el U.S. Bureau of Reclamation, con el objeto de adaptarlo al uso en caminos. Este sistema de clasificación ofrece una doble ventaja: fácilmente adaptable al campo y al laboratorio; requiriendo poca experiencia y unas cuantas pruebas sencillas para determinar el grupo al cual pertenece un suelo dado. Por tomar en cuenta la granulométria, la graduación y las características de plasticidad, describe a los suelos de tal manera que es fácil asociar a cada grupo de suelo el orden de magnitud de las características mecánicas más importante.

El SUCS, estandarizado por la American Society for Testing and Materials (ASTM), bajo la designación D 2487-93, describe la forma en la cual los suelos son clasificados para propósitos de ingeniería, basándose en: la determinación del tamaño de las partículas del suelo en el laboratorio y en los límites de consistencia.

Este sistema de clasificación divide a los suelos en grupos genéricos a los cuales se les asigna un símbolo, de la siguiente manera:

- Cantos rodados: partículas de roca que son retenidas en la malla de 12 plg.
- Guijarros: partículas de roca que pasan la malla de 12 plg y son retenidas en la malla de 3 plg.
- Gravas (*G*): partículas de roca que pasan la malla de 3 plg y quedan retenidas en la malla N°4, subdividiéndose en gruesas: aquellas partículas que pasan la malla de 3 plg y quedan retenidas en la malla de ¾ de plg, y finas: aquellas partículas que pasan la malla de ¾ de plg y quedan retenidas en la malla N°4.
- Arenas (*S*): partículas de roca que pasan la malla N°4 y son retenidas en la malla N°200, y se subdividen en gruesas: aquellas que pasan la malla N°4 y son retenidas en la malla N°10; medias: aquellas partículas que pasan la malla N°10 y son retenidas por la malla N°40; y finas: aquellas partículas que pasan la malla N°40 y quedan retenidas en la malla N°200.

- Arcillas (*C*): suelo que pasa la malla N°200, que puede exhibir plasticidad dentro de un rango determinado de contenido de agua y exhibe resistencia considerable en estado seco.
- Limos (*M*): suelo que pasa la malla N°200, que no es plástico o tiene muy poca plasticidad y que exhibe poca o ninguna resistencia en estado seco.
- Arcilla orgánica (*O*): arcilla con suficiente contenido orgánico para influir en las propiedades del suelo.
- Limo orgánico (*O*): limo con suficiente contenido orgánico para influir en las propiedades del suelo.
- Turba (*PT*): suelos compuestos por fibras vegetales en varios estados de descomposición, usualmente con olor característico, color café oscuro a negro, consistencia esponjosa y textura que varia entre fibrosa y amorfa.

A los grupos genéricos se les asigna símbolos adicionales dependiendo del tipo de graduación, plasticidad y compresibilidad, según sea el caso; así, los suelos gruesos van acompañados del símbolo W cuando el suelo prácticamente se presenta limpio de finos y está bien graduado, del símbolo P cuando el suelo se presenta limpio de finos y está mal graduado, del símbolo M cuando el suelo presenta una cantidad apreciable de finos no plásticos y del símbolo C cuando el suelo presenta una cantidad apreciable de finos plásticos; los suelos finos van acompañados del símbolo L cuando presentan compresibilidad baja a media y del símbolo H cuando presentan alta compresibilidad. Véase la tabla 3.6.

Hay dos alternativas para clasificar el suelo en el SUCS: en laboratorio por medio de los ensayos de granulometría y límites de consistencia (tabla 3.6), y en el campo de forma visual.

Existe la posibilidad de que la clasificación asignada al suelo se encuentre en el límite de un grupo u otro, para ello se considera un símbolo doble en la clasificación en base al porcentaje de finos presentes en el suelo y a los valores obtenidos de los límites de consistencia, LL e IP, los cuales se grafican en la carta de plasticidad, ver figura 3.3.

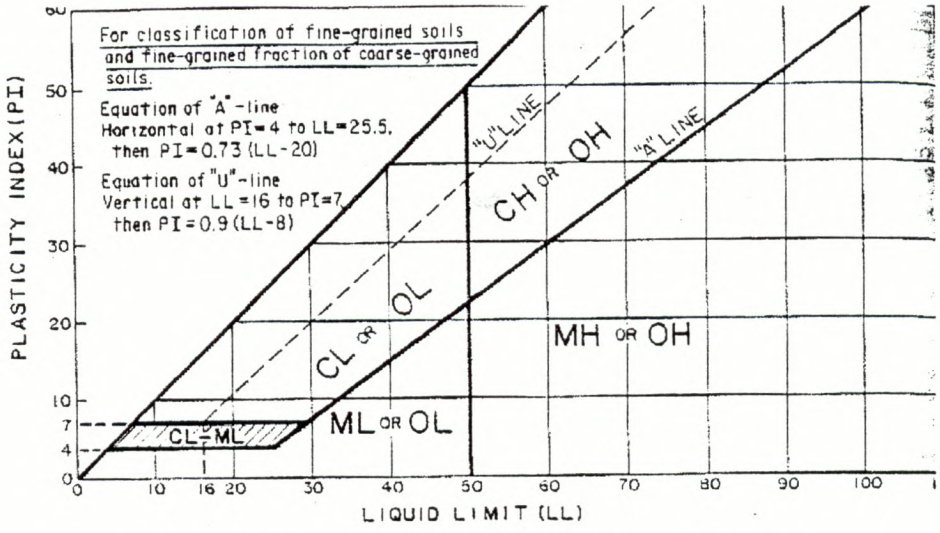


Figura 3.3 Carta de plasticidad [ASTM, 1996: p.212]

Tipo de suelo	Criterio para asignar el símbolo de grupo y el nombre de grupo en laboratorio			Símbolo grupo	Nombre de grupo
Suelos de grano grueso (más del 50% retenido en la malla N°200)	Gravas (más del 50% de la fracción gruesa retenida en la malla N°4)	Gravas limpias (menos de 5% de finos)	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada
			$Cu < 4$ y/o $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada
		Gravas con finos (más del 12% de finos)	Finos clasificados como ML o MH	GM	Grava limosa
			Finos clasificados como CL o CH	GC	Grava arcillosa
	Arenas (50% o más de la fracción gruesa pasa la malla N°4)	Arenas limpias (menos del 5% de finos)	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien graduada
			$Cu < 6$ y/o $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal graduada
		Arena con finos (más del 12% de finos)	Finos clasificados como ML o MH	SM	Arena limosa
			Finos clasificados como CL o CH	SC	Arena arcillosa

Suelos de grano fino (50% o más pasa la malla N°200)	Limos y arcillas (LL < 50%)	Inorgánico	IP > 7 o punto sobre la línea "A"	CL	Arcilla magra
			IP < 4 o punto bajo la línea "A"	ML	Limo
		Orgánico	LL < 0,75	OL	Arcilla orgánica
					Limo orgánico
	Limos y arcillas (LL = 50% o más)	Inorgánico	IP con punto en o sobre la línea "A"	CH	Arcilla grasa
			IP con punto bajo la línea "A"	MH	Limo elástico
		Orgánico	LL < 0,75	OH	Arcilla orgánica
					Limo orgánico
Suelos altamente orgánicos		Materia orgánica. color oscuro y olor		PT	Turba

Tabla 3.6 Cuadro de clasificación del suelo en el laboratorio [ASTM, 1995: p.209]

- Símbolos de frontera: utilizados cuando las propiedades del suelo indican que éste está en la frontera de dos grupos. Los símbolos de ambos grupos se dividen por medio de una pleca, p.e. OL / OH. Además, se debe usar para indicar que las propiedades del suelo que está siendo clasificado no posee un grupo definido, aunque no debe usarse de manera indiscriminada; generalmente se usa cuando se realiza la clasificación en forma visual. Un símbolo de frontera se usa cuando el porcentaje de finos es visualmente estimado entre el 45% y el 55%, p.e. GM / ML. También cuando se estiman porcentajes de arena y grava iguales, p.e. GP / SP. Además, se usa cuando el suelo puede ser una arcilla o un limo, p.e. CL / ML.
- Símbolos duales: utilizados para la clasificación del suelo cuando se estima que un 10% de finos está presente en el suelo clasificado visualmente. También en el caso de que el suelo presente entre el 5% y el 12% de finos determinados por la clasificación realizada en el laboratorio. Además, se requiere un símbolo dual cuando los valores del límite líquido y el índice de plasticidad graficados en la carta de plasticidad caen dentro del área sombreada. El símbolo dual se diferencia del de frontera por el hecho de que los dos grupos involucrados están separados por un guión, p.e. GP-GM.

3.2.3 Clasificación del suelo de forma visual en campo

Los parámetros que se toman en cuenta para describir e identificar el suelo de forma visual según la designación D 2488-93, ASTM [1995: p.218], son los siguientes:

a) Suelos de grano gruesos:

- Angulosidad: se refiere a si el contorno de las partículas del suelo es de los siguientes tipos: angular, semiangular, semiredonda y redonda.
- Forma: forma que presentan las partículas del suelo, asignándoles la categoría de plana cuando la relación ancho-espesor es mayor que 3, elongada cuando la relación largo-ancho es mayor que 3, y plana y elongada cuando cumple con ambas relaciones.
- Color: descripción del color que presenta el suelo.
- Olor: se refiere a que si la muestra del suelo presenta olor característico.
- Condición de humedad: se describe como seco, húmedo o mojado.
- Reacción al ácido clorhídrico: agregando gotas de ácido clorhídrico ocurre una reacción con el carbonato de calcio presente en la muestra, describiéndose esta reacción como fuerte, débil o ninguna.
- Consistencia: se penetra la muestra con la uña del dedo pulgar y se asigna una categoría de muy suave cuando se penetra más de 1 plg, suave cuando se penetra 1 plg, firme cuando se penetra 0,25 plg y duro o muy duro cuando no existe penetración.
- Cementación: se describe como débil, moderada o fuerte, según se desmenuza una muestra bajo la presión de los dedos.
- Estructura: se describe la estructura de los suelos como: estratificado, laminar, fisurado, fracturado, en bloque, cristalino u homogéneo.
- Rango de tamaño de partícula: se describe el rango de tamaño que presentan las partículas del suelo.
- Dureza: se realiza golpeando la partícula con un martillo, y se describe su comportamiento.

b) Suelos de grano fino:

- Resistencia en estado seco: secando la muestra de suelo al aire, al sol o en el horno (60°C), para luego desmenuzarla entre los dedos, se puede medir su resistencia en estado seco como: baja, media, alta o muy alta.

- Dilatancia: humedeciendo una parte de la muestra y formando con ésta una pequeña bola, se realiza una agitación de ésta, en la palma de la mano, asignándole una dilatancia nula, lenta o rápida, según la velocidad con que se presente el agua en la superficie de la bola.
- Tenacidad: como complemento al criterio de dilatancia, se forma un cilindro con una parte de la muestra, parcialmente húmeda, rodándolo hasta llevarlo aproximadamente a 1/8 plg de diámetro; asignándole una descripción de baja, media o alta, según la presión que se realiza al rodarlo.
- Plasticidad: de lo observado en la prueba de tenacidad, se describe la plasticidad basándose en el hecho de que el cilindro se despedace o no, antes de llegar a 1/8 plg; se asigna una plasticidad alta, media, baja o nula.

c) Suelos finos inorgánicos: los suelos finos inorgánicos se identifican basándose en la combinación de resultados obtenidos en la identificación de suelos de grano fino, como se muestra a continuación en la tabla 3.7:

Símbolo	Resistencia en estado seco	Dilatancia	Tenacidad
ML	Ninguna a baja	Lenta a rápida	Baja
CL	Media a alta	Ninguna a lenta	Media
MH	Baja a media	Ninguna a lenta	Baja a media
CH	Alta a muy alta	Ninguna	Alta

Tabla 3.7 identificación de suelos finos inorgánicos [ASTM, 1995: p.224]

d) Suelos finos orgánicos: si el suelo presenta suficientes partículas que influyen en las propiedades de éste, se clasifica como OL u OH, según su compresibilidad.

3.3 Pruebas y equipos

3.3.1 Métodos de exploración del suelo [Peck y Terzaghi, 1980: p.291]

Una investigación del subsuelo conlleva una inspección de tipo geológica de la zona que rodea al área de estudio. Una investigación necesita de la obtención de muestras adecuadamente intactas a través de sondeos rápidos denominados perforaciones exploratorias. Las muestras pueden ser ensayadas con diferente procedimiento: en *laboratorio*, donde se

obtienen las propiedades del suelo; en *campo*, como los de penetración, de corte o los de bombeo, los cuales proporcionan una relación directa relativa a detalles de perfil del suelo y a las propiedades del suelo in situ.

Un recurso adecuado para la obtención de muestras es el de perforación, el cual incluye diferentes procedimientos prácticos: inyección de agua, barreno y perforación rotativa. Para perforaciones menores a los 3 metros es preferible el mecanismo con barreno, mientras que para mayores profundidades los otros dos procedimientos.

Perforaciones.

- Perforaciones a inyección de agua. Este equipo incluye generalmente un caño camisa de 2,5 a 3 pulgadas de diámetro, en trozos de 1,5 o de 3 metros, que sirve de soporte a las paredes de perforación; un peso o martillo para hincar la camisa en el terreno; un trípode para levantar los caños y el peso; y un caño de inyección de una y media pulgada de diámetro en longitudes de 1,5 ó 3 metros, el cual contiene en su extremo superior una cabeza giratoria que une la manguera de la bomba de inyección, y en su extremo inferior posee un barreno de inyección con agujeros que fuerzan el agua que se bombea por su otro extremo.
- Perforación rotativa. Este procedimiento es similar al anterior, con la diferencia que su barra de perforación y su taladro cortante son accionados mecánicamente a medida se avanza en el pozo. El taladro cortante contiene agujeros por donde circula el agua que transporta los trozos de material. Las barras de perforación pueden ser retiradas cada vez que se necesite la sustracción de muestras.
- Perforaciones a barreno. Esta perforación se realiza introduciendo por rotación la punta helicoidal del barreno, el cual sustrae las muestras que se adhieren a él al momento de sustraer el barreno del suelo. Este proceso se repite a medida se va profundizando en la perforación a la vez que se analizan las muestras extraídas.

3.3.2 Ensayo del subsuelo

- Prueba de cono de penetración (CPT), ASTM D3441-86 [Abramson et al, 1996: p.221]. Este se ha usado en EE.UU. desde 1970, y puede ser usado para estimar la capacidad de carga y densidad del suelo. Dentro de los diferentes tipos de conos de penetración resalta una de los más comunes como es el cono Holandes. Este cono posee un ángulo en su punta de 60° y un área proyectada de 10 cm cuadrados. El cono es empujado dentro de la

tierra a una ritmo de 10 a 20 mm por segundo por medio de presión hidráulica a través de un taladro conectado al cono. La resistencia a la penetración es calculada dividiendo la medida de la fuerza entre los 1 000 mm cuadrados de área del cono. Este método contiene mejores resultados de aplicación en arcillas blandas y sedimentos marinos.

- Prueba con penetrómetro de bolsillo [Abramson et al, 1996: p.225]. El uso de éste en el campo permite determinar el esfuerzo de compresión no confinado de una arcilla. El penetrómetro funciona con el empuje manual dentro de los suelos arcillosos hasta una profundidad (aproximadamente 1,3 cm) y presión (toneladas por pie cuadrado) determinada. Ver figura 3.7.
- Prueba de veleta cortante, ASTM D2573-78 [Abramson et al, 1996: p.225]. El procedimiento consiste en empujar una veleta fijada a una varilla hasta el fondo de una perforación previamente realizada, la cual será penetrada hasta una profundidad de 2 pies a partir del fondo de la perforación. Las hojas de la veleta tienen una longitud 2 ó 3 veces mayor que su ancho. Luego se mide el torque requerido para permitir una rotación continua de la veleta el cual revelará el esfuerzo máximo no drenado del suelo. El torque requerido para mantener la rotación después de varios vueltas dará como resultado el esfuerzo último del suelo.
- Prueba torvane [Abramson et al, 1996: p.228]. Este instrumento para prueba de suelos es utilizado para determinar, de forma rápida, el esfuerzo cortante de suelos cohesivos ya sea en campo o en laboratorio. El uso de este aparato es aplicable a las paredes y fondo de las perforaciones realizadas. Básicamente, es de gran utilidad para pruebas superficiales. La aplicación del torvane consiste en empujar un disco dispuesto con pequeñas hojas en su parte inferiores dentro del suelo analizado. Un torque es aplicado al disco al momento de girar el botón con la fuerza de los dedos. El torque resistido por la arcilla entre el área de las hojas y la cara circular inferior del elemento determinarán el esfuerzo cortante de la arcilla o suelo probado. La rapidez de la prueba permite obtener diferentes valores de esfuerzos a variadas profundidades en la dirección del planos de fallas o zonas de debilidad del subsuelo. Antes de presentar un valor definitivo de esfuerzo proporcionado por la prueba torvane es necesario comparar el valor con una correlación de esfuerzos torvane. Ver figura 3.17.
- Dilatómetro [Abramson et al, 1996: p.231]. Este aparato cuenta con una hoja de acero inoxidable de 15 mm de espesor, 96 mm de ancho y 150 mm de largo, una orilla con filo

cortante y una membrana inoxidable de 60 mm de diámetro ubicada en el centro de un lado de la hoja. Esta hoja puede ser agregada a la punta de una varilla perforadora para ser introducida a la tierra con incrementos de 15 a 30 cm. La fuerza requerida para realizar esta penetración provee resultados de gran similitud a las pruebas de CPT_S y SPT_S. La combinación de esta información con correlaciones empíricas pueden proporcionar algunos valores: Ko, coeficiente de presión horizontal de la tierra; OCR; tangente en una dimensión del módulo de compresibilidad. Ver figura 3.18.

- Prueba de permeabilidad en campo [Abramson et al, 1996: p.231]. Esta prueba es aplicable a gravas o arenas, de las cuales es difícil transportar sus muestras sin perturbarlas, hasta un análisis en laboratorio. La constante de permeabilidad, k, pude calcularse del resultado de aumento, disminución o uniformidad de la prueba de cabeceado llevada a cabo en las perforaciones o por piezómetros posicionados en tuberías.

3.3.3 Muestreo del subsuelo

- Tubo Shelby [Fletcher y Smoots, 1978: p.56]. Está construido de acero y puede ser sujetado a un vástago de una barrenadora para introducirse al suelo bajo el fondo del orificio perforado para obtener las muestras. Sus paredes delgadas causan poco desplazamiento de la tierra lo cual permite obtener muestras casi inalteradas. Los tubos introducidos son sellados luego de su extracción para ser trasladados a un laboratorio para su análisis. Las longitudes más comunes de los tubos son de 5 y 6 cm, con espesores de diámetro exterior de calibre 18 a 11 cm.
- Extracción de muestra en bloque [ASTM D 4220-89]. Las muestras en bloque son forjadas y cortadas de forma manual, en cubos desde 30 hasta 75 cm por lado. El bloque es extraído de pozos de prueba con profundidades desde 1,5 m. Estas muestras son preservadas para mantener sus propiedades naturales intactas, siguiendo un determinado procedimiento de empaque y transporte como se describe a continuación:
  - A manera de hermetizar el bloque de suelo, se debe cubrir con una membrana plástica adhesiva o chapa de aluminio y luego cubrirlo con varias capas de parafina; también, se puede sellar con la aplicación de varias capas de lienzos de tela y parafina (al menos 3 capas). Estos materiales se pueden combinar con plástico-parafina-lienzos.
  - Para evitar una ruptura del bloque y pérdida de humedad, el transporte se debe realizar en una caja cúbica de madera construída con plywood de espesor de 13 a 19 mm.

3.3.4 Ensayo y muestreo del subsuelo

- Prueba estándar de penetración de suelos (SPT) [Fletcher y Smoots, 1978: p.53]. Las muestras se obtienen introduciendo en la perforación del suelo un tubo o cucharón de muestreo para extraer una porción representativa de este a la cual se le hará un examen visual con la finalidad de clasificarla. Las muestras destinadas a ensayos de laboratorios serán preservadas en frascos de tapas con rosca. El cucharón de muestreo tiene un espesor de paredes de 6,3 a 6,46 cm, diámetro exterior de 5,08 cm y diámetro interior de 3,48 cm, lo cual causa un remoldeo del suelo a partir de su estado natural convirtiendo las muestras de suelo en alteradas. La longitud mínima del cucharón es de 61 cm y va unido a vástagos de perforación de 1,5 m de largo. El peso de caída es de 140 libras y se ajusta con una varilla de 1,9 cm de diámetro que guía al peso en su caída. Esta prueba de penetración estándar proporciona un índice de dureza o compacidad del suelo (densidad de los suelos), la cual se mide por el número de golpes (N) de un peso de 140 libras que cae a lo largo de 76 cm, necesarios para introducir el cucharón de muestreo 30 cm en el suelo inalterado. El procedimiento completo de esta prueba se describe en la ASTM D1586-92.

3.3.5 Pruebas de campo y ensayos de laboratorio

A continuación se detalla una serie de pruebas de campo y ensayos de laboratorio que son de utilidad para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y rocas, en base a las normas ASTM:

Nombre de la prueba o ensayo	Designación ASTM
Guía para investigación y muestreo de suelos y rocas.	D 420-93
Práctica de muestreo de suelos para análisis del tamaño de la partícula y la determinación de las constantes del suelo.	D 421-93
Método de análisis del tamaño de las partículas de suelo.	D 422-90
Método de prueba para características de compactación del suelo en laboratorio usando esfuerzo estándar.	D 698-91
Método de prueba para gravedad específica del suelo.	D 854-92
Método de prueba para la cantidad de material más fino que la malla N°200.	D 1140-92
Práctica para la investigación y muestreo del suelo.	D 1452-90
Método de prueba para la densidad y el peso unitario del suelo in situ por el método del	D 1556-90

cono de arena.	
Método de prueba para compactación del suelo en laboratorio usando esfuerzos modificados.	D 1557-91
Método de penetración estándar.	D 1586-92
Método para determinar en laboratorio el contenido de fibra de muestras de turba.	D 1997-91
Método de prueba para esfuerzo de compresión no confinado de suelos cohesivos.	D 2166-91
Método de prueba para densidad y peso unitario de suelos in situ por el método del balón de caucho.	D 2167-94
Método de prueba para el contenido de humedad en suelos y rocas.	D 2216-92
Método de prueba para la permeabilidad de suelos granulares.	D 2434-94
Método de prueba para la consolidación unidimensional de suelos.	D 2435-90
Método de prueba para la clasificación del suelo para propósitos de ingeniería.	D 2487-93
Práctica de descripción e identificación de suelos (procedimiento visual-manual).	D 2488-93
Prueba de veleta cortante.	D 2573-78
Método de prueba para esfuerzo a la compresión no consolidado, no drenado de suelos cohesivos en compresión triaxial.	D 2850-87
Método de prueba para la densidad de suelos in situ por el método del cilindro.	D 2937-94
Método de prueba para contenido de humedad, ceniza y materia orgánica de turbas y otros suelos orgánicos.	D 2974-87
Método de prueba para corte directo bajo condiciones consolidadas drenadas.	D 3080-90
Prueba de cono de penetración.	D 3441-86
Práctica para preservar y transportar muestras de suelo.	D 4220-89
Método de prueba para las características dispersas de arcillas por el doble hidrómetro.	D 4221-90
Método de prueba para el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.	D 4318-93
Método de prueba del contenido de carbonato de calcio en suelos.	D 4373-90
Clasificación de muestras de turba en laboratorio.	D 4427-92
Método de prueba de la relación de soporte de suelos in situ	D 4429-93
Método de prueba para la permeabilidad de las rocas por corriente de aire.	D 4525-90
Método de prueba para monitoreo de masas de roca usando inclinómetros.	D 4622-93

Tabla 3.8 Pruebas de campo y ensayos de laboratorio normados por la ASTM [ASTM, 1995]

3.3.6 Descripción de equipos de campo y de laboratorio

3.3.6.1 Soiltest [ELE International, 2001]

- *Penetrómetro de anillo*

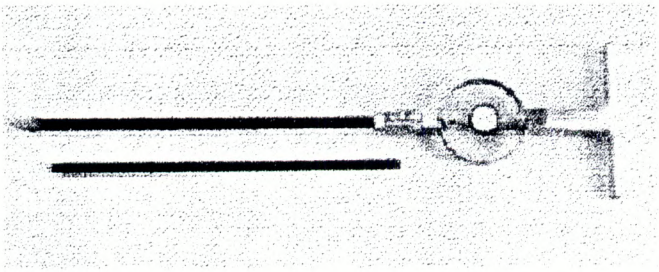


Figura 3.4 Penetrómetro de anillo [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

Consiste en un cono de penetración de 30°, usado para determinar la capacidad de carga y para medir la compactación del suelo. También, sirve para obtener de forma rápida la resistencia a la penetración de un suelo superficial.

- *Penetrómetro de cono*

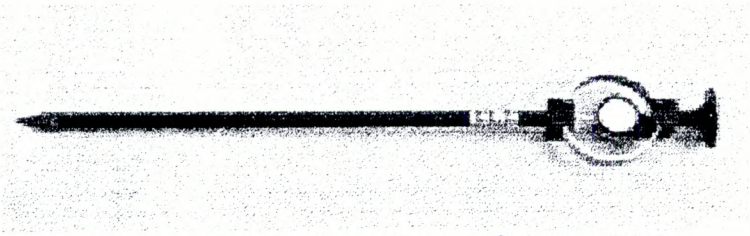


Figura 3.5 Penetrómetro de cono [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

Este penetrómetro es el principal instrumento usado en la evaluación de suelos sujetos a tráfico. Está provisto de un cono de 30°, con un área en la base de ½ plg cuadrada.

- *Penetrómetro proctor (ASTM D 1558-94)*

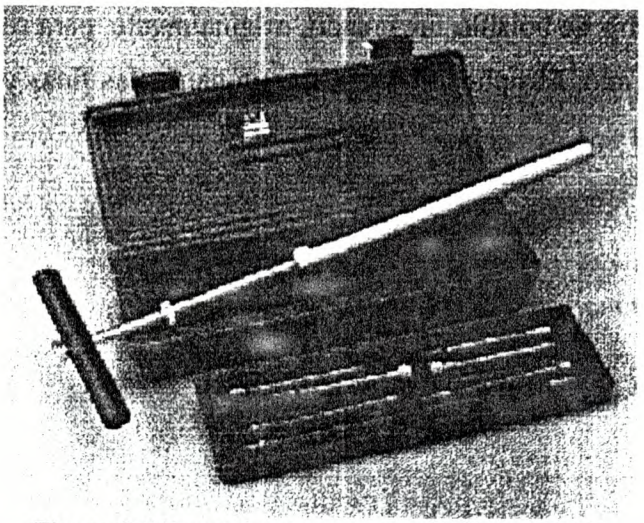


Figura 3.6 Penetrómetro proctor [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

El penetrómetro es usado para determinar la resistencia a la penetración en suelos de granos finos. La unidad consiste en un dinamómetro especialmente calibrado con un indicador de escala de presión. La escala de presión está calibrada hasta 100 libras en subdiviciones de 1 libra.

- *Penetrómetro de bolsillo*

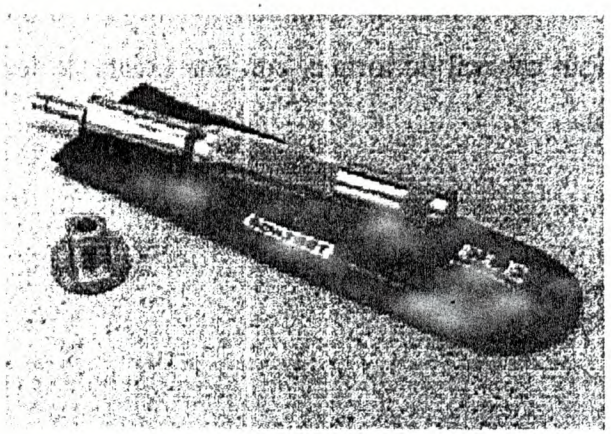


Figura 3.7 Penetrómetro de bolsillo [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

El penetrómetro de bolsillo fue creado, originalmente, para realizar una clasificación visual del suelo en campo. Es aplicable a suelos con partículas finas y la lectura de su escala está relacionada con el tipo de suelo.

- *Tester de veleta de mano*

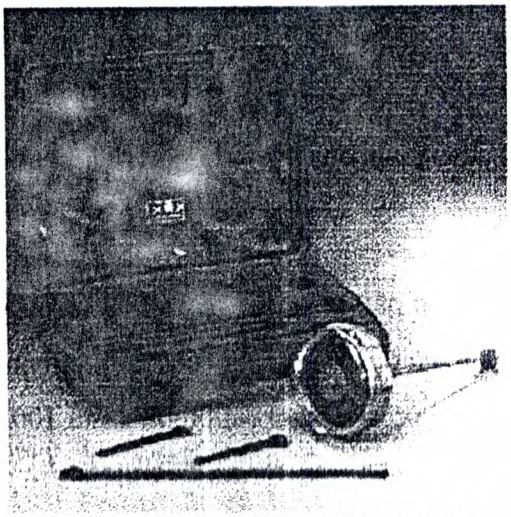


Figura 3.8 Tester de veleta de mano [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

El tester de veleta de mano es un instrumento usado para determinar el esfuerzo cortante in situ de los suelos cohesivos, también, puede ser usado en el laboratorio. El instrumento consiste en un cabezal de torque, con una escala de lectura directa incluida, la cual se gira manualmente.

- *Medidor de volumen eley*

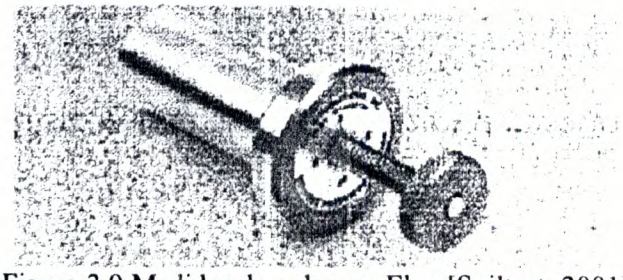


Figura 3.9 Medidor de volumen Eley [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

El medidor de volumen Eley provee una medida rápida de volumen de suelos inalterados para determinar su densidad.

- *Volúmetro (ASTM D 2167-94)*

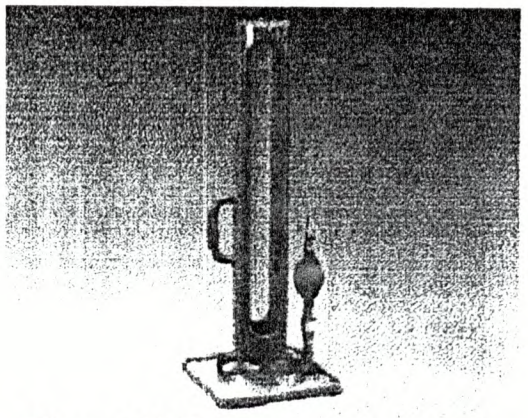


Figura 3.10 Volúmetro [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

El volúmetro es un instrumento que sirve para leer directamente la densidad de los suelos compactados in situ. No requiere de calibración, debido a que las marcas en las paredes del cilindro son usadas como referencia.

- *Cono de arena (ASTM D 1556-90)*

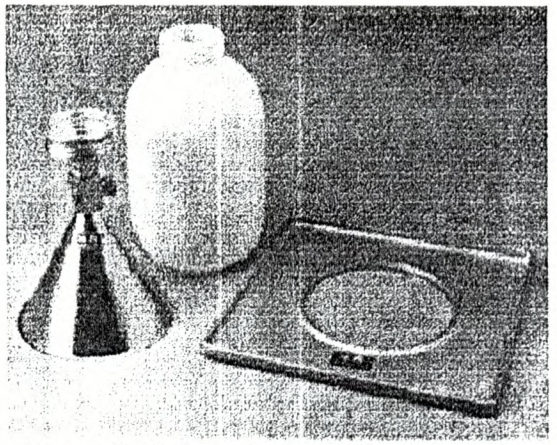


Figura 3.11 Cono de arena [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

El cono de densidad proporciona un metodo práctico para la determinación de la densidad in situ de los suelos.

- *Penetrómetro dinámico portátil*

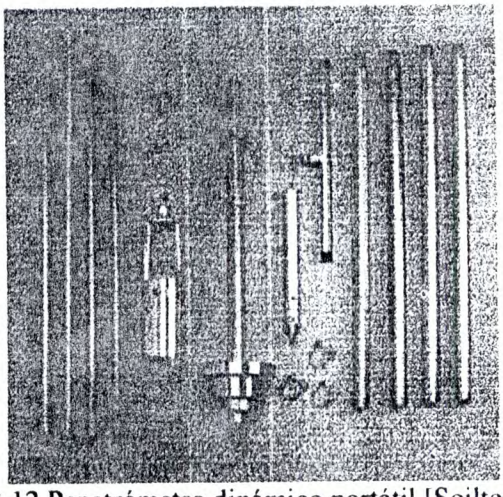


Figura 3.12 Penetrómetro dinámico portátil [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

El penetrómetro dinámico portátil está diseñado para realizar pruebas de penetración para evaluar la consistencia y la densidad del suelo. Se extraen muestras de suelo alteradas por medio de la introducción por pequeños tubos especiales.

- *Agitador mecánico de mallas estándar*

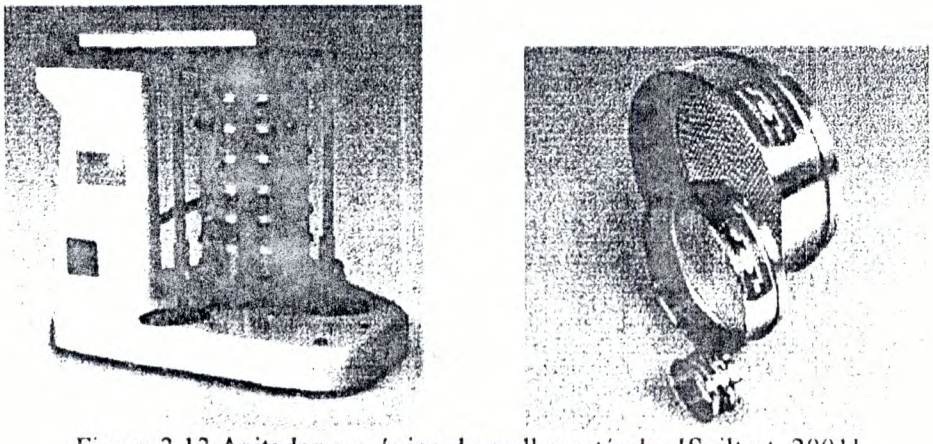


Figura 3.13 Agitador mecánico de mallas estándar [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

El agitador mecánico se utiliza para reproducir un movimiento vertical y circular que sirve para separar las partículas del suelo según su tamaño. Estas partículas se hacen pasar a través de las mallas estándar.

- *Copa de Casagrande motorizada (ASTM D 4318-93)*

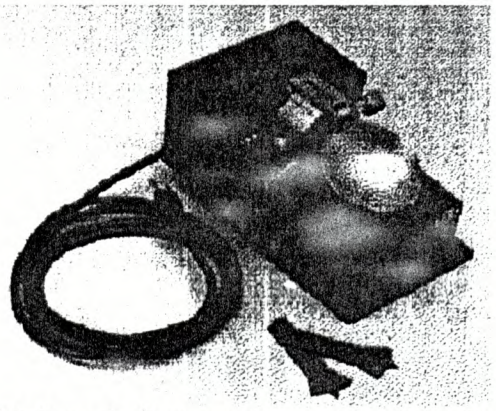


Figura 3.14 Copa de Casagrande motorizada [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

La copa de Casagrande motorizada se usa para obtener los límites de consistencia utilizando un sistema de motor y un contador mecánico.

- *Tensiómetro*

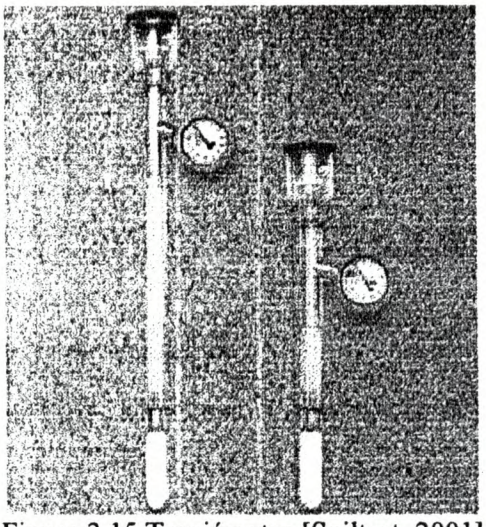


Figura 3.15 Tensiómetro [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

El tensiómetro se usa para medir la humedad del suelo in situ, el mecanismo consiste en inyectar agua dentro del cuerpo del tensiómetro y remover el aire acumulado sin perturbación del suelo.

- *Balanza electrónica portátil*

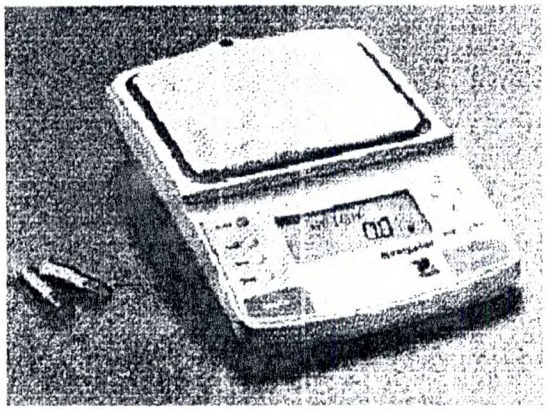


Figura 3.16 Balanza electrónica portátil [Soiltest, 2001]

Descripción y uso

Es de gran utilidad para obtener pesos de muestras in situ, utilizando como fuente de energía batería alcalinas.

- *Prueba Torvane*

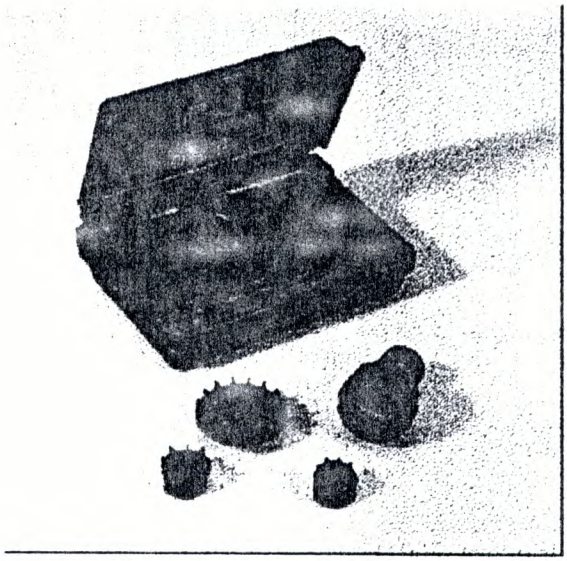


Figura 3.17 Prueba torvane [Abramson et al, 1996]

Dilatómetro

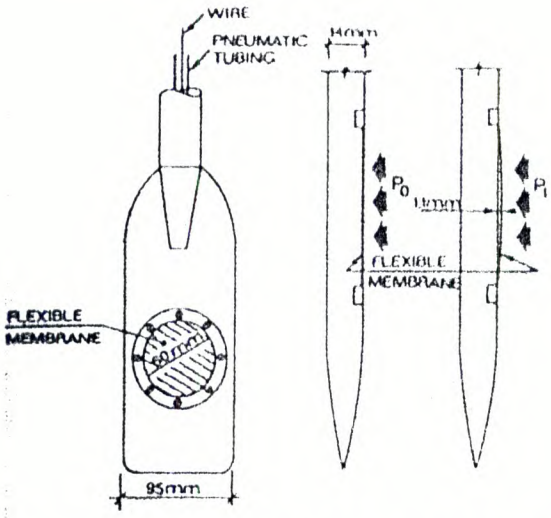


Figura 3.18 Dilatómetro [Abramson et al, 1996]