

TUES  
1501  
A 473c  
1999  
Fj. 2

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
INGENIERIA CIVIL



***EVALUACION DEL PELIGRO SISMICO SECUNDARIO  
PARA PLANEAMIENTO URBANO  
EN EL SALVADOR***

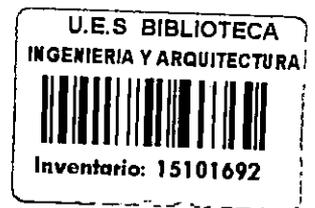
15101692  
15101692

PRESENTADO POR  
***JACQUELINE CAROLINA ALVARADO HERNÁNDEZ  
SUSAN ELIZABETH CAMPOS VILLEGAS  
SONIA JEANNETTE PÉREZ HERNÁNDEZ***

PARA OPTAR AL TITULO DE  
***INGENIERO CIVIL***



CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 1999.-



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

*DR. JOSÉ BENJAMIN LÓPEZ GUILLÉN*

SECRETARIO GENERAL :

*LIC. ENNIO ARTURO LUNA*

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

*ING. JOAQUIN ALBERTO VANEGAS AGUILAR*

SECRETARIO a.i. :

*ING. OSCAR EDUARDO MARROQUIN HERNÁNDEZ*

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

DIRECTOR :

*ING. LUIS RODOLFO NOSIGLIA DURÁN*

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

*Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:*

***INGENIERO CIVIL***

Título :

***EVALUACION DEL PELIGRO SISMICO SECUNDARIO  
PARA PLANEAMIENTO URBANO  
EN EL SALVADOR***

Presentado por :

***JACQUELINE CAROLINA ALVARADO HERNÁNDEZ  
SUSAN ELIZABETH CAMPOS VILLEGAS  
SONIA JEANNETTE PÉREZ HERNÁNDEZ***

*Trabajo de Graduación aprobado por:*

Coordinador :

***ING. JOSÉ RANULFO CÁRCAMO Y CÁRCAMO***

Asesores :

***ING. MANUEL ROBERTO DÍAZ FLORES  
ING. TRÁNSITO ARTURO QUEZADA MUÑOZ***

*San Salvador, Febrero de 1999.*

*Trabajo de Graduación aprobado por:*

*Coordinador :*



*ING. JOSÉ RANULFO CÁRCAMO Y CÁRCAMO*

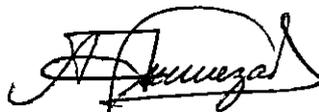
*Asesor :*



*ING. MANUEL ROBERTO DÍAZ FLORES*



*Asesor :*



*ING. TRÁNSITO ARTURO QUEZADA MUÑOZ*

## AGRADECIMIENTOS

Nuestro especial agradecimiento a:

*Ing. José Ranulfo Cárcamo y Cárcamo,  
Coordinador del Trabajo de Graduación.*

*Ing. Manuel Roberto Díaz Flores,  
Asesor externo, Centro de Investigaciones Geotécnicas.*

*Ing. Tránsito Arturo Quezada Muñoz  
Asesor interno, Universidad de El Salvador.*

*P. Leonel Garduño Contreras  
Rector del Instituto Emiliani.*

*Arq. José Nicolás Arteaga Hidalgo,  
Centro de Capacitación Emiliani.*

*Srta. Karen Jeanneth Jovel Reyes y Arq. Gisela Quan de Turcios,  
Departamento de Geomática del Instituto Geográfico Nacional.*

*Ing. Martha Fidias Alvarado Hernández.*

*Arq. María Auxiliadora González Palacios.*

*Ing. Demetrio Escobar e Ing. Douglas Hernández,  
Departamento de Sismología del Centro de Investigaciones Geotécnicas.*

*Javier Palencia y René Campos  
Departamento de Geología del Centro de Investigaciones Geotécnicas.*

*Ing. José Miguel Landaverde  
Departamento de Geotecnia, Escuela de Ingeniería Civil.*

*Srta. Margarita Campos Montes  
Secretaría de la Escuela de Ingeniería Civil.*

De quienes recibimos, para la realización de nuestro trabajo, tiempo, confianza y su valiosa colaboración.

*Jacqueline Alvarado, Sonia Pérez y Susan Campos*

## DEDICATORIA

Esta página la reservo para todos aquellos que quisieron y fueron parte *importante* de mi vida como estudiante de la Universidad de El Salvador:

Mi Papá: *Oscar Roberto Alvarado Zamora*, con su amor, ejemplo, dedicación, confianza, ..., y muchas cosas más que no sabría escribir.

Mi Mamá: *Marta Fidias Hernández de Alvarado*, en cada detalle, en cada palabra, en todo momento, ..., con amor, consejo y entrega incondicional.

Mis Hermanas: *Martha Fidias, Patricia Beatriz y Nancy Evelyn*, compartiendo mis mejores y mis peores momentos, en el momento que las necesité ... siempre.

Mis Sobrinos: *Stephanie Beatriz y José Daniel*, mi fuente de inspiración, que guardaron "silencio" cuando estudiaba y "sonrieron" para mí cada mañana.

Mis Abuelos: *Rosa Emilia Alvarado vda. de Zamora, María Marta Hernández de Estupinián y Vicente Estupunián (Q.D.D.G)*.

Mi Familia: mis tíos *Nohemy, Luis Antonio, July, Paty, Félix, Morena, Amilcar, Reynelda, Aura, Yeny, Ever*; mis primos y demás sobrinos.

Mis amigos: *Sonia*, mi compañera de las buenas y malas; *Beatriz, Irma, Keny, Conchy, Tania*, a todos y cada uno de los niños del *Ministerio de Jóvenes de la Capilla San Lucas...*

La Virgen: *María*, mensajera de hasta mis más pequeños anhelos y necesidades.

Mi Dios y mi Señor: *Jesús el Cristo* fuente de sabiduría y amor, porque aún siendo el último siempre serás el primero.

*Jacqueline Carolina Alvarado Hernández*

## Agradezco a...

*Estas letras las dedico a todas aquellas personas, que me dieron la oportunidad de iniciar y finalizar mi trabajo de graduación.*

### ***Dios Todopoderoso***

*Quien no me desampara en los momentos difíciles y siempre me ilumina hasta culminar mis metas.*

### ***Mi Madre***

*Priscila Villegas, a quien le debo su esfuerzo, abnegación, constancia apoyo, y más..., puesto que siempre estuvo dispuesta a darme su atención y amor. Le dedico todo mi trabajo.*

### ***Mi Hermana Wendy de Alvarado y esposo.***

*Personas a las que les debo su paciencia, apoyo y palabras de ánimo para finalizar este trabajo.*

### ***Mis Sobrinas***

*Wendy María y María Alejandra, a las que quiero mucho y con su dulzura y travesuras, me apoyaron en momentos de cansancio.*

### ***Fredy Orellana***

*A quien le agradezco su ayuda y comprensión en esta etapa de mi vida.*

### ***Mis Compañeros de Trabajo***

*Lesly, Evelio, Ricardo, Ing. Landaverde, Ing. Serrano, Mauricio Valencia, Jorge Flores, Manuel Menjívar, Margarita, Carlos; todos ellos por su paciencia, respaldo y consejos en el camino de la realización de mi trabajo de graduación.*

### ***Mis Compañeras de Trabajo de Graduación.***

*Por su perseverancia y esfuerzo en finalizar este trabajo.*

*Susan Campos.*

## DEDICATORIA

*Ofrezco a mi Padre Dios y a la Santísima Virgen María, este trabajo. Por su amor, por iluminarme con su sabiduría, por no dejarme sola en ningún momento, y bendecirme dejando a mi lado a todas esas personas que son lo más importante, la razón de mi perseverancia y quienes siempre me motivaron a culminar mi carrera:*

*Víctor Manuel y María Dolores, mis padres, quienes incondicionalmente siempre han creído en mi, me han apoyado y me han dado su amor.*

*Sergio, quién siempre me ayuda con sus palabras de ánimo, comprensión y principalmente su amor.*

*Alberto, Ernesto y Jacqueline, mis hermanos, por compartir conmigo la alegría de alcanzar esta meta.*

*Manuel Alberto, Javier Alexander y Ricardo Ernesto, mis sobrinos, quienes con su ternura e inocencia alegran mi vida.*

*Tía July y Paty, por su cariño y atención.*

*Mauxi, mi amiga, quién con su cariño y sus palabras de aliento y ánimo me ayuda siempre.*

*Jacqueline, mi amiga y compañera de tesis, por su cariño, perseverancia y responsabilidad.*

*A todos les agradezco y los quiero mucho.*

*¡ Que Dios los Bendiga ¡*

*Sonia Jeannette.*

# INDICE

INTRODUCCION	i
<b>CAPITULO I GENERALIDADES DEL PROYECTO</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del Problema	2
1.3 Justificaciones	5
1.4 Objetivos	6
1.5 Alcances	7
1.6 Limitaciones	7
<b>CAPITULO II ASPECTOS GEOLÓGICOS FUNDAMENTALES</b>	<b>8</b>
2.1 La Geología y la Ingeniería Civil	8
2.2 Las Rocas: Su Naturaleza y Estructura	9
2.2.1 Las Rocas: Su Naturaleza	9
2.2.1.1 Rocas Igneas	10
2.2.1.2 Rocas Piroclásticas	13
2.2.1.3 Rocas Sedimentarias	15
2.2.1.4 Rocas Metamórficas	18
2.3 Estructuras Geológicas	19
2.3.1 Pliegues	19
2.3.2 Fallamientos	20
2.3.3 Diaclasas o Juntas	23
2.4 Meteorización de las Rocas y Tipos de Meteorización	24
2.4.1 Meteorización Mecánica	25
2.4.2 Meteorización Química	26
2.4.3 Meteorización Biológica	27
2.5 Suelos Transportados y Suelos Residuales	28

2.5.1	Suelos Transportados	28
2.5.1.1	Formación de los Suelos Transportados	28
2.5.1.2	Transporte de los suelos	28
2.5.1.3	Tipos de Depósitos	29
2.5.2	Suelos Residuales	30
CAPITULO III ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SISMOS		33
3.1	La Teoría de La Tectónica de Placas	33
3.2	La Teoría del Rebote Elástico	36
3.3	Ondas Sísmicas	39
3.3.1	Tipos de Ondas Sísmicas	39
3.3.2	Propagación de las Ondas Sísmicas	41
3.3.3	Registro de Las Ondas Sísmicas	42
3.3.3.1	Amplitud Y Frecuencia	42
3.3.3.2	Duración de un Movimiento Fuerte	44
3.4	Localización de los Sismos	44
3.4.1	Foco y Epicentro	44
3.4.2	Profundidad del Foco	45
3.5	Parámetros de Magnitud e Intensidad	46
3.5.1	Magnitud y Escalas de Magnitud	46
3.5.2	Intensidad y Escala de Intensidad	48
3.6	Parámetro de Aceleración	51
3.6.1	Aceleración de un Sismo	51
3.6.2	Acelerogramas	51
3.6.3	Atenuación de la Aceleración	52
3.7	Causas Principales de los Sismos	52
3.7.1	Tipos de Terremotos	53
3.8	Consecuencias de Los Terremotos	53

CAPITULO IV	PELIGROSIDAD SISMICA	56
4.1	Amenaza o Peligrosidad Sísmica y Riesgo Sísmico	56
4.2	Peligrosidad Sísmica en Términos de Movimientos Fuertes	57
4.2.1	Métodos Determinísticos y Probabilísticos	58
4.2.2	Peligrosidad en Fuentes Sismogénicas	64
4.3	Peligrosidad Sísmica Secundaria	64
4.3.1	Fenómenos Sísmicos Secundarios	65
4.3.1.1	Amplificación del Movimiento del Terreno	65
4.3.1.2	Deslizamientos de Tierra	68
4.3.1.3	Licuefacción	71
4.3.1.4	Tsunamis	75
4.3.1.5	Ruptura o Falla del Terreno	78
CAPITULO V	MARCO GEOLÓGICO Y ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE EL SALVADOR	81
5.1	Geología de El Salvador	81
5.1.1	Explicación Técnica del Mapa Geológico de El Salvador	84
5.1.2	Características de las Unidades Geológicas de El Salvador	86
5.1.2.1	Formación Todos Santos	87
5.1.2.2	Formación Yojoa	87
5.1.2.3	Formación Valle de los Angeles	88
5.1.2.4	Formación Morazán	88
5.1.2.5	Rocas Intrusivas	89
5.1.2.6	Formación Chalatenango	89
5.1.2.7	Formación Bálsamo	90
5.1.2.8	Formación Cuscatlán	91
5.1.2.9	Formación San Salvador	94
5.2	Zonás Sismológicas de El Salvador	97
5.2.1	Configuración Tectónica de la Región	99
5.2.2	Trabajos de Sismicidad en El Salvador	100

CAPITULO VI	EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO SECUNDARIO EN BASE A MAPAS TEMÁTICOS DE SUSCEPTIBILIDAD	107
6.1	Simplificación del Mapa Geológico de El Salvador	108
6.1.1	Características de la Clasificación Geológica Ingenieril	110
6.1.2	Metodología de Elaboración del Mapa Geológico Simplificado	114
6.2	Mapas de Susceptibilidad a Fenómenos Sísmicos Secundarios	116
6.2.1	Mapas Derivados del Mapa Geológico Simplificado	116
6.2.1.1	Mapa de Susceptibilidad a la Amplificación del Movimiento del Terreno	117
6.2.1.2	Mapa de Susceptibilidad a Licuefacción	118
6.2.2	Mapa de Susceptibilidad a los Deslizamientos de Tierra	122
6.2.2.1	Determinación "A Priori" de la Amenaza de Deslizamientos, Utilizando Indicadores Morfodinámicos	123
6.2.2.2	Adaptación del Método Mora & Vahrson para El Salvador	128
CAPITULO VII	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	148
7.1	Conclusiones	148
7.2	Recomendaciones	153
	BIBLIOGRAFÍA	155
	ANEXOS	159

## INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1	Los deslizamientos de suelo, muestran un sistema principal de agua potable roto. Deslizamiento desarrollado en tierra blanca poco consolidada	3
Fig. 1.2	Deslizamientos de suelo en rellenos artificiales, paredes de retención a un lado de la acera y el camino	4
Fig. 2.1	Nomenclatura de pliegues, las flechas, van desde las capas más antiguas (A) a las más modernas (M).	20
Fig. 2.2	Ubicación de ángulos y características que definen la geometría y el mecanismo de una falla.	21

Fig. 2.3	Falla Horizontal, conocida como falla Lateral, Falla Transcurrente o de Desgarre	22
Fig. 2.4	Fallas Verticales, a) Falla Normal, b) Falla Inversa	22
Fig. 2.5	Perfil Hipotético de Horizontes del Suelo	31
Fig. 3.1	Continentes y placas litosféricas.	34
Fig. 3.2	Formación y subducción de la litosfera.	35
Fig. 3.3	Mecanismo del Rebote Elástico.	38
Fig. 3.4	Ondas Internas o de Cuerpo	40
Fig. 3.5	Ondas de Superficie	41
Fig. 3.6	Reflexión y refracción de las ondas sísmicas en la superficie terrestre y en los límites entre estratos de roca.	42
Fig. 3.7	Registro de ondas sísmicas.	43
Fig. 3.8	Plano de falla y propagación de la ruptura a partir del foco.	45
Fig. 3.9	Nomograma para obtener amplitud de onda de un sismo	47
Fig. 4.1	Mapas de Peligrosidad Sísmica para El Salvador	62
Fig. 4.2	El Salvador: Zonificación sísmica 1994 .	63
Fig. 4.3	Registro que muestra el efecto de Amplificación.	66
Fig. 4.4	Efecto de la Amplificación de acuerdo a condiciones topográficas.	67
Fig. 4.5	Efecto de la Licuefacción en suelos granulares.	71
Fig. 4.6	Relación empírica entre magnitud y máxima distancia desde la falla a sitios de licuefacción	74
Fig. 4.7	Dos formas comunes en que se origina un Tsunami.	75
Fig. 4.8	Fallas Horizontales.	79
Fig. 5.1	Limites de las estructuras y principales fallas que conforman la tectónica de la región.	99
Fig. 5.2	Delimitación geométrica de fuentes sismogénicas.	103
Fig. 5.3	Delimitación geométrica de fuentes sismogénicas.	104
Fig. 5.4	Mapa de Isoaceleración en El Salvador para una vida útil de 50 años y una probabilidad de excedencia del 10%.	105
Fig. 5.5	Delimitación de fuentes sismogénicas, para zona de subducción profunda (ZPB) e intermedia (ZIB), usada por Singh	106
Fig. 5.6	Delimitación de fuentes sismogénicas, para zona de subducción superficial (ZBS), cadena volcánica (CV), fallas Chixoy-polochic, Motagua y Jocotán-Chamelecón (CH-P, M, J-CH), depresión de honduras (DH), usada por Singh	106

## INDICE DE TABLAS

Tabla I	Clasificación de las Rocas Piroclásticas.	15
Tabla II	Influencia de la Forma de Transporte Sobre las Características de los Sedimentos	29
Tabla III	Horizontes del suelo	32
Tabla IV	Duración de la Fase Intensa del Movimiento del Terreno	44
Tabla V	Escala de Intensidades Sísmicas Mercalli Modificada (1931)	50
Tabla VI	Pérdidas económicas directas ocasionadas por terremotos, 1972-1990	55
Tabla VII	Grupos del Mapa de Amplificación del Movimiento del Terreno	118
Tabla VIII	Grupos del Mapa de Licuefacción	120
Tabla IX	Calificación del factor de Relieve Relativo del terreno (Rr)	124
Tabla X	Calificación del factor litología del terreno (L), valorando la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas	125
Tabla XI	Categorización de los valores acumulados de precipitación promedio mensual	126
Tabla XII	Calificación del factor Humedad del terreno (H)	126
Tabla XIII	Calificación del factor Sismicidad (S)	127
Tabla XIV	Calificación del factor Lluvias del terreno (Ll)	127
Tabla XV	Clasificación de la Amenaza de Deslizamiento	128
Tabla XVI	Consideraciones realizadas con los cuadrantes topográficos, en la Revisión de Relieve Relativo.	131
Tabla XVII	Determinación del Parámetro Litológico para El Salvador	134
Tabla XVIII	Determinación del Parámetro Sísmico para El Salvador	140
Tabla XIX	Resumen de la Revisión – Mapa de Deslizamientos de Tierra	142

## INDICE DE MAPAS

Mapa N° 1	Mapa Geológico Simplificado	115
Mapa N° 2	Mapa de Susceptibilidad a la Amplificación del Movimiento del Terreno	119
Mapa N° 3	Mapa de Susceptibilidad a Licuefacción	121

Mapa N°	4	Mapa de Humedad del Terreno	136
Mapa N°	5	Mapa de Intensidades de Lluvia	138
Mapa N°	6	Mapa de Isoaceleraciones Máximas del Terreno (en Gal) para un periodo de retorno de 100 años	139
Mapa N°	7	Mapa de Susceptibilidad a los Deslizamientos de Tierra.	141

## INTRODUCCIÓN

En el intento por prevenir y mitigar los daños ocasionados por fenómenos naturales, que afectan la superficie de la tierra como son los terremotos o sismos, la Ingeniería se preocupa por analizar los efectos que desde cualquier punto de vista y derivados de ellos afectan las obras civiles, estudiando los efectos asociados directamente con la perturbación generada por las ondas sísmicas (efectos primarios) y los efectos secundarios que se relacionan con las características geológicas del lugar y otras variables morfodinámicas.

Con el fin de recopilar la información más importante de los factores que intervienen en el desarrollo de los fenómenos derivados de un sismo, se mencionan en el capítulo I los motivos que justifican la realización de este estudio; como marco teórico, en el capítulo II y III, se definen aspectos geológicos fundamentales, las características y el origen de los sismos. Los conceptos de Amenaza o Peligrosidad son presentados en el capítulo IV, donde además se definen en detalle los elementos o fenómenos de peligrosidad sísmica secundaria, como amplificación de las ondas sísmicas, deslizamientos, licuefacción, tsunamis y ruptura del terreno.

Para definir las características geológicas y sísmicas propias de nuestro país se presenta en el capítulo V el Marco Geológico y Zonificación Sísmica de El Salvador y finalmente se evalúa la peligrosidad sísmica secundaria en base a mapas temáticos de susceptibilidad, los cuales se presentan en el capítulo VI impresos desde un archivo en formato digital.

Considerando que las características geológicas de un sitio son determinantes en los efectos locales se retoma la información proporcionada en el mapa geológico de El Salvador, para elaborar el Mapa Geológico Simplificado, con unidades de mayor importancia para los usos ingenieriles, a partir del cual se obtienen los mapas de susceptibilidad a licuefacción y amplificación del movimiento del terreno.

Dentro del proceso de evaluación, se incluye también el Mapa de Susceptibilidad a los Deslizamientos de Tierra, que además de la litología del país, considera la influencia de la actividad sísmica y factores de carácter topográfico y climatológico.

Los mapas son herramientas que posteriormente al igual que en países desarrollados, podrán servir de referencia para el planeamiento de obras de ingeniería, en manuales con criterios de diseño e incorporarse a otros estudios, pues cada uno delimita zonas de mayor y menor tendencia a sufrir el fenómeno que representan, a la hora de un sismo.

## CAPITULO I

### GENERALIDADES DEL PROYECTO

#### **1.1 Antecedentes**

A partir de la década de los 90's, denominada como la Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales por las Naciones Unidas, se inician las actividades del Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC), bajo el emblema "La reducción de desastres naturales en Centroamérica: Prevención y Mitigación del Riesgo Sísmico"; coordinando a los cinco países de América Central y Panamá para la definición de la amenaza sísmica, con el apoyo de la Agencia Sueca de Desarrollo Internacional (ASDI) y países como Dinamarca, Suecia y Noruega, desarrollando desde 1991 estudios sobre sismicidad, actividad volcánica, deslizamientos de tierra e inundaciones.

Además la Administración Británica del Desarrollo Extranjero (British Overseas Development Administration, ODA) desarrolló, de octubre de 1992 a marzo de 1995, un proyecto titulado "Evaluación de Peligrosidad Sísmica Secundaria para Planificación Urbana" que utiliza una metodología asociada con el desarrollo de políticas y procedimientos para integrar información técnica de la amenaza geológica por efectos secundarios provocada por terremotos, tales como: Licuefacción, Amplificación del Movimiento del terreno, Tsunamis o Maremotos y Ruptura del Terreno.

Recientemente se realizaron trabajos en el proyecto "Evaluación de Peligrosidad Sísmica Secundaria para Planificación Urbana" en Costa Rica y China con la colaboración de la Comisión Nacional de Emergencia en Costa Rica y el Instituto para la Investigación Geotécnica y Topográfica en China.

Para el trabajo en Costa Rica se elaboró inicialmente el Mapa Geológico Simplificado o de Usos Ingenieriles, que agrupa los diferentes tipos de rocas (unidades geológicas) en seis grupos, el cual fue reclasificado para obtener el Mapa de Licuefacción y el Mapa de Amplificación del Movimiento del Terreno.

Además se elaboró el Mapa de Amenaza de Deslizamientos, utilizando indicadores morfodinámicos detallados en un método desarrollado en Costa Rica por Mora & Vahrson.

Una propuesta de trabajo similar fue presentada para El Salvador por un grupo de geólogos y geofísicos del Servicio Geológico Británico en una visita a nuestro país; la cual provee la metodología para elaborar una colección de mapas de evaluación de susceptibilidad de la amenaza sísmica secundaria.

El Centro de Investigaciones Geotécnicas de El Salvador retomó el método Mora & Vahrson para crear el Mapa de Amenaza al Deslizamiento de Tierras como parte complementaria del Proyecto propuesto por los Británicos.

En Panamá, bajo la misma necesidad de conocer las áreas más susceptibles a los deslizamientos, se implementó una metodología, presentada por el Dr. Luis D. Alfaro, para la zonificación de áreas por amenaza de deslizamientos; cuyo punto de partida fue el modelo presentado por Mora & Vahrson; modificado de tal forma que considera otro importante factor como es la actividad humana (Así por ejemplo, los derrumbes en el canal de Panamá son el resultado de la construcción del mismo).

## **1.2 Planteamiento Del Problema**

Actualmente en nuestro país, la planificación de obras civiles, no considera la amenaza de desastre natural debido a los efectos secundarios de un sismo, lo que ocasiona además de pérdidas humanas, grandes inversiones en la "limpieza" del desorden después de un desastre.

La problemática radica en que no se tiene un conocimiento total de los mecanismos o fenómenos que son la actual causa de desastres, ni se conoce con precisión cuales son las zonas propensas a sufrir mayores daños.

Según investigaciones de campo realizadas en la ciudad de San Salvador después del terremoto de 1986, no se observó evidencia de efectos secundarios como *licuefacción* debido a la profundidad del nivel freático bajo San Salvador, a excepción de pequeñas áreas cuyo nivel freático se localiza cercano a la superficie. Por otro lado el alto grado de destrucción se atribuye en gran parte a los gruesos depósitos de toba pobremente consolidada cercanos a la superficie, que podrían haber ocasionado una fuerte

*amplificación de la aceleración del terreno.* Los depósitos de toba que constituyen una sección superior a los 30 metros bajo la ciudad de San Salvador, fueron además un factor importante en el desarrollo de *deslizamientos de tierra* que abarcan un área aproximada de al menos 200 km<sup>2</sup>, sin considerar los deslizamientos de origen dudoso en el área cubierta a 4 km. del lago de Ilopango, los cuales pudieron ser producto de las fuertes lluvias previas al sismo. Comparando el volumen aproximado de los deslizamientos durante el terremoto de 1986 con sismos de igual magnitud, se puede establecer lo significativamente mayores y más destructivos que fueron los deslizamientos en San Salvador.

Algunas imágenes que reflejan los daños ocasionados por deslizamientos en el terremoto de 1986 se muestran en las figuras 1.1 y 1.2



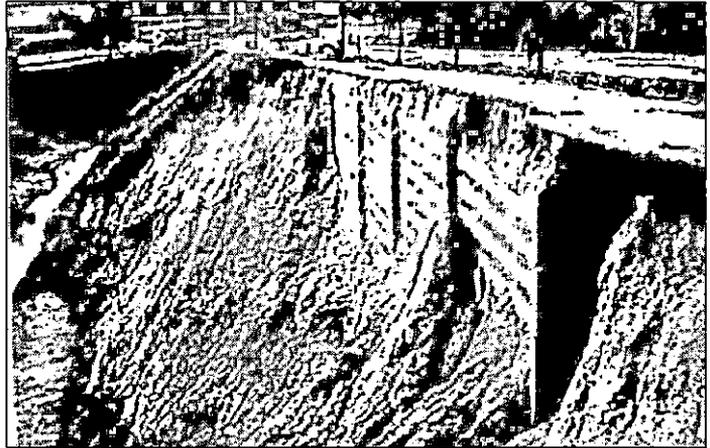
Fig. 1.1 Los deslizamientos de suelo, muestran un sistema principal de agua potable roto. Deslizamiento desarrollado en tierra blanca poco consolidada.

Como un aporte a la solución de estos problemas se aplicó una metodología que ha permitido elaborar una serie de mapas de zonificación de susceptibilidad al peligro sísmico secundario, con el fin de que puedan ser utilizados para la realización de diversos proyectos o estudios en nuestro país, por proyectistas del desarrollo urbano, ingenieros civiles, arquitectos, organismos de emergencia, etc.

El punto de partida del proyecto se establece en el actual Mapa Geológico de El Salvador,

elaborado en los años de 1967 a 1977 por la Misión Geológica Alemana, en cuyo estudio se definió 26 unidades geológicas.

Fig. 1.2 Deslizamientos de suelo en rellenos artificiales, paredes de retención a un lado de la acera y el camino.



Los diferentes tipos de roca que constituyen la geología del país fueron reclasificados en seis grupos de importancia para la Ingeniería con características y edades en común. Esta nueva agrupación conforma el Mapa Geológico Simplificado o Mapa de usos ingenieriles; a partir del cual se elaboraron los mapas de susceptibilidad a la amplificación del movimiento del terreno y a licuefacción, que son fenómenos cuya presencia depende directamente de la geología del lugar.

Los grupos del mapa Geológico Simplificado serán los siguientes:

1. Qal Aluvión Cuaternario
2. Qa Manglares Cuaternarios y sectores inundables
3. Vc Suelos Volcánicos Cuaternarios
4. Vt Suelos Volcánicos Terciarios
5. Sr Rocas Suaves
6. Hr Rocas Duras

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad a la Amplificación del Movimiento del Terreno se reagrupó el mapa geológico simplificado en cuatro unidades que representan la respuesta de cada zona a la amplificación de las ondas sísmicas determinándolas como zonas de alta, media, baja y muy baja susceptibilidad respectivamente.

De forma similar se elaboró el mapa de licuefacción, transformando el mapa de usos ingenieriles a un mapa con tres unidades que representan la Alta, Intermedia y Baja susceptibilidad a licuefacción según el caso.

En colaboración con el Centro de Investigaciones Geotécnicas de El Salvador se elaboró el Mapa de Susceptibilidad a deslizamientos de tierra, cuya metodología de elaboración se adaptó del método propuesto por Mora & Vahrson, el cual incluye los factores de susceptibilidad intrínsecos en el comportamiento del terreno (litología, humedad del suelo y relieve del terreno); y los factores de disparo que inducen a partir de las condiciones de susceptibilidad a un específico comportamiento dinámico (intensidad sísmica y de lluvias)

### **1.3 Justificaciones**

Los terremotos figuran entre los fenómenos más destructivos de la naturaleza, que afectan la superficie de la tierra, cobrando al mismo tiempo, la vida de muchas personas; lo que hace que su estudio sea de mucha importancia en la ingeniería.

Los daños que podrían sufrir las estructuras apoyadas en los suelos con susceptibilidad a riesgo sísmico secundario durante un temblor se pueden comprobar fácilmente, puesto que los registros de daños producidos por los terremotos contienen infinidad de ejemplos como los ilustrados en las figuras 1.1 y 1.2.

Los terremotos afectan inevitablemente las obras de ingeniería y por tanto ocasionan grandes pérdidas, esto hace con frecuencia que las actividades del ingeniero pasen a ser parte vital de operaciones de auxilio y reparación; operaciones que la historia ha demostrado, absorben el mayor gasto en relación con los desastres naturales; dinero que se desvía muchas veces de fondos asignados originalmente a planes de desarrollo, lo que provoca el estancamiento de los países. En pocas palabras, puede decirse que los desastres naturales frenan el desarrollo.

Reconociendo que el riesgo asociado con los terremotos, está entre las causas principales de desastres en Centroamérica y a fin de desarrollar estrategias que reduzcan el impacto del repetitivo ciclo de "Destrucción-Reconstrucción", se establece la necesidad de generar el presente proyecto como parte de

un plan de prevención y mitigación del riesgo sísmico, que de a conocer en su totalidad las características de los mecanismos e impactos de la peligrosidad.

## **1.4 Objetivos**

### **Objetivo General:**

Evaluar el peligro derivado de fenómenos sísmicos; para la creación de herramientas que puedan utilizarse en la planificación de obras civiles, con adecuada seguridad respecto a fenómenos secundarios como lo son:

- a) Amplificación del Movimiento del Terreno,
- b) Deslizamientos de Tierra y
- c) Licuefacción.

### **Objetivos Específicos:**

- ◆ Interpretar la clasificación actual de las zonas sismológicas y geológicas en el país, para formar grupos simplificados con propiedades geológicas y geotécnicas similares, que determinen la respuesta del suelo a los disturbios sísmicos.
- ◆ Simplificar el mapa geológico actual, formando así el Mapa de Usos Ingenieriles basándose en los grupos geológicos previamente definidos.
- ◆ Evaluar la amenaza geológica derivada de un sismo, delimitando las zonas de alta, media, baja o muy baja susceptibilidad a la ocurrencia de los fenómenos secundarios en nuestro interés.
- ◆ Elaborar mapas de susceptibilidad al peligro sísmico secundario (Amplificación del movimiento del terreno y licuefacción), basándose en la zonificación definida en el mapa de usos ingenieriles.
- ◆ Revisar el Mapa de Susceptibilidad a los Deslizamientos de Tierra previamente realizado en el Centro de Investigaciones Geotécnicas de El Salvador, introduciendo nuevas variables para establecer una información más objetiva y confiable.

## **1.5 Alcances**

En el desarrollo de la investigación, se consideran únicamente los peligros relacionados directamente con el mapa geológico simplificado como son: Amplificación del Movimiento del Terreno y Licuefacción. Por otra parte se finalizó el proyecto de evaluación de la amenaza de Deslizamientos de Tierras.

Los mapas elaborados en el presente trabajo, delimitan las diferentes zonas de susceptibilidad al peligro de los fenómenos mencionados, en toda el área nacional.

Cuando se habla de peligrosidad sísmica secundaria, podrían considerarse también fenómenos como la ruptura del terreno y la inundación por maremotos (Tsunami), cuya evaluación podrá incluirse en estudios posteriores.

El resultado final de esta investigación no busca sustituir los estudios geotécnicos de detalle en el campo, a la hora de definir los parámetros finales de un problema de inestabilidad en particular; es decir, no se pretende alcanzar de golpe un diagnóstico definitivo de las condiciones del lugar.

## **1.6 Limitaciones**

Básicamente la bibliografía a disposición para una investigación de este tipo es muy escasa; puesto que cuando se habla de peligrosidad sísmica, por lo general, se habla únicamente de la peligrosidad asociada directamente a las ondas sísmicas (fenómenos primarios) y poco de fenómenos secundarios, además mucha bibliografía es de décadas pasadas y aplicadas a condiciones de otros países.

Por otro lado, en nuestro país no siempre es posible contar con información detallada y precisa de todos los factores necesarios para establecer con precisión cuantitativa y estadística, los parámetros que se involucran en el análisis. Tal es el caso de los cuadrantes topográficos y geológicos que no se encuentran en una misma escala, lo que induce en algunos casos a errores significativos cuando se integra la información contenida en ellos.

## CAPITULO II

### ASPECTOS GEOLOGICOS FUNDAMENTALES

#### **2.1 *La Geología y la Ingeniería Civil.***

Todas y cada una de las ramas de la Ingeniería Civil se relacionan, en alguna forma con la superficie de la tierra; ya que toda obra diseñada esta cimentada o localizada sobre la superficie de la corteza terrestre. Cualquier descripción de una estructura de Ingeniería que no considere las condiciones del lecho de cimentación u otros datos geológicos pertinentes, equivale a presentar un proyecto de un puente sin mencionar la carga que se empleo en el diseño, ni los materiales de la obra.

La relación de la Geología con la Ingeniería es evidente e íntima, y hoy en día se reconoce la vital importancia de la Geología entre los que la practican, aún cuando algunos ingenieros estimen que la Geología es solo un simple instrumento para determinar la causa de algunos de los mayores problemas que ocurren durante o después de las operaciones de construcción. El hecho de que las características geológicas pudieran tener algo que ver con las fallas de una obra de ingeniería sugiere, con bastante claridad, la conveniencia de estudiar los rasgos geológicos al iniciar un proyecto de construcción.

La Geología no sólo ofrece este servicio constructivo para evitar posibles problemas futuros, sino también puede sugerir nuevas alternativas de solución a los problemas de la Ingeniería y proporcionar información de utilidad y de valor económico aún en los trabajos preliminares. La Geología presta un servicio a la Ingeniería Civil cuya aplicación es menos evidente a la hora de darle solución a los problemas específicos del Ingeniero. Por ejemplo, en el caso de los problemas de construcción, al Ingeniero Geólogo compete establecer las posibles dificultades, y el Ingeniero Civil, se abocará a superarlas; en el caso de los materiales de construcción es el Ingeniero Geólogo quién deberá establecer donde se pueden encontrar y el Ingeniero Civil quien decidirá como utilizarlos.

El Ingeniero Civil debe capacitarse, hasta lograr una adecuada comprensión del contenido y la interrelación entre las diferentes ramas de la Geología, concentrando su atención en aquellos temas de la Geología cuyas aplicaciones son de especial importancia en la práctica de la Ingeniería Civil. Para ello es

útil el estudio de mapas y secciones geológicas, además del estudio de las experiencias de aplicación de esta ciencia a los problemas en la práctica real de la Ingeniería.

En conclusión el geólogo dedicado a la Ingeniería Civil debe ser pesimista consumado, y analizar las condiciones tal como las encuentra; pero el Ingeniero será el que considere como las condiciones existentes pueden cambiarse de modo que sirvan para un cierto fin. La responsabilidad final de las decisiones deberá caer siempre en el ingeniero; aún cuando estas se basen en la objetiva información del Geólogo.

La información geológica disponible al comienzo de un trabajo será útil realmente sólo si se le compara constantemente con las condiciones geológicas reales como surgen durante la construcción, de modo que éstas sean incorporadas al proyecto.

## **2.2 Las Rocas: Su Naturaleza y Estructura**

### **2.2.1 Las Rocas: Su Naturaleza**

Los minerales son los elementos básicos de la corteza de la tierra, sus agregados comprenden rocas y suelos que se clasifican principalmente por su composición química. Cada especie mineral tiene características físicas y químicas propias, que permiten que se les identifique, por ejemplo: la forma del cristal, el peso específico, color, dureza, fractura, etc. Conocer los minerales más comunes es útil para la identificación de varios tipos de rocas.

En general, la clasificación de una roca se establece a partir de la composición y relaciones geométricas de sus minerales<sup>1</sup>, uniéndose a ellos las características de origen, forma y estructura del yacimiento, y relaciones con otras rocas, etc. Así tenemos, que la composición mineral de las rocas es de importancia para el ingeniero dentro de las aplicaciones en las obras de ingeniería.

Las rocas se pueden dividir en tres grupos principales:

- a) Igneas

---

<sup>1</sup> Existen unas 2,000 clases aisladas y distintas de minerales, pero sólo unas pocas son parte importante para la clasificación de las rocas que al Ingeniero civil le interesa investigar.

- b) Sedimentarias y
- c) Metamórficas

### 2.2.1.1 Rocas Igneas

Las rocas ígneas (del latín “igneus”: fuego o ardiente) se formaron por el enfriamiento de material en fusión llamado magma, que fue arrojado o atrapado debajo de la corteza terrestre, es decir que se enfriaron lentamente en las capas profundas de la tierra, contando con el tiempo necesario para formar grandes cristales, a diferencia de aquellas formadas en (o cerca de) la superficie, dónde el rápido enfriamiento y cristalización sólo permitieron la formación de cristales muy pequeños. Estos cristales se pueden observar cuando la roca se estudia bajo el microscopio.

Las rocas ígneas se clasifican a su vez en:

1. **Extrusivas:** aquellas arrojadas a la superficie de la tierra. El principal producto de la acción volcánica es un flujo de lava, emitido desde dentro de la tierra como corriente en fusión que fluye sobre la superficie del terreno hasta que se solidifica. Las rocas extrusivas se distinguen por la textura de grano fino (Rocas afaníticas) y el “cocido” de cualquier estrato de roca que cubren. Si una violenta erupción volcánica ocurre, algunos materiales serán arrojados con expulsiones de gases, dentro de la atmósfera, donde se enfrían rápidamente y con el tiempo caen a la superficie como ceniza volcánica y polvo.
2. **Intrusivas:** grandes masas de roca que no se han enfriado en contacto con la atmósfera, sino que a cierta profundidad en el interior de la corteza. Las rocas intrusivas, que enfrían y solidifican bajo presión y a grandes profundidades y que contienen gases atrapados, son de textura cristalina, ya que las condiciones de enfriamiento propician la formación de cristales. Se presentan en masas de gran extensión y con frecuencia llegan a profundidades desconocidas. Aunque formadas a gran profundidad del subsuelo, en la actualidad están expuestas por los movimientos de la tierra y los procesos de erosión.

3. **Hipoabisales:** Otro grupo de rocas ígneas, de menor importancia, lo constituyen las ígneas hipoabisales, las cuales ocupan una posición intermedia entre las rocas extrusivas y las intrusivas. Entre las más importantes se encuentran los diques, que son grandes rellenos tabulares en la corteza de la tierra que corta los planos normales de estratificación, y los mantos, que son grandes láminas intrusionadas dentro de otras formaciones paralelas a su estructura.

Los análisis químicos de las rocas ígneas muestran que están compuestas principalmente de nueve elementos: silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio, potasio, hidrógeno y oxígeno. Estos se presentan en combinación, generalmente como silicatos, óxidos e hidróxidos. Es por eso, que la composición química de las rocas ígneas es otro criterio para clasificarlas, y se basa principalmente en el contenido de sílice y de otros minerales determinados.

Existen cuatro grupos para clasificar las rocas ígneas, según su composición química, éstos son:

- a) *Ácido:* Si además de combinarse con el magnesio, hierro, calcio, sodio y potasio; hay una cantidad de  $\text{SiO}_2 > 66\%$  para combinarse con otros elementos, y formar así cristales de cuarzo, la roca se clasifica como ácida. Las rocas ácidas presentan además una coloración clara.
- b) *Intermedio:* Cuando existe  $55\% < \text{SiO}_2 < 66\%$  para combinarse con el magnesio, hierro, calcio, sodio, y potasio; y estará compuesta principalmente de feldespatos y algunos minerales ferromagnesianos primordialmente hornblenda.
- c) *Básico:* Las rocas ígneas básicas contienen más magnesio y hierro y un porcentaje de  $45\% < \text{SiO}_2 < 55\%$ , pero éste puede estar presente en una cantidad mayor de la que se requiere para combinarse con otros elementos. Por su composición mineralógica éstas presentan una coloración oscura.
- d) *Ultrabásico:* Las rocas ultrabásicas, contienen menos del  $45\%^2$  de  $\text{SiO}_2$  y los minerales que las forman tienen un bajo contenido del mismo.

Algunos ejemplos de rocas ígneas son los siguientes:

- i. El *granito:* Roca ígnea ácida de grano grueso, compuesto por cuarzo (10 a 25%), feldespato (60 a 80%), mica (2 a 5%) y algunos otros componentes secundarios. Este se forma por la cristalización

<sup>2</sup> Fuente: J.C. Harvey 1994, "Geología para Ingenieros Geotécnicos".

lenta del magma, debajo de las cadenas montañosas que se encuentran en proceso de elevación ocasionado por los intensos movimientos de la corteza terrestre y el manto superior.

- ii. *Diorita*: Es una roca ígnea intermedia de grano grueso, compuesta principalmente de feldespato blanco, feldespato Na-K y plagioclasa, así como hornblenda, que es un mineral ferromagnesiano de color verde. Es un tipo de roca de transición entre el *granito* ácido y la dolerita básica; se convierte a dolerita cuando contiene mayor cantidad de calcio, magnesio o hierro.
- iii. *Andesita*: La andesita, es una roca ígnea común, producto del vulcanismo y recibe su nombre de la cordillera de los Andes en América del Sur. Tiene básicamente la misma composición química que la *diorita*, pero es de grano fino y puede contener cristales bien formados y rectangulares de plagioclasa, de más de 3 mm de largo.
- iv. *Basalto*: Esta es una roca ígnea del grupo denominado básico, por el alto contenido de magnesio, calcio o sodio en su composición química, en comparación con la de las rocas ígneas ácidas. El basalto es de grano fino (menos de 0.05 mm).
- v. *Riolita*: Estas son rocas de igual composición que el *granito* pero de origen extrusivo, el nombre alude a la estructura fluidal muy frecuente en esta roca. Casi siempre son porfídicas y de color claro. Estas rocas pueden ser verdaderos vidrios naturales, que reciben diferentes nombres según su aspecto: *obsidianas* vidrios naturales anhidros, en general negras, de fractura astillosa con bordes cortantes; *pómez* o *pumita*, vidrios ligeros, muy esponjosos, de color casi siempre muy claro, etc.
- vi. *Dacita*: Esta roca ácida, es de la misma familia de la *cuarzodiorita*, en la que los fenocristales (grandes cristales formados en un lento proceso primario de enfriamiento) resaltan sobre una pasta vítrea. Generalmente presentan vacuolas ocupadas por minerales secundarios.

En cuanto a la estructuración de las rocas ígneas tenemos posiciones verticales llamadas diques, semejantes a un muro, con dimensiones muy variadas hasta centenares de kilómetros de longitud y decenas de kilómetros de ancho. Los diques se han formado por la intrusión de magma en grandes fracturas de la corteza terrestre. Existen también estructuras ígneas predominantemente horizontales, llamadas diquestratos, pero no hay un ángulo definido bajo el cual un dique se convierte en diquestrato.

La importancia de estas estructuras radica para el ingeniero en la posibilidad de que haya cambios repentinos en las propiedades de las rocas y que al final influirían en la resistencia de éstas.

### 2.2.1.2 Rocas Piroclásticas

La textura clástica (fragmentada) es asociada especialmente a las rocas sedimentarias; sin embargo las rocas volcánicas también pueden ser clásticas. Algunas veces las rocas clásticas son el producto del retrabajo de las rocas volcánicas al entrar en contacto con corrientes volcánicas. Los depósitos están compuestos principalmente de fragmentos redondeados a subangulares, que pueden variar de canto rodado a granos del tamaño de una arcilla. Tales rocas son difíciles de clasificar; pero desde el momento que se asocian al volcanismo, pueden asociarse simplemente como rocas volcánicas de textura clástica.

Las rocas Clásticas formadas como el resultado directo del volcanismo se denominan en su mayoría como Rocas Piroclásticas (palabra griega que significa: fuego y quebrado) que las diferencia de las rocas sedimentarias normales y enfatiza el origen de las mismas. Las rocas piroclásticas se forman del material volcánico lanzado a la atmósfera durante la descarga explosiva de la parte superior del conducto o chimenea volcánica; dejando escapar violentamente gases que fragmentan el material fluido, lanzándolo a gran altura. La mayoría de los piroclastos caen todavía calientes cerca de la boca eruptiva donde se acumulan y sueldan formando el cono volcánico. Otros fragmentos son expulsados a mayor distancia, o son arrastrados por los vientos dominantes. Estas se caracterizan y consisten principalmente de rocas cristalinas volcánicas, vidrio volcánico y fenocristales (asociados a dos ciclos de enfriamiento, tal vez a una temprana fase de enfriamiento lento durante las que se forman dichos cristales, con caras bien formadas, llegando a un tamaño relativamente grande, seguidos por una tardía y más rápida fase de enfriamiento donde se forma la masa de grano fino, para la formación de las rocas porfíricas). Todo material expulsado explosivamente es denominado Piroclástico o Tefra.

Los piroclastos de proyección aérea se clasifican según su tamaño y composición:

- a) *Lapilli*: (palabra italiana que significa: piedras pequeñas) Son piroclastos de composición basáltica

de pequeño tamaño (0.2 – 6.4 cm.), y la roca compuesta principalmente por este material es llamada *Toba Lapilli*.

- b) *Cenizas*: piroclastos que no alcanzan los 2 mm de diámetro.
- c) *Bombas*: fragmentos lávicos denominados generalmente escoria consistentes en grandes y pequeños grumos incandescentes de lava líquida, que se enfrían y consolidan en su mayoría antes de caer. Algunos son de forma alargada; pero en su mayoría toman formas redondeadas al girar en el aire. Muchos tienen una corteza de unos pocos centímetros de grosor, algunas veces con el frente aplastado debido al impacto con la superficie de la tierra, indicando que la bomba no solidificó completamente durante su trayectoria. Las bombas volcánicas enfrían rápidamente y por ello son usualmente de textura afanítica a vídriosa; ellas pueden tener cualquier composición química.
- d) *Pómez*: piroclastos muy ligeros, porosos y de color claro que corresponden a magmas de composición ácida.

Los depósitos de material piroclástico se denominan genéricamente *tobas* o *aglomerados*, con apelativos que aluden a su homogeneidad y grado de cementación o soldadura.

Generalmente las bombas son tan pesadas que no pueden volar lejos de la abertura y caen la mayoría de veces en las faldas del volcán. Los depósitos de bombas, lapilli y ceniza, en una mezcla irregular con una estratificación imperfecta son llamados *Aglomerados Volcánicos* o algunas veces *Brechas volcánicas*. Si predominan las cenizas se les denomina *Tobas Brechas*. El término Brecha volcánica se aplica a cualquier capa de roca volcánica en que los fragmentos sean angulares.

El lapilli y la ceniza pueden elevarse sobre el cono en erupción, y subsecuentemente caer en las faldas del mismo, en el caso de la ceniza, esta puede ser llevada por los vientos dominantes hasta unos 1000 km de distancia. La ceniza que es llevada por el aire y que cae después a la tierra para formar depósitos estratificados se le conoce como *Ceniza de caída* la cual se consolida en una Toba. Esta roca de textura fina, es compuesta de partícula de pómez, fragmentos de vidrio volcánico y fenocristales - usualmente de feldespatos de potasio, cuarzo, anfíboles y biotita - y pequeños clastos angulares de rocas volcánicas desprendidos de la garganta del volcán durante la erupción.

Los volcanes altamente explosivos que expulsan grandes cantidades de ceniza son usualmente aquellos de composición ácida a intermedia.

Si las cenizas se encuentran extremadamente calientes cuando se depositan se forma lo que sería una Toba consolidada de flujo de ceniza, una roca densa y fuerte, con bandas paralelas a la superficie del flujo fácilmente visibles. Estos depósitos se asientan y compactan bajo su propio peso y solidifican después de caer en reposo.

Otros depósitos se componen, alternadamente de fragmentos subangulares, subredondeados a redondeados, variando en tamaño de cantos rodados a aluvión y arcilla. Tales depósitos son el resultado de procesos sedimentarios, que actúan en las laderas del volcán. Los materiales piroclásticos acumulados en la parte superior del cono volcánico en estado relativamente inestable e intercalados con flujos de lava que son particularmente susceptibles a los deslizamientos y a la erosión, pueden saturarse por la lluvia (que podría caer como resultado directo de la actividad volcánica) y fluir por las laderas del volcán, por el efecto de la gravedad, como una gran masa de lodo a la cual se le aplica el término indonés de **Lahar**.

Por otro lado si los piroclastos se someten a la erosión y a la transportación se les denomina *Epiclastitas*.

La tabla I presenta una clasificación de las rocas piroclásticas basándose en el tamaño y forma de los granos.

TABLA I  
Clasificación de las Rocas Piroclásticas

Tamaño del grano	No consolidadas	Consolidadas
Mayor de 64 mm	Bombas, bloques	Aglomerados, brechas
De 2 a 64 mm	Lapilli, escoria, pómez.	Toba de lapilli
Menor de 2 mm	Cenizas gruesa o polvo volcánico	Toba lítica, toba cristalina, toba vítrea

### 2.2.1.3 Rocas Sedimentarias

Este grupo de rocas bien podría considerarse de rocas secundarias, porque en general resultan del intemperismo y desintegración de las masas de roca ya existentes.

La distribución de las rocas sedimentarias sobre una amplia área en todo el mundo, es resultado de los grandes movimientos de tierra que han tenido lugar en eras geológicas pasadas. Estos movimientos están demostrados por la existencia de los depósitos marinos (restos de conchas fósiles) en sitios ahora muy elevados.

El proceso de formación de las rocas sedimentarias puede ser:

- a) Mecánico
- b) Químico
- c) Orgánico

Los procesos mecánicos que llevan a la formación de la roca son: la acción del viento, hielo, lluvia, nieve y los cambios diarios de temperatura; todos se pueden clasificar como influencia de intemperismo y contribuyen a la formación de la superficie del suelo, roca detrítica y depósitos finos de material lavado y polvo arrastrado por el viento (por ejemplo: polvo de ladrillo y loess, así como algunos tipos especiales de arcilla).

El intemperismo físico y el químico, actúan juntos pero con diferente fuerza relativa en diferentes circunstancias, desintegran la roca en fragmentos y soluciones químicas. Los fragmentos forman los sedimentos clásticos (grava, arena, limo y arcilla) mientras que las soluciones son acarreadas de modo imperceptible en el agua superficial o subterránea. El agua en las áreas tropicales, es el agente más eficaz para erosionar, transportar y depositar sedimentos.

Todos estos tipos de depósitos, cuando están sometidos a grandes presiones, y posiblemente la acción de agentes químicos y calor, se transformarán en rocas como la arenisca. Otro factor que es importante mencionar en el proceso de litificación son los cementantes más comunes como son la sílice ( $\text{SiO}_2$ ), el óxido de Hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).

Las rocas sedimentarias pueden clasificarse además como *Clásticas* y *no Clásticas*. Dentro de las rocas Clásticas se establecen tres clases en función del tamaño del grano: a) *Ruditás* (clastos mayores de 2mm), b) *Arenitas* (clastos mayores de 1/16mm y menores de 2mm) y c) *Lutitas* (clastos menores de

1/16mm). Dentro de las rocas no Clásticas, se hace otra subdivisión a partir de su composición, de forma que reflejen a su vez las condiciones que las originaron.

Algunos ejemplos de rocas sedimentarias son los siguientes:

- i. *El conglomerado y la brecha:* Son dos variedades de rocas sedimentarias de grano grueso (ruditas). Se componen de grava (> 2 mm) cementada por material de grano fino como arcilla, lodo, arena. El nombre de estas rocas depende de la forma de los clastos: los redondos se presentan en los conglomerados y los angulosos en las brechas. Estas rocas se forman por la acción de la erosión y la sedimentación.
- ii. *La arenisca:* Es una forma endurecida de la arena. Se compone de granos de cuarzo, mica y fragmentos de rocas de grano fino, cuyo tamaño varía de 60 µm a 2 mm. El depósito se forma del material de rocas intemperizadas llevado por los ríos a los mares o lagos.
- iii. *La caliza:* Está compuesta principalmente por  $\text{CaCO}_3$  y una cantidad menor de otros minerales como: arcilla, cuarzo, dolomita, sulfuros u óxidos de hierro, carbón, asfalto y, con mucha frecuencia conchas de animales como: caracoles, almejas, estrellas de mar, etc. Debido a los muy diversos minerales que pueden estar presentes en las calizas, existen muchas variedades de estas rocas: la caliza argílica (arcilla), la caliza arenácea (arena), la caliza de conchas, la caliza dolomítica y la caliza oolítica, por ejemplo.
- iv. *Lignitos:* Formados en un proceso orgánico, originados por la lenta combustión de vegetales, realizada fuera de la acción de la atmósfera. Es a menudo leñoso, de color pardo, poco brillante. Arde con facilidad, desprendiendo un olor desagradable.
- v. *Diatomitas:* Rocas sedimentarias de origen orgánico, formadas de restos de algas unicelulares opalinas llamadas Diatomeas, las cuales son acuáticas (de agua dulce o agua salada), diminutas y prolíficas. Se caracterizan por su peso muy liviano.

#### 2.2.1.4 Rocas Metamórficas.

Las rocas metamórficas (del griego meta: “entre”, “que denota cambio” y morphe: “forma”), son rocas que han cambiado de algún modo su forma original ígnea o sedimentaria.

Las rocas metamórficas se forman a partir de otras clases de roca por la acción del calor y la presión, por separado o actuando en forma simultánea. Es así como son múltiples los agentes que han ayudado a cambiar las rocas sedimentarias e ígneas en tipos de rocas metamórficas. Los principales son los intensos esfuerzos y tensiones ejercidos en las rocas por fuertes movimientos de tierra y por el excesivo calor resultado del enfriamiento de las rocas intrusivas o de la penetración de vapores y líquidos.

Existen dos grupos de rocas metamórficas:

- A. **Foliadas:** Se caracterizan porque los materiales no se distribuyen al azar, sino que presentan determinada orientación y algunas veces se separan en grupos de diferentes clases, formando bandas contrastantes; buen ejemplo es el gneiss donde se alternan bandas de cuarzo, con otras de feldespato de color claro y mica oscura.
- B. **Masivas o no foliadas:** Son rocas con una textura en donde los minerales están orientados al azar, a diferencia de las rocas formadas por presiones cortantes por haber sido sometidas a campos de presión uniforme.

Las rocas metamórficas tienen una composición química y mineral similar a la de varias clases de rocas ígneas, pero los minerales están distribuidos según ciertos patrones que dan la clave para distinguir las rocas metamórficas de las ígneas. Sin embargo, la composición química de la roca no se altera durante el proceso de metamorfismo, pero los elementos se vuelven a combinar de manera distinta para formar nuevos minerales y, a menudo, al aplicar presiones muy altas a la roca, ésta reduce su volumen.

Algunos ejemplos de rocas metamórficas son:

- i. **Pizarra:** Por lo general es de color gris, y se originan de arcillas antiguas depositadas en el fondo del mar.

- ii. *Mármol*: Originado de la caliza, coloreado con gran diversidad de tonos y matices, compactas y cristalinas.
- iii. *Hornfels*: Roca granuda de grano fino a medio producida por metamorfismo de contacto.

## 2.3 Estructuras Geológicas

La corteza terrestre esta constituida por una gran diversidad de estructuras geológicas, las cuales varían desde estructuras de grandes dimensiones como, por ejemplo, una placa continental o una cuenca oceánica, hasta elementos pequeños como un plano de estratificación en un fragmento de roca que pueda sostenerse en la mano. Las estructuras principales están compuestas por un conjunto de otras pequeñas, las cuales han sido formadas por los procesos de sedimentación, intrusión magmática, deriva continental, así como por el ascenso y descenso del nivel de la superficie terrestre en diferentes lugares. Las estructuras pueden tener limites bien definidos entre sí o pueden pasar gradualmente de un tipo a otro.

Algunas de las estructuras geológicas de mayor interés para la ingeniería, pueden ser: Pliegues, Diaclasas o juntas y Fallas.

### 2.3.1 Pliegues

El término pliegue se usa para describir la configuración de cualquier superficie no plana resultante de una deformación dúctil de las rocas.

El plegamiento es tal vez el rasgo estructural más simple, ya que básicamente consiste de la formación de pliegues regulares simples. Las estructuras plegadas se deben a la compresión dentro de la corteza terrestre generada por el movimiento lateral de los continentes por esfuerzos que van de ligeros hasta muy fuertes, siendo el plegamiento una de las causas de las discontinuidades en las rocas.

Los pliegues se clasifican en:

- A. *Antiforme*: Un pliegue cuyos flancos convergen hacia arriba, es decir todos los planos axiales del pliegue son paralelos entre sí como los de la figura 2.1 a y b.
- B. *Siniforme*: Un pliegue cuyos flancos convergen hacia abajo como en la figura 2.1 c y d.

De acuerdo a la orientación estratigráfica los pliegues se establecen como:

1. **Anticlinal:** Pliegues cuyos estratos más viejos están en el núcleo del pliegue como se muestra en la figura 2.1 a y d.
2. **Sinclinal:** Pliegues cuyos estratos más modernos están en el núcleo (Ver figuras 2.1 b y c)

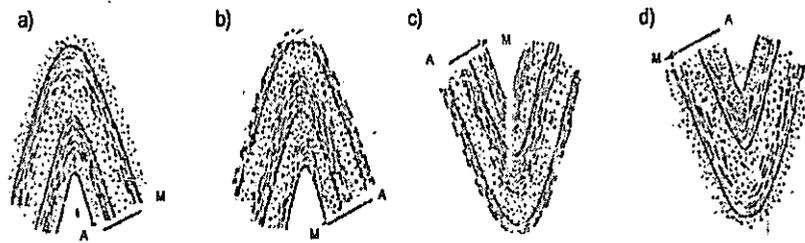


Fig.2.1 Nomenclatura de pliegues, las flechas, van desde las capas más antiguas (A) a las más modernas (M). a) Anticlinal antiforme, b) Sinclinal antiforme, c) Sinclinal sinforme, d) Anticlinal sinforme.

El análisis de los modelos de fracturamiento y plegamiento de las rocas permite a los especialistas en Geología estructural deducir la historia del plegamiento de las rocas en una región. Esto generalmente indica que el proceso no ha sido un evento único en el tiempo, sino que ha ocurrido una serie de movimientos espaciados y con frecuencia, en diferentes direcciones.

### 2.3.2 Fallamientos

Cuando la corteza terrestre está sujeta a grandes presiones, soporta esfuerzos cortantes además de la compresión directa. Si los esfuerzos cortantes así inducidos se vuelven excesivos resultará una falla.

La falla como fuente de un sismo, es generalmente una superficie irregular, pero se puede considerar que se representa por un plano buzante cuyo movimiento produce el terremoto, las fallas están casi siempre inclinadas con respecto a la vertical; conociéndose como *bloque de techo* a la parte superior y como *bloque de piso* a la parte inferior. La roca a un lado o ambos de la falla esta desplazada en lo que se llama *Brecha de falla* que son fragmentos de roca finamente fracturados y retenidos en contacto tan estrecho que a primera vista parece ser una masa sólida.

El plano de falla se define con tres ángulos:  $\phi, \delta, \lambda$ , tal como se muestran en la figura 2.2.

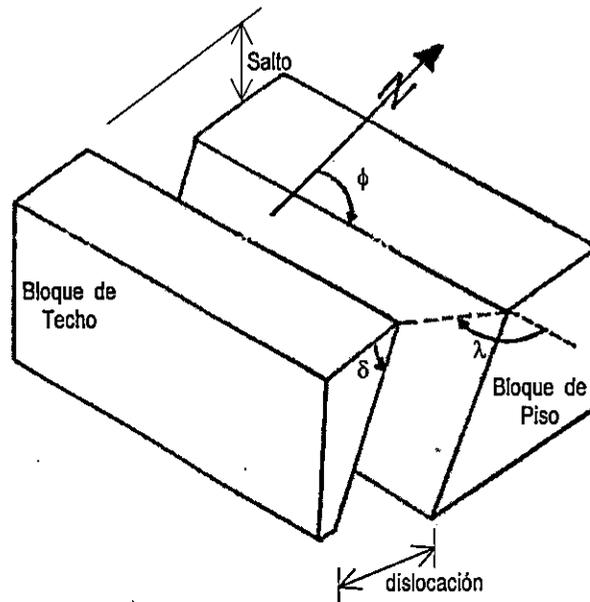


Fig. 2.2 Ubicación de ángulos y características que definen la geometría y el mecanismo de una falla.

Donde:

- $\phi$ : Azimut de la traza o la línea de ruptura de la superficie, que es el ángulo medido en sentido horario desde el norte de tal manera que mirando a lo largo de la traza, el plano de falla desciende hacia la derecha.
- $\delta$ : Buzamiento, es el ángulo agudo de máxima inclinación del plano de la falla medido desde la horizontal.
- $\lambda$ : Angulo que da el sentido del deslizamiento del bloque; medido sobre el plano de la falla desde la horizontal en dirección del azimut, con el sentido positivo hacia arriba.
- Salto: Desplazamiento vertical
- Dislocación: Desplazamiento lateral

El desplazamiento de la roca se conoce como *el rechazo de la falla* y este puede ser horizontal, vertical, lateral o combinado. Dependiendo del sentido del deslizamiento se definen tres grupos fundamentales de fallas:

- A. **Falla Horizontal:** Cuando el desplazamiento es horizontal y los dos bloques adyacentes se desplazan lateralmente en sentidos opuestos. Se conoce también como Falla Transcurrente, Lateral o de Desgarre (figura 2.3). Una falla horizontal puede clasificarse según el movimiento relativo en

dos tipos:

1. *Falla de Rumbo Dextral*: El bloque opuesto se desplaza hacia la derecha
2. *Falla de Rumbo Sinistral*: El bloque opuesto se desplaza hacia la izquierda.

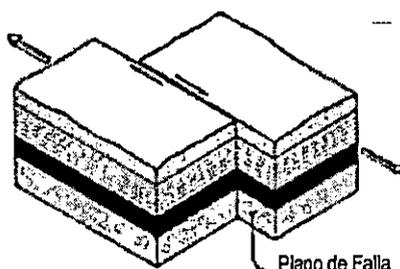


Fig. 2.3 Falla Horizontal, conocida como falla Lateral, Falla Transcurrente o de Desgarre

B. *Falla vertical*: El desplazamiento es en dirección del buzamiento, estas se clasifican según el sentido del desplazamiento en dos tipos:

1. *Falla Normal*: Se presenta cuando el bloque superior se ha movido hacia abajo y el bloque inferior hacia arriba. en la falla normal los bloques están sometidos a fuerzas de tensión (figura 2.4a).

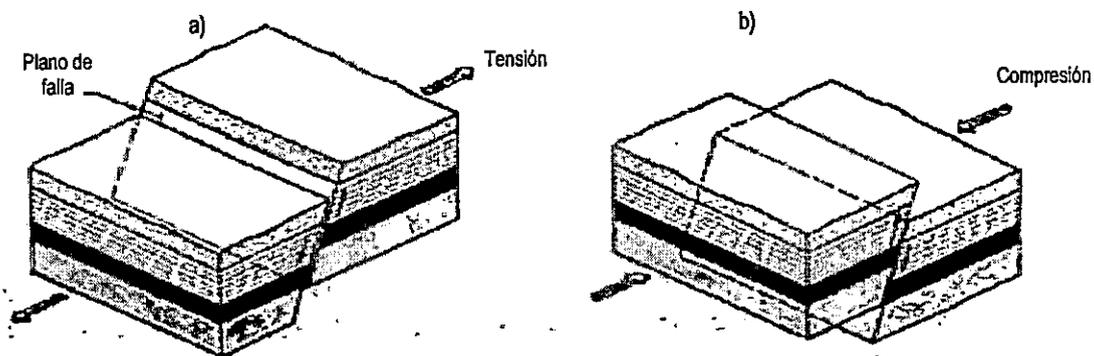


Fig. 2.4 Fallas Verticales, a) Falla Normal, b) Falla Inversa.

2. *Falla Inversa*: Los bloques están sometidos a fuerzas de compresión perpendiculares a la falla, y el bloque superior es forzado a deslizarse hacia arriba y asciende respecto al bloque inferior (figura 2.4b). Las fallas inversas que tienen buzamiento muy pequeño se conocen como *Fallas de Cabalgamiento* y pueden resultar en estratos más viejos colocándose sobre

otros más jóvenes, éstas se encuentran frecuentemente en las zonas de colisión de placas tectónicas.

En las fallas Normales y en las Inversas el plano de falla es oblicuo respecto al horizonte; en ellas se producen desplazamientos a lo largo de una superficie de falla inclinada, y los bloques se reajustan según las fuerzas a que está sometida la región tectónica.

C. *Falla oblicua*: Se presenta cuando la ruptura muestra combinación de desplazamientos horizontales y verticales.

Cuando el plano de falla aflora a la superficie se puede medir el rechazo en campo a partir del trazo visible de la falla y de niveles y puntos de referencia. Las fallas difieren también en cuanto a la longitud del segmento de falla que sufre ruptura, pudiendo ser ésta de pocas decenas o de varios centenares de kilómetros. La razón de deslizamiento o sea el desplazamiento por la unidad de tiempo entre dos bloques o placas adyacentes, es una medida de la actividad de la falla; puede ser del orden de pocos centímetros o de fracciones de milímetro por año.

La comparación de los periodos de recurrencia entre eventos mayores es también un medio útil para determinar la actividad relativa de las fallas, ya que el intervalo que transcurre entre eventos característicos provee una relación directa entre el deslizamiento unitario y la magnitud del sismo: a mayor tiempo de recurrencia, mayor magnitud.

### 2.3.3 Diaclasas o Juntas

Si se estudia cualquier roca típica, se verá que aparte de los planos de estratificación, que son superficies que indican interrupción en el proceso original de disposición y que hoy son planos débiles; visibles de las rocas sedimentarias, las fracturas también se presentan en otros planos en ángulos rectos a éstos, dando estas estructuras origen a una estructura de bloque, aunque los bloques no pueden separarse uno de otro. Tales fracturas reciben el nombre de *juntas o planos de juntas*.

Un *juego de juntas*, un grupo de juntas o diaclasas de origen común son paralelas entre sí y es corriente que se presenten varios juegos de juntas, lo que da como resultado que en los afloramientos, las

rocas presenten el aspecto fragmentado en bloques.

Las juntas son fracturas de las rocas en las cuales no ha habido desplazamiento y resultan de los intensos esfuerzos ya sea durante el enfriamiento de la roca o el desplazamiento estructural y en algunos otros casos, se deben a esfuerzos de tensión o de corte. En ellas pueden ocurrir desplazamientos, por ejemplo si los estratos que al principio fueron horizontales y que después se inclinaron por los movimientos de la tierra y que se alteran por la actividad del hombre.

Entre las clases más interesantes de juntas están las que forman un patrón poligonal, con frecuencia hexagonal, que se observa en basaltos y en otras rocas ígneas de grano fino. Algunas se han rellenado con magma fundido y en la actualidad aparecen como diques; sin embargo, las juntas abiertas o que no están rellenas pueden ser las más peligrosas y hay algunas formaciones notables por su estructura de juntas abiertas.

La utilidad de definir estos sistemas de diaclasas, es que permiten reconstruir los eventos pasados que han deformado las rocas, ya que en ocasiones quedan registrados varios eventos aislados, en que los esfuerzos han operado en distintas direcciones.

## **2.4 Meteorización de las Rocas y Tipos de Meteorización**

Al examinar cualquier superficie rocosa que haya estado expuesta a la atmósfera por un período considerable, se notará que ha sido afectada notablemente por esta exposición; en muchos casos, la desintegración de la capa superficial será evidente, la acción compleja causada por los factores atmosféricos se ve en la creación del suelo y de las rocas sedimentarias mecánicamente formadas. El proceso de cambio que resulta de la exposición de las rocas a la influencia de la atmósfera se conoce como intemperismo o meteorización.

Algunos efectos que pueden presentarse de la proximidad de una roca a la superficie terrestre son múltiples:

A. *Pérdida de presión de carga por eliminación del material de recubrimiento:* los minerales se expanden en función de su módulo de elasticidad, con lo cual comienza la separación granular. Los

poros y fisuras creados hacen a la roca permeable a las aguas superficiales y a la humedad del aire.

- B. *Interacción química entre la roca y las fases fluidas:* fenómenos de solubilización parcial, oxidación, solución congruente (disolución) o incongruente (hidrólisis). En esta última, a su vez, puede existir o no interacción con el medio.
- C. *Acciones mecánicas:* Se dan en climas extremos y consisten en el calentamiento y enfriamiento alternante de las rocas o en la introducción de hielo en sus grietas. El proceso puede ser cotidiano donde la roca se expande al calentarse por el sol y se congela durante la noche.
- D. *Acciones biológicas:* Colonización por vegetales, desde microorganismos a raíces de plantas mayores. Las plantas liberan bióxido de carbono por las raíces, que también producen ácidos húmicos y la alteración de éstos con la roca produce soluciones nutrientes para las plantas; el agua actúa como disolvente en estos procesos por los cuales las plantas desintegran las rocas y las convierten en suelo.

El primero de los efectos es el más universal. Los restantes van a relevarse en cada área geográfica, siendo su importancia función sobre todo del clima.

#### 2.4.1 Meteorización Mecánica

Es un tipo de meteorización importante en los ambientes erosionados por el hielo (periglaciares) y desérticos; en el primero predomina la llamada *Gelifracción*, consistente en la explosión lenta de la roca *in situ* por medio de cuñas de hielo, cuando el agua introducida en grietas aumenta de volumen al solidificarse. La penetración de arcilla (que aumenta de volumen con la humedad) en las fisuras acentúa la eficacia de la gelifracción. Como las fisuras se presentan con frecuencia en familias de planos paralelos, el resultado es una fragmentación "*en rodajas*". En rocas porosas, lo que se congela es el agua de impregnación, produciéndose una microgelifracción.

El proceso de calentamiento y enfriamiento de las rocas, repetido a diario es importante por dos factores: dada su escasa conductividad térmica, el calor se detiene en los centímetros exteriores de la roca, y si ésta es heterogénea en cuanto al color de sus minerales, los más oscuros de éstos absorben más calor

y, por tanto, experimentan más variación de volumen. El resultado final es que la roca experimenta una meteorización que se puede denominar térmica y que consiste en su fragmentación por las tensiones de dilatación acumuladas. A veces la separación es en forma de “*gajos de naranja*” y otras es una descamación superficial (*Exfoliación*). A esta última ayudan, en las rocas de génesis profunda, grietas paralelas a la superficie del macizo rocoso debidas a la descompresión por descarga de los materiales superiores ya erosionados. La rotura térmica repetida puede conducir en último término a partículas del tamaño de limos, pero nunca a partículas coloidales (arcillas).

## 2.4.2 Meteorización Química

La meteorización química comprende dos acciones diferentes: la disolución y la hidrólisis.

- A. **La disolución.** Esta consiste en un desmoronamiento de la red cristalina de los minerales que forman la roca por parte del agua pluvial, que ha disuelto en su caída gases atmosféricos (por ejemplo el ácido carbónico,  $\text{CO}_2$ , que vuelve el agua un buen solvente) y capturado distintos iones en su recorrido superficial, lo que aumenta su agresividad química. La disolución es sólo efectiva para algunos minerales de elevada solubilidad: los más frecuentes en la naturaleza son los cloruros y sulfatos que forman las rocas denominadas evaporitas.

La anhidrita es muy poco soluble directamente, pero en contacto prolongado con el agua se hidrata, transformándose en yeso, con un aumento de volumen superior al 60%, lo que contribuye a fragmentar la roca. La calcita es un mineral muy poco soluble; sin embargo, hay evidencia de que las calizas, que son rocas compuestas básicamente de calcita, se disuelven intensamente en clima húmedo. La explicación de esta paradoja es que las calizas sufren en realidad no una disolución, sino un ataque químico por  $\text{CO}_2$ , que transforma el carbonato de calcio en bicarbonato de calcio, sal muy soluble. El agua fría disuelve más  $\text{CO}_2$  que la caliente, la baja temperatura favorece el proceso de ataque de la caliza, al igual que la alta presión.

- B. **La hidrólisis.** Este proceso consiste en la separación de los elementos que constituyen la molécula del agua y se produce generalmente por el paso de energía. Es una descomposición por el agua,

cualitativamente distinta a la disolución, en cuanto a que implica un cambio químico profundo del mineral atacado, donde el residuo insoluble se organiza en nuevas estructuras minerales. Este conjunto de procesos tiene su mejor ejemplo en la destrucción química de los silicatos. Los productos de la meteorización dependen mucho más del clima que del mineral de partida (por ejemplo, tanto la ortosa como la biotita dan caolinita, en clima húmedo).

En climas húmedos, las arcillas y el cuarzo, teñidos de amarillo por la limonita, forman la denominada "arena granítica". Este tipo de alteración, que puede alcanzar varios cientos de metros de profundidad, se denomina evolución silícea; dado lo abundante de las rocas que lo sufren, es fácil explicar el hecho de que arena y arcilla sean los productos detríticos más frecuentes en las cuencas de sedimentación.

### 2.4.3 Meteorización Biológica

Existe especialmente en la zona templada. Es un tipo de meteorización causada por seres vivos. Las consecuencias directas de esta meteorización no son cuantitativamente muy importantes, aunque la colonización vegetal (líquenes primero, luego bacterias, algas y hongos) modifica de forma esencial la superficie de una roca. En un estadio más avanzado, las raíces pueden ejercer efectos de cuña; asimismo, los animales excavadores contribuyen a remover y airear el suelo. En las calizas, las raíces pueden, además, favorecer la disolución al crear, en el proceso respiratorio, un microclima rico en  $\text{CO}_2$ . Pero, sin duda, el efecto biológico más importante sobre la superficie del terreno es la creación de los suelos. Sobre el sustrato de arcillas y precipitados generados en la meteorización química, los agentes biológicos depositan materia orgánica predominante vegetal, que por la acción bacteriana se altera a humus, el cual se enlaza con las arcillas formando partículas de tamaño coloidal. Este enlace se realiza mediante las llamadas bases cambiables, quedando de esta forma el humus retenido sobre el terreno.

## **2.5 Suelos Transportados y Suelos Residuales**

Los suelos residuales y los suelos transportados, es una clasificación que se establece según el proceso de formación de un depósito.

### **2.5.1 Suelos Transportados.**

La erosión ha sido mencionada repetidamente como una de las grandes influencias modificadoras que actúan en la superficie de la tierra, A través del tiempo ha sido causa de la formación de la mayoría de rocas sedimentarias que cubren las tres cuartas partes de la superficie terrestre; asimismo es incesante la obra de remoción de los productos de la meteorización de la roca y su depósito en otra parte. Así los procesos erosivos aún ahora están formando suelos algunos de los cuales con el tiempo se convertirán en las rocas sedimentarias del futuro.

En un suelo transportado las partículas se formaron por la meteorización de la roca en un lugar y fueron transportadas, depositándose finalmente en otro emplazamiento. La formación de los suelos Transportados puede explicarse más adecuadamente considerando la formación, transporte y depósito de los mismos.

#### **2.5.1.1 Formación de los Suelos Transportados.**

El modo principal de la formación de los suelos transportados lo constituye la meteorización física y química de las rocas en la superficie terrestre. En general las partículas de limo, arena y grava se forman por la meteorización física de las rocas; mientras que las partículas arcillosas proceden de la alteración química de las mismas. La formación de partículas arcillosas a partir de las rocas puede producirse, bien por combinación de elementos en disolución o por la descomposición química de otros minerales.

#### **2.5.1.2 Transporte de los suelos.**

Los suelos pueden ser transportados por cualquiera de los cuatro agentes siguientes: agua, aire,

hielo y gravedad. Dentro de ellos el agua constituye el principal agente de transporte y podría mencionarse además los organismos vivos como un agente menos influyente de transporte de los suelos. El transporte afecta a los suelos de dos formas principales: a) modifica la forma, el tamaño y la textura de las partículas por abrasión, desgaste, impacto y disolución; b) produce una clasificación o gradación de las partículas. La Tabla II resume algunos de los efectos de los cinco agentes citados sobre los suelos.

TABLA II  
Influencia de la Forma de Transporte Sobre las Características de los Sedimentos.

	Agua	Aire	Hielo	Gravedad
Tamaño	Reducción por disolución, ligera abrasión en suspensión, abrasión e impacto en el arrastre	Considerable reducción	Considerable abrasión e impacto	Impactos considerables
Forma y redondez	Redondeo de arenas y gravas	Elevado grado de redondeo	Partículas angulosas y aplanadas	Angulosas, no esféricas
Textura Superficial	Arena: lisa, pulimentada, brillante Limo: escaso efecto	El impacto produce superficies mates	Superficies estriadas	Superficies estriadas
Clasificación por tamaños	Considerable	Muy considerable (progresiva).	Muy escasa	Nula

### 2.5.1.3 Tipos de depósitos

- A. *Depósitos Eólicos.* Los depósitos de suelos formados por el viento se conocen como depósitos eólicos. Su presencia frecuente cerca de las costas del mar pone de manifiesto que las condiciones áridas no son necesarias para la formación de los depósitos eólicos, aún cuando la acción de viento es más fuerte allí. La forma de los granos (bien redondeada y en algunos casos casi esférica) es el rasgo más notable de los depósitos eólicos que pueden presentar superficies cristalizadas. Un tipo especial de depósito eólico, ampliamente distribuido en todo el mundo es el "loess"; es de grano muy fino y con frecuencia amarillo. No presenta estratificación pero ocurre en estratos de cientos de metros de espesor. Un depósito algo similar es el adobe; que se emplea para la fabricación de ladrillos y otros objetos secados al sol.
- B. *Acción de la gravedad:* El tipo más conocido de la acción erosiva gravitacional, es el que origina la

acumulación de fragmentos de roca al pie de las superficies expuestas. En casos extremos la acción erosiva de la gravedad puede dar lugar a avalanchas de rocas. Aquí la fuerza de la gravedad, actúa directamente sobre los productos de la meteorización mecánica. Estos se acumulan hasta no ser alterados de alguna manera, a menudo por la erosión que al pie del talud producen las corrientes de agua. En las grandes acumulaciones de suelo, la masa de roca desintegrada puede alcanzar con el tiempo un estado de equilibrio inestable y se empieza a mover por sí misma.

- C. *Depósitos Acuáticos*: Aunque los tipos de depósitos formados por la acción del viento o por la gravedad son importantes; los suelos transportados más importantes y ampliamente distribuidos son aquellos que han sido removidos por el agua. Se agrupan dentro de dos divisiones principales Sedimentos Marinos y Sedimentos Continentales. Los primeros depositados en el mar y los segundos en agua dulce; pero en una variedad de formas, algunos por corriente fluvial, otros como depósitos en lagos de agua dulce, etc. Tales depósitos se pueden ver en la vecindad de las sierras montañosas y a menudo tienen una profundidad y extensión sorprendentes. Muestran estratificación como es de esperarse dada la naturaleza de su formación; y como el cambio en el volumen de flujo de toda corriente es abrupto, los estratos adyacentes pueden variar muchísimo.

### 2.5.2 Suelos Residuales.

Los suelos residuales se originan cuando los productos de la meteorización de las rocas no son transportados; si no que se acumulan in situ, con escaso o nulo desplazamiento de las partículas, son muchas partes de la superficie de la tierra donde la superficie de la roca natural es casi horizontal, la meteorización se ha producido sin que los suelos así formados se hayan movido de su posición original. Entre los factores que influyen sobre la velocidad de alteración en la naturaleza de los productos de meteorización están el clima, el tiempo, la naturaleza de la roca original, la vegetación, el drenaje, etc. Estos suelos están ampliamente repartidos en las áreas tropicales, en donde suelen ser denominados *Lateritas*. Los depósitos de suelos residuales tienen un espesor que varía desde unos pocos centímetros hasta 100 o más metros dependiendo de la edad geológica. Estos suelos se forman por la meteorización y

lixiviación de los materiales solubles en agua desde la superficie hacia abajo (figura 2.5). A medida que la acción de lixiviación disminuye con la profundidad, el suelo residual es cada vez menos alterado hasta que se alcanza la roca madre. Los suelos residuales tienden a ser más abundantes en zonas húmedas, templadas, favorables al ataque químico de las rocas y con suficiente vegetación para evitar que los productos de la meteorización sean fácilmente arrastrados y formen sedimentos. El nombre los describe con mucha precisión; ya que los suelos son verdaderos residuos de la roca original. Las características de un suelo residual pueden variar, a veces conservan la estructura y aún la apariencia de la roca original hasta que se altere de alguna forma; por otro lado algunas de las arcillas residuales no muestran evidencia alguna de su origen. Otras presentan características peculiares y se les han dado nombres locales o regionales especiales. Si se efectúa un corte vertical en un suelo residual, puede verse un arreglo o disposición horizontal de las capas, especialmente en un corte reciente. La sección vertical es un perfil del suelo y las capas individuales son horizontes del suelo. La Tabla III describe un arreglo simplificado de los horizontes de suelo para uso de la ingeniería geotécnica.

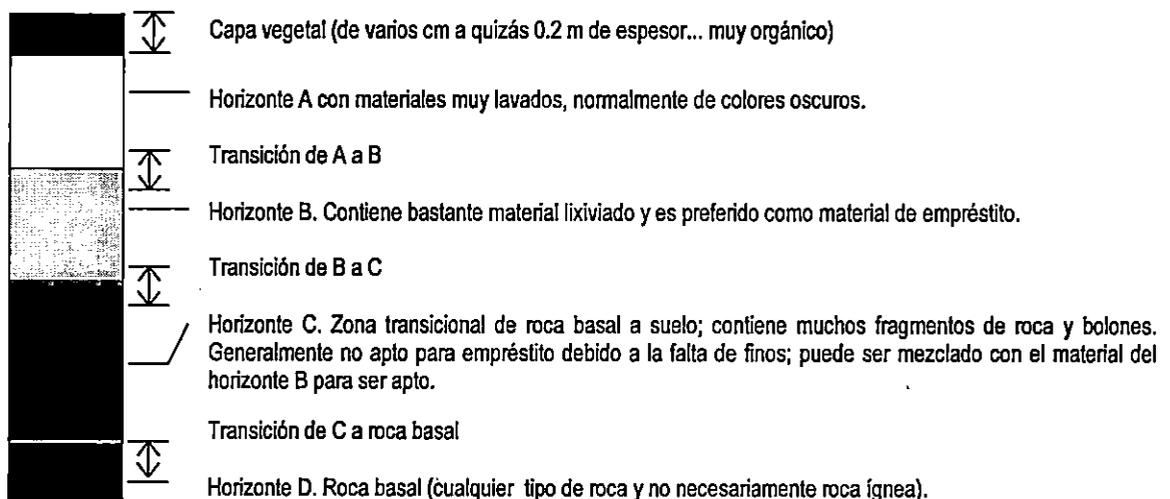


Fig. 2.5 Perfil Hipotético de Horizontes del Suelo

El suelo del horizonte B es considerado el mejor como zanja de préstamo ya que contiene material granular y ligante. El horizonte A contiene demasiada materia orgánica y muy poco ligante para

tener valor como material de construcción. El horizonte C puede ser de una gradación muy abierta o deficiente en el material que pasa la malla No. 200 y tamaños de la arcilla para uso en zanja de préstamo, aunque si se mezcla con el material del horizonte B, puede llegar a ser satisfactorio.

TABLA III  
Horizontes del suelo

Horizonte	Comentarios
A	Zona superior consistente de tierra vegetal y materia orgánica, y en áreas húmedas, de materiales altamente lavados; en áreas áridas puede ser rica en varias sales solubles que quedan mientras se evapora el agua de profundidades inferiores. Por lo general esta altamente meteorizada, con materiales de colores oscuros, incluyendo matices negros y cafés, de un espesor de unos pocos centímetros a 1 o 2 m y gradualmente variando hacia el horizonte B.
B	Zona que subyace al horizonte A y que contiene bastantes materiales lixiviados (sales solubles en agua tales como carbonatos, sulfatos y cloruros) y minerales arcillosos. Esta zona puede tener un espesor del orden de 0.5 a varios metros y avanza gradualmente hacia el horizonte C.
C	Zona de transición de material recientemente meteorizado de la roca madre; puede consistir de considerables fragmentos de rocas. Esta zona puede estar ausente o ser de muy poco espesor y avanza gradualmente hacia el horizonte D.
D	Roca madre (o basal).

Los suelos residuales tienden a caracterizarse por:

1. Presencia de minerales que han meteorizado de la roca madre.
2. Partículas que tienden a ser angulares o sub-angulares.
3. Grandes fragmentos de rocas, angulares, que tienden a encontrarse dispersos en la masa de suelo.

## CAPITULO III

# ORIGEN Y CARACTERISTICAS DE LOS SISMOS

### **3.1 *La Teoría de la Tectónica de Placas***

La teoría de la tectónica de placas propone un modelo cinemático según el cual la litósfera o corteza terrestre está compuesta por unas 12 placas principales (figura 3.1) que están en continuo movimiento unas con respecto a otras, y en cuyos límites se localiza la mayor parte de la actividad sísmica, tectónica y magmática existente en el planeta.

Mediante investigaciones oceanográficas se descubrió en el centro del Océano Atlántico un sistema montañoso que se extiende, a manera de gigantesca costura; desde la Antártida hasta Islandia, llamado Cordillera Centro-Atlántica. Posteriormente se comprobó que ésta cordillera submarina se prolonga y ramifica a través de otros océanos formando un sistema montañoso continuo de 40,000 Km de longitud. Además, se ha determinado que el fondo del Océano Atlántico se está alejando de la depresión axial que se observa en la cresta de la cordillera oceánica y se está ensanchando constantemente. Esto se puede interpretar aceptando que corrientes convectivas en el manto, conducen magma, desde el interior de la tierra hacia la superficie, a través de la depresión central llamada rift y a lo largo del eje en la cima de la cordillera centro-oceánica.

El material magmático se extiende sobre el fondo oceánico donde se enfría y solidifica, empujando a su vez a la corteza hacia ambos lados a razón de varios centímetros por año. Así, en la parte central del Atlántico y en otras zonas similares en el Océano Pacífico y en el Océano Indico, caracterizadas por una intensa actividad volcánica y sísmica, la corteza terrestre crece mediante el aporte de material magmático a través de las dorsales oceánicas, es también a partir de éstas que se inició hace doscientos millones de años la disgregación del supercontinente Pangea y la deriva continental.

Para el equilibrio global es necesario que el aporte de nuevo material cortical a lo largo del rift sea compensado, esto requiere que en otras zonas desaparezca material de la corteza. Cerca de las plataformas continentales y a lo largo de las trincheras o fosas marinas, la placa oceánica se sumerge bajo

la placa continental y gradualmente el material de la litósfera es consumido nuevamente en el manto superior, completándose el ciclo iniciado en las cordilleras oceánicas.

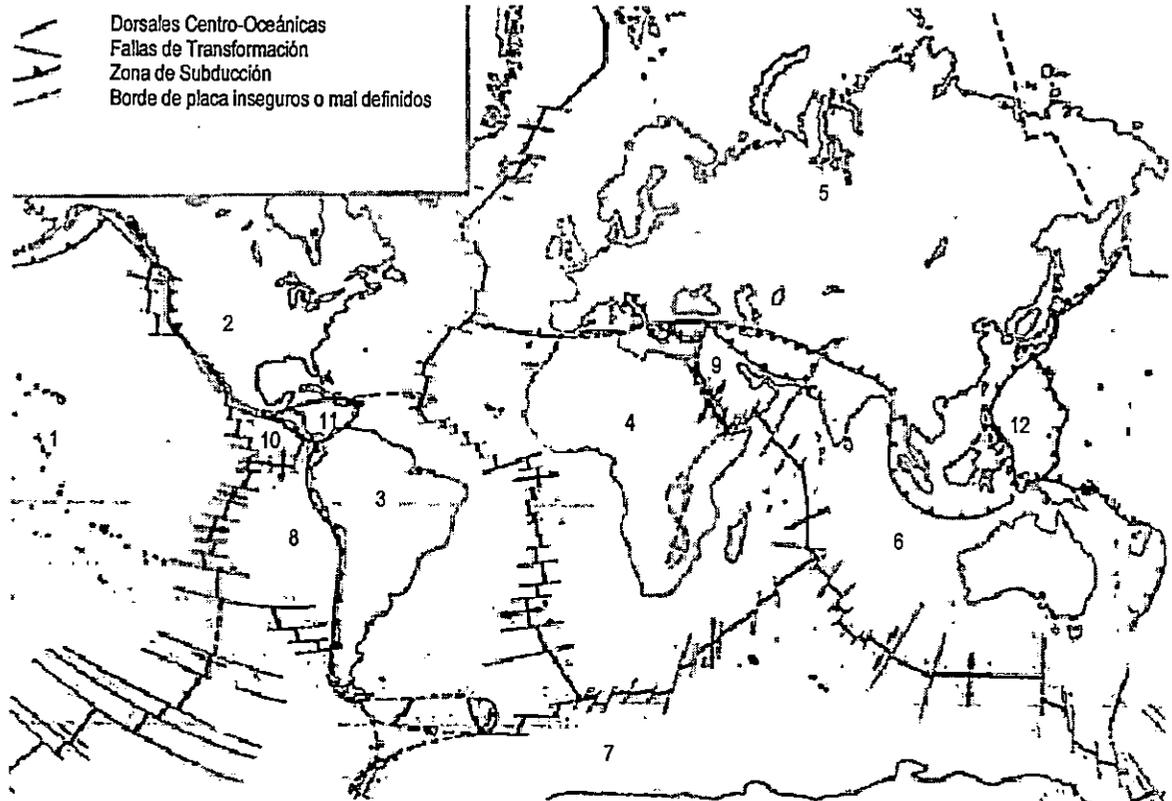


Fig. 3.1 Continentes y placas litosféricas 1. Pacífica, 2. Norteamericana, 3. Suramericana, 4. Africana, 5. Euroasiática, 6. Australoíndica, 7. Antártida, 8. Nazca, 9. Arábica, 10. Cocos, 11. Caribe, 12. Filipina.  
 Fuente: Agueda Villar "Geología" (1983)

La zona buzante donde se produce la sumersión de la placa oceánica bajo la continental se denomina zona de subducción (figura 3.2). Ejemplos de éstas zonas que se caracterizan por una trinchera o fosa marina profunda frente a la costa pueden ser: la Mesoamericana frente al Istmo Centroamericano que alcanza una profundidad de 6 km frente a Guatemala, y la Tonga-Kermadec en el Pacífico occidental tiene una profundidad de 10 km.

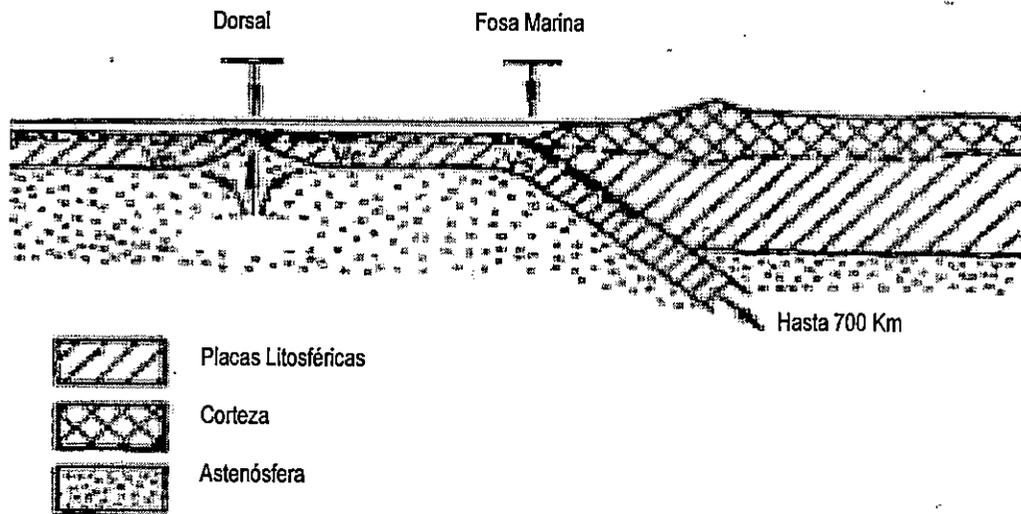


Fig. 3.2 Formación y subducción de la litósfera – La litósfera, formada por la corteza y la parte exterior del manto, se desplaza sobre la astenósfera. En las crestas de las cordilleras Centro-Oceánicas se genera nuevo material litosférico, en las zonas de subducción este desaparece nuevamente bajo las fosas oceánicas.  
Fuente: Fuente: Agueda Villar "Geología" (1983)

La placa subducida produce a su vez el levantamiento del borde de la placa continental y la consiguiente formación de sistemas montañosos tierra adentro. A lo largo de la zona de contacto entre ambas placas se generan grandes fuerzas de fricción; el aumento de temperatura y las altas presiones a que está sometido el material litosférico a medida que desciende, producen el calentamiento y fusión parcial del mismo. Parte del material fundido es transportado a la superficie en forma de magma y es la causa del intenso volcanismo asociado con la subducción de las placas litosféricas. La cordillera volcánica que se extiende paralelamente a la costa occidental del Istmo de Centro América, y las islas de origen volcánico en los arcos insulares del Caribe y del Pacífico, se explican en esta forma.

El modelo anterior asume que la litósfera, es mucho más rígida que la astenósfera subyacente que comprende el manto superior hasta una profundidad de 250 km. Se considera que el comportamiento de la astenósfera es semejante al de un medio viscoelástico sujeto a fuerzas cuya escala de acción es de decenas de millones de años, permitiendo que en ellas se desarrollen las corrientes convectivas que producen el movimiento y el desplazamiento relativo de las placas litosféricas.

Unas placas tienden a separarse, así los continentes de África y de América del Sur lo hacen a partir de la dorsal Centro-Atlántica. Otras placas en su movimiento relativo colisionan frontalmente, tal como sucede con el sub-continente Indico que empuja hacia el Norte contra el continente Asiático; el choque entre ambas placas y las fuerzas tectónicas asociadas han producido el levantamiento de la cadena del Himalaya, las montañas más altas del mundo. Los Alpes en Europa también han surgido del choque entre dos placas continentales: África y Europa<sup>3</sup>.

En las fallas de transformación, en cambio, no se crea ni se destruye material de la corteza y las placas adyacentes se desplazan lateralmente, con movimiento paralelo al borde o límite entre ambas; así la placa del pacífico se mueve a razón de 3 cm por año y con orientación norte en relación con la placa de Norteamérica a lo largo de la conocida falla de San Andrés en California.

En conclusión, se definen tres tipos de fronteras o bordes entre las placas litosféricas:

- A. Borde Divergente: Representado por las dorsales oceánicas.
- B. Borde Convergente: Que pueden ser zonas de subducción o zonas de colisión frontal.
- C. Borde Transcurrente: Son las conocidas como fallas de transformación.

### **3.2 *La Teoría del Rebote Elástico***

Estudios que se realizaron en California, antes y después de ocurrido el terremoto de San Francisco en el año de 1906, permitieron comprender mejor el mecanismo que conduce a la generación de sismos. Los resultados de dos triangulaciones independientes realizadas en los años 1851 y 1865 y entre 1874 y 1892, y una tercera posterior al sismo, en una región atravesada por la falla de San Andrés, fueron analizados y comparados por Harry F. Reid de la Universidad John Hopkins.

En investigaciones de campo después del terremoto, se observó además, como cercas y caminos a través de las fallas fueron desplazados en más de seis metros y el desplazamiento vertical fue menor de un metro. La conclusión fue que antes del sismo se habían producido grandes desplazamientos a lo largo de la falla, y se habían acumulado enormes cantidades de energía de deformación. Durante un período de

---

<sup>3</sup> Fuente: Sauter 1989, "Introducción a la Sismología"

50 años previo al terremoto, puntos distantes a ambos lados de la falla se habían movido 3.2 metros en sentido opuesto; este movimiento acumulado durante medio siglo era del mismo tamaño y del mismo sentido que el deslizamiento que acompañó al terremoto. Esta conclusión llevó a H. F. Reid a formular el conocido modelo mecánico del Rebote Elástico, que explica el mecanismo de generación de los sismos.

De la forma siguiente, el texto original de Reid (1911) fue:

1. La fractura de la roca, que causa un terremoto tectónico, es el resultado de deformaciones elásticas, mayores a la máxima fuerza que puede resistir la roca, producidas por el desplazamiento relativo de secciones vecinas de la corteza terrestre. Estos desplazamientos relativos no son producidos súbitamente en el momento de la fractura, sino que alcanzan sus cantidades máximas durante un período más o menos largo de tiempo.
2. Los únicos movimientos de masa que ocurren en el momento del terremoto son los repentinos rebotes elásticos de los lados de la fractura hacia posiciones sin deformación elástica; y estos movimientos, amortiguándose gradualmente, se extienden hasta distancias de sólo unas pocas millas desde la fractura.
3. Las vibraciones se originan en la superficie de la fractura; la superficie donde comienzan tiene al principio un área muy pequeña, y puede hacerse muy grande con bastante rapidez, pero no más rápidamente que la velocidad de las ondas elásticas de compresión en la roca.
4. Inmediatamente antes de la ruptura, la energía que se libera en el momento del terremoto tiene la forma de energía de deformación elástica en la roca".

El mecanismo del rebote elástico, se ilustra en la figura 3.3 que según la mecánica de materiales, en roca sana, homogénea, sin fracturas ni meteorización, la ruptura debería ocurrir en el plano de mayor esfuerzo cortante, a  $45^{\circ}$  a la dirección del máximo esfuerzo principal, que dependerá del estado de esfuerzo triaxial en la corteza. Sin embargo, la corteza contiene muchas fracturas en las rocas, que se denominan fallas, y casi siempre los terremotos ocurren en estos planos débiles aunque no necesariamente coincidan con el plano de mayor esfuerzo cortante.

Se considera además, que la litósfera en su parte superior y con unos 15 a 20 km de espesor, está constituida por rocas rígidas de gran dureza y resistencia, capaces de deformarse elásticamente y de almacenar energía de deformación. A una mayor profundidad, el aumento de la temperatura convierte las rocas en un material más débil y dúctil, incapaz de deformarse elásticamente. La zona de la litósfera que muestra comportamiento dúctil llega hasta el fondo de la misma, a unos 80 o 100 km de profundidad.

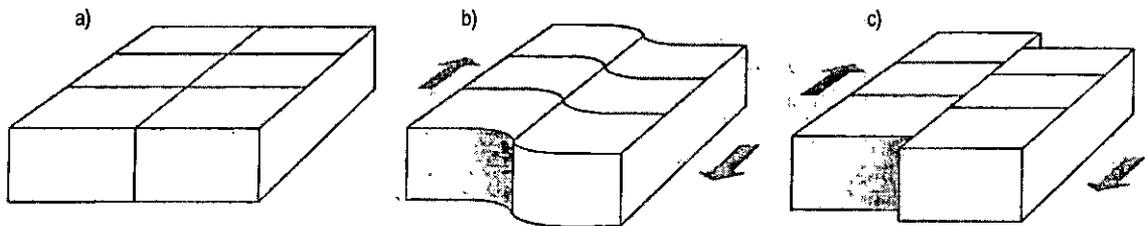


Fig. 3.3 Mecanismo del Rebote Elástico: a) La superficie de la tierra, cambia de sitio lentamente en muchos lugares; debido a fuerzas adyacentes de la misma. b) Desplazamientos diferenciales son causados por grandes esfuerzos elásticos que pueden ser soportados por la roca. c) Ruptura de la roca (debido a las fallas) ocurre, observándose los rebotes a lo largo de la falla y abajo las fuerzas elásticas, se manifiestan en parte o totalmente, quedando desplazada la corteza terrestre. Tomado de: Putnam's Geology (1982).

Según el modelo propuesto por H. F. Reid, las deformaciones elásticas se concentran en una zona de ancho similar a la profundidad de la zona rígida de la litósfera, unos 30 km a ambos lados de la falla.

Reid, consideró que este “Rebote Elástico” era la causa inmediata del terremoto y su hipótesis, que da una explicación acertada del origen de éstos fenómenos, ha sido confirmada a través de los años.

Los sismos son producto de un proceso gradual de deformación elástica y de acumulación de esfuerzos hasta superar la resistencia del material, instante en que se inicia la relajación súbita de los esfuerzos en una extensa zona de ruptura de la roca. Cuando la falla sufre esta dislocación violenta, se libera energía elástica almacenada en la roca, gran parte de la cual es disipada en forma de calor, el que es generado por la fricción del material. Una parte menor de la energía es irradiada en forma de ondas elásticas, conocidas como ondas sísmicas que se propagan en todas direcciones y hacen vibrar el terreno; estas vibraciones son percibidas en la superficie como temblores.

También la roca de la corteza terrestre tiene propiedades físicas que hacen que ésta se deforme

y vibre elásticamente cuando fuerzas externas actúan sobre ella. Es por ello, que para predecir o determinar la forma en que va a vibrar el terreno durante un sismo, qué intensidad tendrá el movimiento y su duración, es preciso conocer las características de las ondas sísmicas y la forma en que la energía es irradiada a través del medio sólido de la tierra.

La Teoría del rebote elástico es un modelo simplificado que explica satisfactoriamente la ocurrencia de sismos de foco superficial y somero, generados en aquella región rígida de la litósfera capaz de deformarse elásticamente y de sufrir fractura. No obstante, no se aplica a los sismos de foco profundo que se originan en las zonas de subducción, a varias centenas de kilómetros de profundidad bien dentro del manto superior, donde se supone que la temperatura reinante y las altas presiones cambian el material subducido de la litósfera, de roca rígida y frágil a un material dúctil incapaz de sufrir fractura.

### **3.3 Ondas Sísmicas**

#### **3.3.1 Tipos de Ondas Sísmicas**

La roca de la corteza terrestre tiene propiedades físicas que hacen que ésta se deforme y vibre elásticamente cuando fuerzas externas actúan sobre ella. Es por ello, que para predecir o determinar la forma en que va a vibrar el terreno durante un sismo, qué intensidad tendrá el movimiento y su duración, es preciso conocer las características de las ondas sísmicas y la forma en que la energía es irradiada a través del medio sólido de la tierra.

Cuando la roca se fractura debido a la deformación de la corteza, se libera la energía acumulada en el material que es disipada principalmente en forma de calor; una parte menor es irradiada en forma de ondas sísmicas que se propagan a través del medio sólido de la tierra en forma similar a las vibraciones producidas por el sonido o a las ondas en la superficie del agua.

Entre los tipos de Ondas Sísmicas, pueden definirse los grupos siguientes:

- A. **Ondas Internas o de Cuerpo:** Viajan en el interior de un sólido elástico, es decir, se propagan a través del medio sólido de la tierra. Se dividen a su vez dos tipos:
  1. **Ondas Primarias u Ondas P:** Llamadas ondas de compresión o longitudinales, ya que su

movimiento es similar al de las ondas sonoras, comprimiendo y dilatando alternativamente el medio sólido a través del cual viajan. Estas ondas hacen vibrar una partícula en el sentido de propagación de las ondas. (Figura 3.4a)

2. *Ondas Secundarias u Ondas S*: Llamadas ondas transversales o de cizalla, ya que su movimiento produce esfuerzos de cizalla en el medio en que se propaga. Este tipo de ondas hacen vibrar las partículas en sentido perpendicular a la trayectoria de las ondas. (Figura 3.4b)

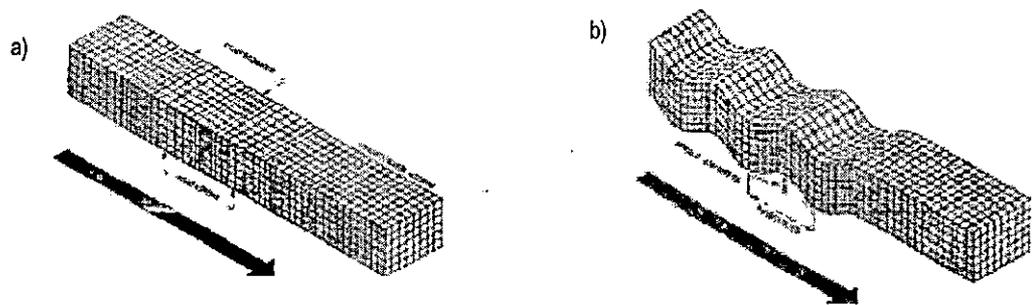


Fig. 3.4 Ondas Internas o de Cuerpo. a) Esquema de la dirección de propagación de las ondas P; b) Esquema de la dirección de propagación de las ondas S. Fuente: Franz Sauter, 1989, "Introducción a la Sismología".

B. *Ondas de Superficie*: Las ondas superficiales, al contrario de las ondas de cuerpo, viajan en la superficie de la tierra; en forma análoga a como se propagan las ondas sobre el agua, el movimiento producido por las ondas de superficie está restringido a la parte superior de la corteza, a una profundidad de unos 30 km. y su amplitud decrece con la profundidad. Se les ha denominado con el nombre de los científicos que demostraron teóricamente su existencia: Love y Rayleigh.

1. *Ondas Love u Ondas L*: Su movimiento es similar al de las ondas de superficie del agua, hacen vibrar una partícula horizontalmente en sentido perpendicular a la dirección de propagación. (Figura 3.5a)
2. *Ondas Rayleigh u Ondas R*: Tienen un movimiento similar al de las ondas en la superficie del agua, haciendo vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimiento elíptico horizontal y vertical simultáneamente. (Figura 3.5b)

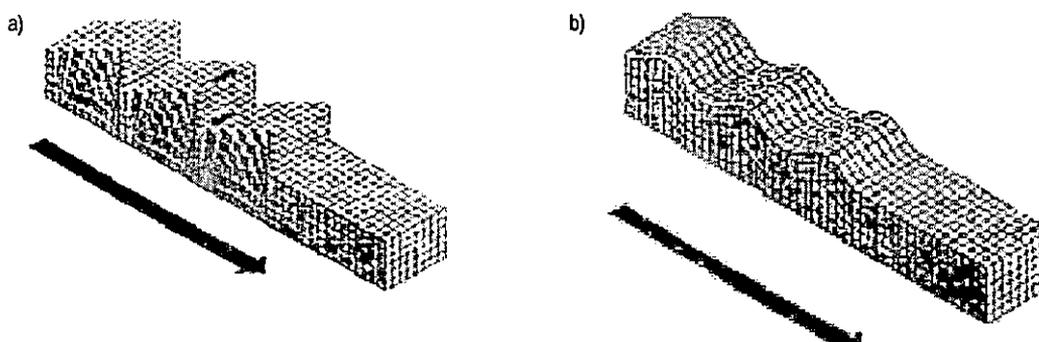


Fig. 3.5 Ondas de Superficie. a) Esquema de la dirección de propagación de las ondas L. b) Esquema de la dirección de propagación de las ondas R. Fuente: Franz Sauter, 1989, "Introducción a la Sismología".

### 3.3.2 Propagación De Las Ondas Sísmicas

Las ondas P son capaces de propagarse a través de un medio sólido y a través de un medio líquido; cuando las ondas P emergen a la superficie desde el interior de la Tierra, una fracción pequeña puede ser transmitida a la atmósfera en forma de sonido; perceptible a los animales y a las personas, si su frecuencia coincide con el ámbito audible. Por otro lado se sabe que si un líquido es deformado lateralmente por esfuerzos de cizalla no regresa elásticamente a su posición original; esto explica que las ondas S, a diferencia de las ondas P, no se pueden propagar a través de medios líquidos.

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas depende de la densidad y propiedades elásticas de la roca y del material a través del cual se transmiten. Las ondas P se transmiten a mayor velocidad que las ondas S, así las primeras ondas que se perciben en la superficie son las ondas primarias P. Cerca de la fuente las ondas P tienen generalmente una componente vertical mayor. Pocos segundos después arriban las ondas S, que hacen vibrar la superficie horizontalmente. Las ondas S tienen mayor amplitud y contenido de energía y son las que causan mayor daño a las edificaciones. La velocidad de propagación aumenta con la profundidad y en el interior de la tierra es mucho mayor; para las ondas P es del orden de 13.6 km/s, mientras en la superficie es tan sólo de 5.5 km/s o menor.

A medida que las ondas sísmicas viajan a través de la corteza, son reflejadas y refractadas en las zonas de contacto entre los distintos estratos de roca y suelo que atraviesan (figuras 3.6).

Asimismo, cuando las ondas son reflejadas o refractadas, parte de la energía se convierte en otro tipo de onda; de manera que cuando una onda P toca el fondo de un estrato de sedimentos aluviales, parte de su energía se transmite a la superficie como ondas P, y otra parte se propaga a través del material aluvial en forma de ondas S.

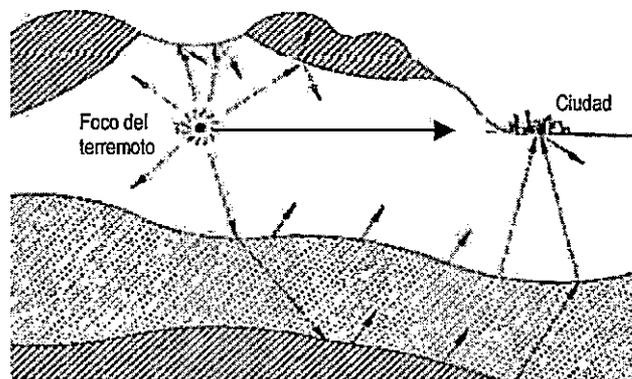


Fig. 3.6 Reflexión y refracción de las ondas sísmicas en la superficie terrestre y en los límites entre estratos de roca  
Fuente: Franz Sauter, 1989, "Introducción a la Sismología".

### 3.3.3 Registros de las Ondas sísmicas

En el diseño sismorresistente de edificios y obras civiles, así como en otras disciplinas científicas, se requiere un conocimiento de las características de la sacudida del terreno, las cuales están dadas por la amplitud de las ondas, por la composición o contenido de frecuencias y por la duración del movimiento. Con la finalidad de medir y analizar este movimiento producido por los sismos se desarrollaron los Sismógrafos, instrumentos diseñados para registrar las ondas sísmicas. El registro resultante se denomina *sismograma*, que es un gráfico de las ondas sísmicas, o sea una medida o representación amplificada del movimiento del terreno.

#### 3.3.3.1 Amplitud y Frecuencia

En el sismograma (figura 3.7) la altura del trazo de la oscilación sobre la posición o línea cero se denomina la *amplitud de onda A*, y el tiempo que dura un ciclo de oscilación se denomina *el periodo de*

onda  $T$ . Este se determina directamente del sismograma midiendo la distancia entre dos picos adyacentes.

La *frecuencia*  $f$ , es el número de vibraciones por segundo, se mide en Hertz o ciclos/segundos, y es equivalente al inverso del período de onda:  $f=1/T$ . La frecuencia característica del sismo se puede determinar también midiendo el número de veces por segundo que el trazo del sismograma cruza la línea cero. La amplitud de la onda registrada en el sismograma no representa la amplitud real del desplazamiento del terreno, pues los sismógrafos contienen sistemas de amplificación que magnifican el movimiento del terreno en un factor determinado. La amplitud real del movimiento del terreno esta dada por la amplitud del trazo del sismograma dividida por el factor de amplificación del instrumento.

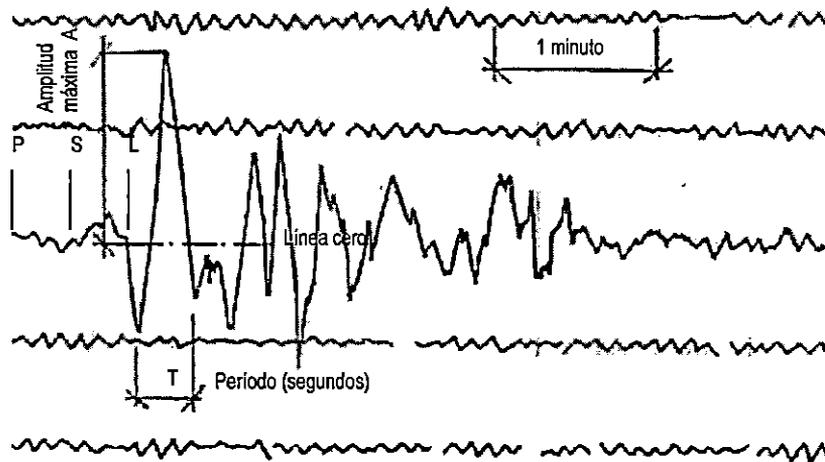


Fig. 3.7 Registro de ondas sísmicas. En el sismograma se indica el arribo de las ondas P y S, y de las ondas de superficie L. Fuente: Sauter 1989 "Introducción a la Sismología"

El período predominante de las ondas esta asociado a la magnitud del evento y a la distancia epicentral. Así las ondas de cuerpo P y S causan cerca del epicentro vibraciones de mayor amplitud y de alta frecuencia, del orden de 5 a 20 hertz (períodos predominantes muy cortos, 0.20 a 0.05 segundos). A distancias epicentrales grandes las ondas de cuerpo P y S pueden tener períodos predominantes de 2.0 a 3.0 segundos. Las ondas de superficie L y R, en cambio son de frecuencia muy baja, o sea los períodos de onda son mayores, en el orden de 20 segundos. La amplitud y la frecuencia del movimiento pueden variar además con respecto a la geología superficial.

### 3.3.3.2 Duración de un Movimiento Fuerte

La Duración de un sismo depende de la magnitud del evento y de la distancia epicentral. A mayor magnitud, mayor duración de la fase intensa del movimiento; igualmente la duración incrementa con la distancia epicentral a medida que las ondas sísmicas se dispersan cuando se alejan del foco. Cerca del epicentro el movimiento del terreno puede durar pocos segundos y en sismos de magnitud baja está representado en el registro por una o pocas oscilaciones. A distancias epicentrales grandes (200 a 400 Km) el movimiento puede durar varios minutos si es causado por un sismo de gran magnitud. La duración de un sismo influye en el comportamiento de las estructuras, de ahí la necesidad de tomar en cuenta la duración del movimiento. A mayor duración de la sacudida, mayor la cuantía de los daños ocasionados (Ver Tabla IV).

TABLA IV  
Duración de la Fase Intensa del Movimiento del Terreno.

Magnitud M	Duración (segundos)	Aceleración máxima del terreno (% g)
5.0	2	9
5.5	6	15
6.0	12	22
6.5	18	29
7.0	24	37
7.5	30	45
8.0	34	50
8.5	37	50

Fuente: Franz Sauter (1989), "Introducción a la Sismología"

## 3.4 Localización de los Sismos

### 3.4.1 Foco y Epicentro

Cuando se produce la fractura de la roca en una zona de fallamiento, es conveniente determinar el sitio en el cual se inició la fractura de la roca y del cual emanaron los primeros pulsos de las ondas sísmicas; a este sitio se le denomina foco o hipocentro (figura 3.8) y se localiza a cierta profundidad bajo la superficie terrestre.

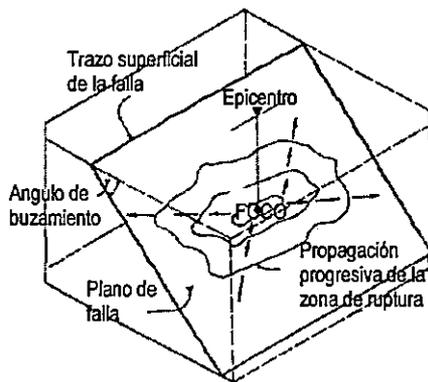


Fig. 3.8 Plano de falla y propagación de la ruptura a partir del foco. El foco o hipocentro es el punto donde se inicia la fracturación de la roca y del cual parten las primeras ondas sísmicas. El epicentro es la proyección vertical del foco en la superficie terrestre. Tomado de Franz Sauter, 1989.

En realidad, la fuente sísmica no es puntual como lo sugiere el término foco, sino más bien es un área extensa y compleja de dislocación de la roca. La zona de facturación, que en los límites entre placas puede tener una longitud de varios centenares de kilómetros, es la zona a partir de la cual es irradiada la energía y se conoce como la zona de liberación de energía. El sitio en la superficie terrestre que se proyecta directamente sobre el foco o hipocentro se denomina como epicentro (Figura 3.8); la zona donde se registra la máxima intensidad y los mayores daños se conoce como el área epicentral. Para sismos de magnitud moderada, el área epicentral tiene una extensión del orden de pocas decenas de kilómetros cuadrados y para sismos de magnitud grande puede ser muy extensa.

### 3.4.2 Profundidad del Foco

La importancia de un sismo puede determinarse basándose en la profundidad del foco, los sismos que más nos conciernen son los de foco superficial, pues son los que causan mayor daño y destrucción. El terremoto de San Salvador es un ejemplo de sismo destructivo de foco superficial (8 Km)<sup>4</sup>, causando grandes pérdidas y víctimas.

La profundidad de los focos varía según la fuente sísmica en que se genera. Arbitrariamente se denominan sismos superficiales aquellos cuyo foco se sitúa entre 0 y 20 Km de profundidad dándose en las fallas geológicas locales, sismos someros aquellos cuya profundidad focal está comprendida entre 20 y

<sup>4</sup> Fuente: Franz Sauter 1989

70 Km y que ocurren en el océano, frente a la costa, intermedios con foco entre 70 y 300 Km, generalmente localizados en el océano, tierra adentro y profundos con foco entre 300 y 700 Km, en regiones como los Andes, bajo la superficie.

### **3.5 Parámetros de Magnitud e Intensidad.**

#### **3.5.1 Magnitud y Escalas de Magnitud**

La magnitud es una medida cuantitativa e instrumental del tamaño de un evento sísmico, relacionada con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura en la falla.

La magnitud es el parámetro más fácil de medir pues, a diferencia de la intensidad que varía con la distancia y la posición del observador para un sismo dado, la magnitud es una constante única que representa una medida cuantitativa del tamaño del sismo, independiente del sitio de observación. La magnitud se determina midiendo la máxima amplitud de las ondas registradas en el sismograma correspondiente al evento.

En la práctica existen varias escalas de magnitud, según el tipo de onda en que se basa la medición de la amplitud. La escala de magnitud original es la desarrollada por Charles F. Richter en 1935 estrictamente válida para el sur de California donde fue calibrada, por lo que en otras regiones con diferente estructura de la corteza y diferentes profundidades focales, no será aplicable, además de tener la desventaja que depende de un modelo específico de sismógrafo (Wood Anderson). La escala Richter está expresada en escala logarítmica, se determina a partir de la máxima amplitud y se designa con la letra  $M_L$ .

Richter definió la magnitud de sismos locales como: el logaritmo base 10 de la máxima amplitud de la onda sísmica expresada en milésimas de milímetros (micrones); registrada en un sismómetro estándar a una distancia de 100 km. del epicentro del evento, para considerar la atenuación de las ondas sísmicas con la distancia epicentral; pero no especificó el tipo de onda en que se debía basar la medición de amplitud.

El procedimiento para medir la magnitud de un evento local está dado en la figura 3.9 del tiempo transcurrido entre la llegada de las ondas primarias P y las ondas secundarias S, se determina la

distancia al foco en Km; en el sismograma se mide la máxima amplitud de la onda, y en el nomograma se traza una línea recta entre los puntos correspondientes a la distancia (izquierda) y a la amplitud a la derecha (derecha) para determinar la magnitud local.

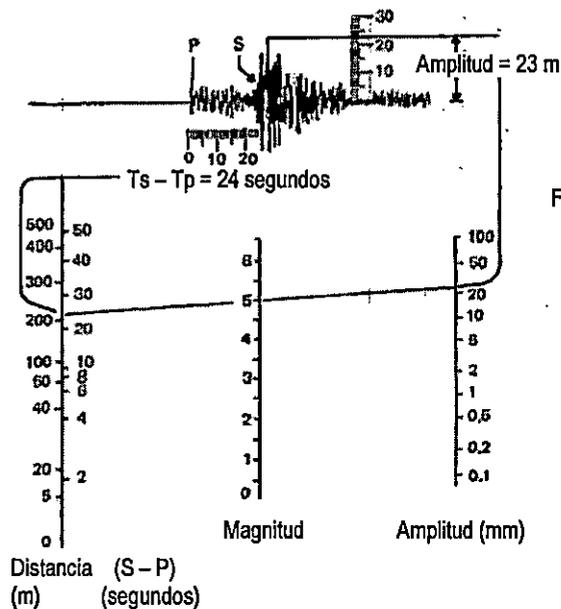


Fig. 3.9 Nomograma para obtener la amplitud de onda de un sismo. La magnitud se puede obtener también empleando nomogramas como el de la figura. Conociendo la distancia epicentral de R (eje izquierdo) y la amplitud máxima de la oscilación A (eje derecho) leída directamente del sismograma, se traza una línea recta entre ambos y se determina la magnitud  $M_L$ . (Tomado de Franz Sauter, 1989).

Eventos con magnitud inferior a 5 se consideran pequeños, con magnitud entre 5.5 y 6.5 moderados, superiores a 7.0 como eventos grandes, y con magnitud superior a 8.0 como muy grandes. La magnitud no expresa el grado de daño que puede causar un sismo; pues para determinar el potencial de destrucción de un sismo influyen muchos factores más.

Se ha hecho práctica generalizada usar dos escalas de magnitud distinta a la de Richter, distinguiéndose la magnitud  $m_b$  y magnitud  $M_s$ , según se mida la magnitud tomando la amplitud del trazo por las ondas de cuerpo (body waves -  $m_b$ ) o las ondas de superficie (surface waves -  $M_s$ ). La magnitud  $M_s$  se emplea generalmente para determinar la magnitud de los sismos de foco superficial y de los eventos grandes y la magnitud  $m_b$  se utiliza para establecer la magnitud de los sismos de foco profundo y eventos de magnitud menor o igual a 6.5. Ninguna representa la magnitud Richter, pero ambas tienen importancia para describir el tamaño de un sismo. Sin embargo, resulta que la magnitud de superficie correlaciona mejor con la idea generalizada que tenemos de tamaño o dimensión de un sismo.

La magnitud momento,  $M_w$ , es considerada por muchos sismólogos como la mejor forma de medir el tamaño de un sismo. Las escalas  $M_L$ ,  $m_b$  y  $M_s$  no son adecuadas para medir terremotos muy grandes, porque después de un cierto tamaño entre escalas dan el mismo valor de magnitud aunque el terremoto sea más grande en términos de energía liberada. Esto se conoce como Saturación, la escala  $M_s$  se satura alrededor de un valor de 7.5, significando que la amplitud de onda no aumenta linealmente con la magnitud a partir de un valor de 7.5 y se hacen insensibles a un aumento en el tamaño de los sismos; la escala  $m_b$  se satura a valores aún menores, alrededor de 6.5.

La introducción del momento sísmico en la sismología ha aportado una nueva medida para designar el tamaño de un sismo que está en función directa de las propiedades físicas de la roca y de las dimensiones del área que sufre ruptura. Es un mejor parámetro para caracterizar los sismos, aún cuando es más difícil de determinar que la magnitud.

La escala tiene una transición suave con la escala de magnitud  $M_s$ , así que se considera como una continuación natural de la escala  $M_s$ .

### 3.5.2 Intensidad y Escala de Intensidad.

La intensidad se establece como una medida de la fuerza del movimiento del terreno, es decir del grado en que la vibración es registrada y sentida en una determinada localidad, o de los efectos y daños causados por el sismo; teniendo en cuenta que el valor que se le puede asignar no es único.

La intensidad es una variable que depende del sitio de observación; generalmente ésta es mayor en el área epicentral y disminuye en función de la distancia a la fuente sísmica. Existen dos formas para describir y medir la intensidad, las cuales son:

1. *Apreciación Subjetiva*: Esta es la forma más antigua y no instrumental de los efectos aparentes producidos por el evento sísmico en un sitio dado; para ello se usan escalas que asignan diferentes grados a la forma en que la vibración del terreno es sentida y según los daños causados a las edificaciones.
2. *Medida Instrumental*: Esta forma pretende ser más racional, en cuanto a que es una medida

instrumental de la amplitud del movimiento del terreno y para ello se emplean parámetros tales como: aceleración, velocidad y desplazamiento, que se obtienen de los registros de instrumentos de movimiento fuerte o acelerógrafos. La aceleración expresada en porcentaje de la gravedad terrestre, ha sido hasta la fecha la medida instrumental más generalizada y un parámetro para evaluar las fuerzas sísmicas inducidas en las estructuras.

Las escalas de Intensidad se utilizan para cuantificar o medir los temblores y están relacionadas, con los daños producidos por el sismo. Así, esta escala está relacionada con el impacto del evento en la población, las construcciones y la naturaleza.

El primer intento para catalogar los temblores se hizo por medio de una clasificación en cuanto a sus efectos observables. Se propusieron escalas de intensidad desde los últimos años del siglo pasado. En 1902, Mercalli propuso una tabla, modificada posteriormente en 1931 y desde entonces se ha llamado escala Modificada de Mercalli (MM). Esta no es la única; pero si la más frecuentemente usada en nuestro continente, consta de XII grados y acompañado cada uno de una descripción de cómo es sentido el movimiento sísmico por las personas, de sus efectos y de los daños ocasionados por el evento. La escala Modificada de Mercalli (MMI), está dada en la Tabla V.

Otras escalas de intensidad son las de Rossi-Forel de diez grados y la escala MSK (Medredev-Sponheuer-Karnik) de doce grados, ambas en uso común en Europa, y la escala japonesa JMA (Japanese Meteorological Agency - Agencia Meteorológica de Japón) de siete grados. La escala MSK es una versión modificada de la escala Mercalli MM.

TABLA V  
Escala de Intensidades Sísmicas Mercalli Modificada (1931)

Grado	Descripción
I	Sacudida sentida por muy pocas personas en condiciones especialmente favorables.
II	Sacudida sentida sólo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos altos de los edificios. Los objetos suspendidos pueden oscilar.
III	Sacudida sentida claramente en los interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios, muchas personas no la asocian con un temblor. Los vehículos de motor estacionados pueden moverse ligeramente. Vibración como la originada por el paso de un carro pesado. Duración estimable.
IV	Sacudida sentida durante el día por muchas personas en los interiores, por pocas en el exterior. Por la noche algunas despiertan. Vibración de vajillas, vidrios de ventanas y puertas; los muros crujen. Sensación como de un carro pesado chocando contra un edificio, los vehículos de motor estacionados se balancean claramente.
V	Sacudida sentida casi por todo mundo; muchos despiertan. Algunas piezas de vajillas, vidrios de ventanas, etcétera, se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; objetos inestables caen. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Detención de relojes de péndulo.
VI	Sacudida sentida por todo mundo; muchas personas atemorizadas huyen hacia fuera. Algunos muebles pesados cambian de sitio; pocos ejemplos de caída de aplanados o daño en chimeneas. Daños ligeros.
VII	Advertido por todos. La gente huye al exterior. Daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción. Daños ligeros en estructuras ordinarias bien construidas; daños considerables en las débiles o mal planeadas; ruptura de algunas chimeneas. Estimado por las personas conduciendo vehículos en movimiento.
VIII	Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno; considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial; grande en estructuras débilmente construidas. Los muros salen de sus armaduras. Caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados se vuelcan. Arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades. Cambio en el nivel del agua de los pozos. Pérdida de control en las personas que guían carros de motor.
IX	Daño considerable en las estructuras de diseño bueno; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial. Los edificios salen de sus cimientos. El terreno se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen.
X	Destrucción de algunas estructuras de madera bien construidas; la mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen con todo y cimientos; agrietamiento considerable del terreno. Las vías del ferrocarril se tuercen. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes. Invasión del agua de los ríos sobre sus márgenes.
XI	Casi ninguna estructura de mampostería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el terreno. Las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio. Hundimientos y derrumbes en terreno suave. Gran torsión de vías férreas.
XII	Destrucción total. Ondas visibles sobre el terreno. Perturbaciones de las cotas de nivel. Objetos lanzados en el aire hacia arriba.

Fuente: J. M. Espíndola y Z. Jiménez. 1984. "Terremotos y Ondas Sísmicas".

### 3.6 *Parámetro de Aceleración.*

#### 3.6.1 Aceleración de un Sismo

El parámetro más frecuentemente empleado para designar la intensidad de la sacudida sísmica es la aceleración máxima del terreno, expresada en gals ( $\text{cm}/\text{seg}^2$ ) o en porcentaje de la gravedad (%g). Otro parámetro importante lo constituye la velocidad del terreno en  $\text{cm}/\text{seg}$ , pero a diferencia de la aceleración que es registrada instrumentalmente, la velocidad y el desplazamiento del terreno se determinan en forma indirecta mediante un proceso de integración del registro de aceleraciones.

#### 3.6.2 Acelerogramas.

Los acelerogramas se presentan generalmente en forma de un registro en diferentes materiales como: película de 35 ó 70 mm, papel fotográfico de 30 cm de ancho, papel encerado (en instrumentos japoneses), y digitalmente.

Un acelerograma típico, contiene normalmente siete trazos, a saber:

1. Código de tiempo absoluto, recibido mediante enlace de radio (incluido en algunos instrumentos únicamente)
2. Aceleración horizontal en sentido del eje principal del acelerógrafo (instrumento que registra aceleraciones de la sacudida violenta del terreno en el área epicentral). Que es la dimensión larga del instrumento.
3. Trazo fijo para propósito de digitalización y corrección.
4. Aceleración en sentido vertical.
5. Trazo fijo.
6. Aceleración horizontal en sentido perpendicular al eje principal del instrumento, y
7. Marcas de tiempo relativo, generalmente dos pulsos por segundo, generadas por un circuito de tiempo interno.

Una inspección visual del acelerograma y unas pocas medidas a escala revelan aspectos muy

significativos del movimiento sísmico: aceleración máxima del terreno, contenido de frecuencias o períodos de las ondas predominantes, relación entre las amplitudes de las oscilaciones verticales y horizontales, duración de la fase de movimiento intenso, y distancia epicentral.

### 3.6.3 Atenuación de la Aceleración

Se dice que existe una atenuación de las ondas sísmicas con la distancia, cuando éstas se alejan de la fuente generadora, disminuyendo de esta forma la amplitud de las vibraciones y la intensidad del movimiento del terreno.

La intensidad del movimiento del terreno a determinada distancia de la fuente se expresa mediante relaciones empíricas de atenuación. Siendo la aceleración un parámetro adecuado para describir la intensidad, los investigadores han propuesto relaciones empíricas entre la aceleración máxima del terreno  $A$ , la magnitud del evento  $M$ , y la distancia epicentral  $R$ , o la distancia focal  $R_f$ .

Estas relaciones de atenuación permiten estimar en forma aproximada la aceleración máxima del terreno en un sitio dado situado a cierta distancia de la falla causativa o de la fuente sísmica. Las relaciones de atenuación proporcionan un medio aproximado para la estimación de la máxima intensidad probable durante futuras sacudidas sísmicas y son, por lo tanto, la base para la determinación del riesgo sísmico.

## 3.7 *Causas Principales de los Sismos*

En la actualidad es bien comprendida la relación existente entre los grandes movimientos que constituyen los terremotos y el lento movimiento geológico de las inmensas placas que constituyen la corteza terrestre. Hace más de un siglo que se habló por primera vez de la deriva de los continentes, y por muchos años se ridiculizó este concepto, mas hoy en día, es bien aceptado el hecho de que “los continentes derivan”, es decir, que las placas se muevan, y esto explica muchos procesos geológicos, incluyendo los Terremotos o Sismos.

### 3.7.1 Tipos de Terremotos

La gran mayoría de Terremotos se atribuyen al movimiento en el interior de la tierra y al consecuente movimiento de las placas tectónicas y es por ello que se conocen como *Terremotos Tectónicos*. Por otro lado, cuando un sismo es producido directamente por el movimiento del magma dentro de un volcán, se le denomina *Terremoto Volcánico*.

Ya en el siglo pasado varios autores habían sugerido el origen tectónico de los terremotos, sin embargo no todos los sismos ocurren en la zona de contacto entre placas adyacentes; muchos eventos son generados en fallas geológicas locales y se les denomina *Sismos Intraplaca*. No obstante el tectonismo principal en la corteza se desarrolla en las zonas cercanas a los límites de las placas litosféricas y la geología local es afectada por el movimiento relativo y por la interacción entre las mismas.

Las características entre los dos tipos de sismos son diferentes y la mayoría de ellos, incluyendo casi todos los destructores, son de origen tectónico. Los volcánicos por lo general no logran magnitudes superiores a 5.5<sup>5</sup>. Actualmente se considera que con excepción de algunos sismos menores de origen volcánico y los sismos generados por la actividad humana, conocidos como *Sismos Inducidos*, todos los temblores y terremotos son la consecuencia de una fractura violenta en el material de la litósfera.

En resumen los dos tipos más importantes de sismos son los *Terremotos Tectónicos*, resultados de la liberación súbita de la energía acumulada por deformación de la tierra y los *Terremotos Volcánicos* asociados con un movimiento de magma, cuyos potenciales de destrucción varían de acuerdo a las condiciones del área afectada por el sismo.

## 3.8 Consecuencias de los Terremotos

El acelerado desarrollo de la ciencia y el proliferado proceso de industrialización de los descubrimientos científicos ha permitido al hombre comprender los orígenes y las causas de los terremotos, entender sus efectos y evitar, o por lo menos atenuar, sus consecuencias. Al mismo tiempo, el

---

<sup>5</sup> Julian Bommer (1994), Sismología para Ingenieros.

desarrollo industrial ha llevado a una ampliación y agravación de sus consecuencias al crear nuevos riesgos de creciente gravedad que todavía son difíciles de controlar y dominar.

Los sismos manifiestan consecuencias directas e indirectas, como consecuencias directas, los sismos matan, hieren, destruyen las edificaciones, los servicios públicos esenciales, las vías de comunicación, represas, los medios de comunicación, etc.

Además de la destrucción directa de la vida humana y de la propiedad, las epidemias, la contaminación por escape de sustancias peligrosas al suelo, los incendios y los efectos secundarios (concernientes específicamente a esta investigación) son algunas de las consecuencias indirectas a corto plazo.

En el caso de El Salvador, el número de muertos que los terremotos han causado no es muy elevado, si se compara con las cifras de mortalidad debidas a la guerra, la delincuencia y los accidentes de tránsito. Sin embargo, el impacto sobre el país y su desarrollo es determinante. La Tabla VI presenta los datos económicos causados por los sismos más importantes en el mundo entre 1972 y 1990.

Evidentemente, la pérdida económica en El Salvador en 1986 fue relativamente pequeña en términos globales, sobre todo si se compara con pérdidas recientes como la estimación de 150 billones de dólares estadounidenses en el terremoto de Kobe, Japón, en enero de 1995.

Sin embargo, lo importante es el impacto relativo a la economía del país y esto está representado por la última columna del cuadro, en la que se muestra la pérdida económica como porcentaje del tamaño de la economía, representado por el Producto Nacional Bruto (PNB). Las cifras más elevadas corresponden a 3 terremotos en Centro América y la segunda es el sismo de San Salvador en 1986.

Esto refleja la susceptibilidad de las economías pequeñas a ser seriamente afectadas por este tipo de desastre, debido a la fragilidad y concentración de la economía en zonas propensas a semejantes cataclismos. Es importante señalar que las cifras en la Tabla VI, se refieren a las pérdidas directas ocasionadas por los terremotos y no toman en cuenta la pérdida de la producción, la interrupción del comercio y el desempleo generado por el terremoto.

TABLA VI  
Pérdidas económicas directas Ocasionadas por terremotos, 1972-1990

Ciudad, país y año	Pérdida (Billones de US\$)	PNB* (Billones de US\$)	Pérdida/PNB (Porcentajes)
Managua (1972)	2.0	5.0	40.0
San Salvador (1986)	1.5	4.8	31.0
Guatemala (1976)	1.1	6.1	18.0
Montenegro, Yugoslavia (1979)	2.2	22.0	10.0
Manjil, Irán (1990)	7.2	100.0	7.2
Campania, Italia (1980)	45.0	661.8	6.8
Bucarest, Rumania (1977)	0.8	26.7	3.0
México, D.F., México (1985)	5.0	166.7	3.0
Armenia, Ex-URSS (1988)	17.0	566.7	3.0
Luzón, Filipinas (1990)	1.5	55.1	2.7
Kalamata, Grecia (1986)	0.8	40.0	2.0
Tangshang, China (1976)	6.0	400.0	1.5
Loma Prieta, EE.UU. (1989)	8.0	4,705.8	0.2

\* Producto Nacional Bruto correspondiente al año en que ocurrió el sismo.

Fuente: Revista PRISMA No.18, "Terremotos, urbanización y riesgo sísmico en San Salvador", Bommer (1996).

Sin embargo, el número de víctimas y las pérdidas económicas no guardan una relación directa entre sí. Algunos eventos han causado cuantiosos daños materiales y pérdidas económicas elevadas; pero afortunadamente han reclamado un reducido número de muertos, por el contrario, un elevado número de víctimas puede ir acompañado de pérdidas económicas relativamente bajas. A su vez una catástrofe grande puede reclamar un elevado número de víctimas y simultáneamente causar grandes pérdidas.

En resumen los daños causados por los terremotos no deben atribuirse sólo a la sacudida violenta de la tierra, sino también a otros fenómenos que acompañan a los movimientos sísmicos. Considerables daños y numerosas víctimas han causado los (Tsunamis), así como los incendios desatados en ciudades a consecuencia de un terremoto, los desprendimientos de tierra en zonas montañosas que producen avalanchas y deslizamientos, o la licuefacción de suelos no cohesivos.

## CAPITULO IV

### PELIGROSIDAD SISMICA

#### **4.1 Amenaza o Peligrosidad Sísmica y Riesgo Sísmico.**

Para el diseño de obras civiles en regiones sísmicas y para la evaluación de la cuantía de daños probables causados por eventos futuros, se requiere estimar la intensidad máxima del movimiento del terreno, entendiéndose por intensidad, cualquier parámetro que mida la fuerza del movimiento. Para ello se utilizan modelos de riesgo sísmico que se basan en la información disponible sobre la sismicidad (histórica y de registros instrumentales), la geología local y la tectónica regional. El análisis de riesgo sísmico se basa en considerar los terremotos no como desastres naturales que no se pueden predecir, ni evitar; si no como fenómenos naturales cuyos efectos destructivos se pueden mitigar con la aplicación de la ciencia y la tecnología.

En los estudios de riesgo sísmico se utilizan dos conceptos que son: *Amenaza o Peligrosidad Sísmica*, como el factor natural y *Riesgo Sísmico*. Desafortunadamente muchos especialistas usan ambos términos indistintamente. La Amenaza sísmica describe el potencial de daño asociado a un sismo en relación con los fenómenos naturales de la sacudida, que pueden resultar en graves consecuencias para la sociedad, tales como la destrucción de edificios o la pérdida de vidas humanas. El Riesgo sísmico es la probabilidad de ocurrencia de esas consecuencias. El resultado de un análisis de Peligrosidad Sísmica podría ser una descripción de la intensidad de un sismo de una magnitud determinada o un mapa que muestre los niveles de movimiento del terreno en varias partes del país con igual probabilidad de excedencia<sup>6</sup>, por otro lado el resultado del análisis de Riesgo Sísmico podría ser la probabilidad de daño (en dólares) o de muertes debido al sismo de tal magnitud.

---

<sup>6</sup> *Probabilidad de Excedencia*: La probabilidad de que ocurra por lo menos un evento mayor que cierto tamaño durante un tiempo definido.

El Riesgo Sísmico es una expresión probabilística del producto de la amenaza sísmica por sus consecuencias, es por eso que para el cálculo del Riesgo Sísmico se necesita conocer la amenaza sísmica, definiendo la Amenaza Sísmica se llega a completar parte del proceso de estimación del riesgo.

La Amenaza o Peligrosidad Sísmica es un parámetro que cuantifica la ocurrencia de futuros eventos sísmicos y las acciones sísmicas asociadas (Deslizamientos de Tierra, Licuefacción, Tsunamis, y otros) que puedan tener efectos adversos sobre el hombre y sus actividades y se expresa en términos de probabilidad de que determinado valor (intensidad, aceleración, etc.) sea excedido en un tiempo dado.

La peligrosidad sísmica sólo se convierte en un Riesgo Sísmico cuando hay personas, edificios u otras obras expuestas a los movimientos del terreno. Un terremoto de alta magnitud en una zona despoblada o en el mar, lejos de la costa, no presenta directamente ningún riesgo. La peligrosidad o probabilidad de que ocurran movimientos sísmicos en una zona determinada, refleja características de la naturaleza que no pueden ser modificadas. De modo que el terremoto se puede considerar “natural”; pero no así el desastre (si ocurre), que le sigue, dado que las víctimas son ocasionadas por la caída de edificios construidos por el hombre.

#### **4.2 Peligrosidad Sísmica en Términos de Movimientos Fuertes**

Con el fin diseñar una estructura resistente a todo movimiento perceptible y potencialmente destructivo (fuerte) que se pueda dar durante la vida útil de la edificación en el emplazamiento o lugar donde se prevé construir, el ingeniero debe establecer una metodología para la evaluación de estos movimientos. Algunos de los aspectos básicos de la metodología propuesta para la determinación de la Peligrosidad sísmica para un sitio, en términos de movimientos fuertes se presentan a continuación.

#### 4.2.1 Métodos Determinísticos y Probabilísticos

El punto de partida para determinar los movimientos sísmicos esperados en un emplazamiento es una ecuación de atenuación<sup>7</sup> que relacione el movimiento con la magnitud del sismo y la distancia desde la ruptura.

Si se puede determinar la ubicación y la magnitud del sismo, que se considerará para el diseño, se puede determinar directamente el nivel de movimiento a partir de la ecuación. Esto representa un método determinístico de abordar la evaluación de peligrosidad, y podría tener aplicación, por ejemplo, para un emplazamiento situado cerca de una falla importante. Se supondría la ubicación del sismo para el diseño, situándolo en la parte de la falla donde sería menos favorable para el emplazamiento. El tamaño del sismo también estaría evaluado determinísticamente, considerando que tendría la misma magnitud que el mayor terremoto histórico en la falla, o utilizando una relación empírica entre la magnitud y la longitud de ruptura.

El análisis determinístico es todo aquel que para la mayor parte de su desarrollo hace uso de modelos de un valor determinado para llegar a una descripción similar del escenario de amenaza por terremotos. Un ejemplo simple de la presentación determinista de la amenaza por terremotos podría ser: El peligro de terremotos en un sitio **X** es una aceleración pico del suelo<sup>8</sup> de 0.5g (50% la aceleración de la gravedad) como resultado de un terremoto de magnitud 6.5 ocurrido en una falla **Y** a una distancia de 10 Km.

Este análisis requiere la especificación de tres elementos básicos; una fuente sismogénica<sup>9</sup> (Falla **Y**), un sismo de control de un tamaño específico (Magnitud 6.5) y una forma de establecer la peligrosidad o la amenaza, en este caso la aceleración pico del suelo (0.5g) a una distancia específica (10 Km.) del emplazamiento.

Hasta el momento ha resultado imposible predecir los fenómenos sísmicos de un modo determinista, el método conlleva varios inconvenientes. El primero es que hace necesaria la ubicación

---

<sup>7</sup> *Ecuación de Atenuación*: Una fórmula que relaciona un parámetro del movimiento fuerte con la distancia recorrida desde la fuente y otros parámetros de la fuente, del trayecto y del sitio (Bommer, 1994).

<sup>8</sup> *Aceleración Pico del Suelo*: La más alta aceleración del suelo inducida por un sismo en un lugar en particular (Reiter, 1990).

<sup>9</sup> *Fuente Sismogénica*: Una fuente que ha producido varios sismos o que podría generar sismos futuros (Bommer, 1994).

exacta de la fuente sismogénica, que puede resultar bastante difícil en una región con muchas fallas pequeñas, como por ejemplo la cadena volcánica de Centro América. Además, hay que relacionar la sismicidad con cada fuente y la incertidumbre en las ubicaciones epicentrales puede ser grande. El segundo problema es que el método no ofrece la posibilidad de evaluar la probabilidad de que ocurra el sismo seleccionado para el diseño, y entonces representa un nivel de peligro desconocido. Estos problemas pueden ser superados por el uso de métodos probabilísticos que permitan la inclusión del hecho de que no se sabe ni donde ocurrirán los sismos durante la vida útil de la estructura, ni la magnitud que éstos tendrán. En lugar de fijar la ubicación y la magnitud se asume una distribución de los sismos en el espacio y en el tiempo, y se evalúa su probabilidad de ocurrencia; estos métodos dan resultados que son consistentes con la definición de peligrosidad sísmica.

La validez de los resultados de los análisis de probabilidades depende de la cantidad y la calidad de los datos empleados, la información científica sobre los sismos es aún muy escasa, especialmente para países como el nuestro, de modo que la extrapolación hacia el futuro y la predicción a partir de datos recolectados en un plazo corto no es totalmente confiable. Los parámetros utilizados en los modelos probabilísticos y las hipótesis adoptadas sobre la sismicidad y leyes de atenuación introducen factores de incertidumbre; sin embargo los estudios probabilísticos basados en una buena interpretación de la sismicidad histórica y las condiciones geológicas y tectónicas, son valiosos para evaluar la sismicidad futura y la amenaza sísmica de determinada región.

El método fundamental para la evaluación probabilística de peligrosidad sísmica se debe a *Cornell* (1968), donde el objetivo fundamental es determinar la probabilidad de excedencia de un determinado nivel de movimiento dentro de la vida útil de la estructura; es decir, lo que interesa al ingeniero no es el número de sismos que puedan ocurrir sino la cuestión de que ocurrirán sismos o no, la probabilidad de que determinado valor de aceleración o intensidad del movimiento del terreno, o que ciertos efectos o consecuencias económicas producidas por un sismo, sean excedidos durante un período de exposición dado. Por ejemplo si se diseña una estructura para resistir los efectos de un terremoto de determinado nivel de magnitud, el ingeniero querrá saber la probabilidad de que ocurra por lo menos un

sismo de este tamaño o mayor, durante la vida útil de la estructura; la cual es igual a uno menos la probabilidad de que no ocurra el suceso de las condiciones prescritas en el análisis.

Este método ha sido base para muchos trabajos de evaluación de peligrosidad. Posteriormente fue desarrollado y ampliado por S. T. Algermissen et al en 1972, describiendo la sismicidad de una región de un modo más detallado basándose en el estudio de:

- a) **La Tectónica Regional.** Los límites entre placas litosféricas son zonas tectónicamente muy activas y en ellas se genera más del 90% de los terremotos que ocurren en la tierra.
- b) **Geología Local.** La predicción de futuros eventos sísmicos no se puede hacer exclusivamente con base en la información sismológica, ésta debe considerar también las fallas locales como fuente generadora de los Sismos Intraplaca, incluyendo además la determinación de las estructuras geológicas, relieve del terreno, localización y cartografiado de las fallas activas o recientemente activadas, etc. El fallamiento recibe en general mayor atención; pues las fallas presentan la principal fuente generadora de sismos superficiales.
- c) **Información histórica sobre eventos destructivos.** Consistente en información de diversas publicaciones y documentos existentes en archivos de la región o extra regionales y en bibliotecas del área; y que aportan información valiosa para aumentar, en algunos casos, el conocimiento de eventos previamente reportados y en otros casos para documentar eventos que no habían sido investigados.
- d) **Información estadística de registros instrumentales.** En la región de Centro América, el primer evento sísmico localizado en forma instrumental, fue el terremoto de 1902 ( $M_s = 7.9$ ), ocurrido en la costa pacífica de Guatemala y fue en 1896 cuando se instaló por primera vez en El Salvador un equipo sismográfico. A principio de los setentas se instaló en Centro América una red sismográfica y centros de registros que permite la elaboración de una base de datos con los parámetros focales usuales y una variedad de datos macrosísmicos que sugieren algunas veces la localización y frecuencia de eventos futuros.

- e) **Mapas de localización de eventos y de fuentes generadoras.** La información básica que deben contener estos mapas es la fecha y hora de ocurrencia, las coordenadas del foco en grados de longitud y latitud, la profundidad focal y magnitud del evento. Además, es necesario establecer las fuentes potencialmente generadoras de sismos, incluyendo su delimitación espacial, su grado de actividad sísmica, etc., con relación a toda la información sismológica, geológica y geofísica disponible.
- f) **Condiciones Locales del Suelo.** El parámetro fundamental del sitio es la geología superficial, porque puede modificar la amplitud y la frecuencia del movimiento, al mismo tiempo el resultado de la evaluación de la peligrosidad sísmica, definida basándose en parámetros como aceleraciones máximas, depende básicamente de las condiciones de suelo, de las cuales, en resumen se obtiene una respuesta más objetiva.

La peligrosidad sísmica puede evaluarse con base en información sobre la sismicidad de una zona y las características del movimiento sísmico, es decir, como una función de la magnitud del sismo y la distancia del punto hasta la fuente sísmica. El movimiento se mide con la aceleración máxima del terreno y comúnmente se define la peligrosidad sísmica como la aceleración del terreno con una probabilidad del 90% de no ser excedida durante un período de 50 años, que corresponde a la vida útil de una estructura normal. Estos valores fueron utilizados por primera vez para estudios en los Estados Unidos y han sido adoptados casi universalmente. Este nivel de peligrosidad corresponde al movimiento sísmico que tiene un período de retorno (un intervalo promedio entre eventos) de 475 años<sup>10</sup>.

Sobre esa base se construyen mapas de peligrosidad, evaluando la peligrosidad en una serie de puntos y trazando curvas de igual nivel de aceleración. Tales mapas además de identificar las áreas de mayor peligro para fines de planificación, establecen los niveles de aceleración que se deben considerar en el diseño sísmico.

---

<sup>10</sup> Julián Bommer (1996), Revista PRISMA No.18

Existen cuatro estudios (Norwegian Seismic Array, NORSAR/ Centro de Prevención de Desastres Naturales en Centro América, CEPREDENAC, 1995; Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, 1993; Stanford University, 1990; United States Geological Survey, USGS, 1988) que han generado mapas de peligrosidad en El Salvador (Ver figura 4.1). Las diferencias entre los resultados de los cuatro estudios en cuanto a la distribución geográfica y al nivel de la peligrosidad, son grandes y se deben a las incertidumbres que conllevan los datos disponibles sobre la sismicidad en el país y sobre las características del movimiento fuerte en la región.

Por otra parte, en la elaboración de esos mapas, si bien se consideran los parámetros que representan la fuente sísmica y la trayectoria entre la fuente y el lugar de interés (distribución, magnitud y frecuencia de los sismos, así como la atenuación con la distancia de las aceleraciones generadas en el terreno) se han ignorado las características y efectos locales del sitio, en muchos casos los depósitos de suelos blandos y algunos accidentes topográficos pueden ampliar y prolongar el movimiento sísmico, haciendo así mucho más dañina la sacudida.

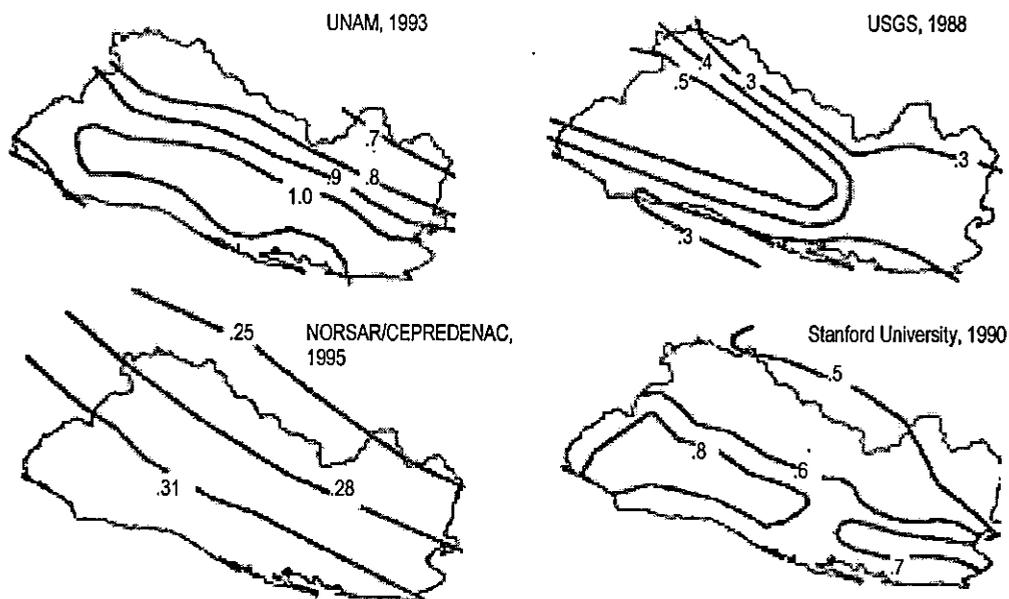


Fig. 4.1 Mapas de Peligrosidad Sísmica para El Salvador (Tomado de Bommer, 1996).

En países de alta actividad sísmica es común preparar mapas no solamente de zonificación sísmica (peligrosidad sísmica), sino también de microzonificación para centros urbanos importantes. Estos mapas de microzonificación muestran la variación local de la peligrosidad debida a la presencia de fallas geológicas y de los depósitos de suelos. La microzonificación sísmica considera para cada sitio las condiciones locales de suelo, la topografía y las singularidades geológicas y sismológicas, asimismo los efectos de amplificación, la inestabilidad de taludes y el efecto de la licuefacción. Un estudio de microzonificación debe de identificar zonas donde el suelo puede modificar el movimiento sísmico y cuantificar estas modificaciones con base en las propiedades dinámicas de las capas de suelo.

El reglamento publicado en 1994, por el Ministerio de Obras Públicas con el título de Norma Técnica para el Diseño Sísmico incluye por primera vez un estudio de peligrosidad sísmica llevado a cabo por la Universidad Nacional Autónoma de México (Ver Figura 4.2). La zona I que incluye la costa y la cadena volcánica, es de mayor peligro que la zona II<sup>11</sup>.

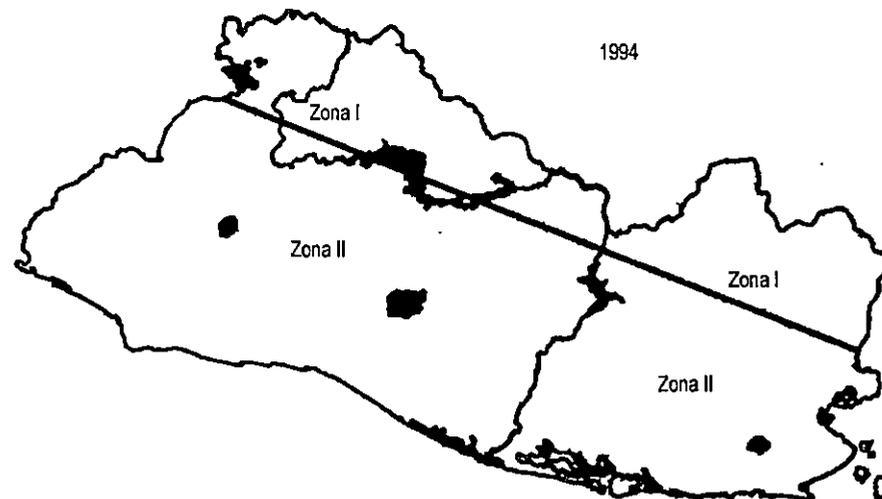


Fig. 4.2 El Salvador: Zonificación sísmica 1994 (Tomado de Bommer, 1996).

<sup>11</sup> Julián Bommer (1996), Revista PRISMA No.18

#### 4.2.2 Peligrosidad en Fuentes Sismogénicas.

La metodología de evaluación de la peligrosidad sísmica se aplica de acuerdo a la forma en que la Fuente Sismogénica está definida. Las fuentes sismogénicas pueden representarse como:

- a) **Fuentes Sismogénicas Puntuales.** En realidad, la fuente sismogénica no se representaría nunca como un punto, pero el ejemplo sirve para desarrollar el análisis en un emplazamiento determinado, y puede ser extendido fácilmente al caso de un conjunto de fuentes puntuales independientes, donde la probabilidad de excedencia resultaría de multiplicar la probabilidad de excedencia de cada una de las fuentes.
- b) **Fuentes Sismogénicas de línea.** Cuando existe una falla geológica cuya ubicación está bien determinada y con la cual es posible relacionar claramente la sismicidad de la zona donde se encuentra, se puede tomar la falla como una fuente lineal.
- c) **Fuentes Sismogénicas de área.** Una Fuente se define generalmente como área cuando la actividad sísmica no puede asociarse claramente a una falla en particular. El área se delimita por la distribución de epicentros y el conocimiento de la tectónica de la región. Sólo debe haber un régimen tectónico dentro de un área sismogénica, por ejemplo en los estudios de Peligrosidad Sísmica en El Salvador se han considerado la cadena volcánica y la fosa de subducción como áreas distintas<sup>12</sup>.

Generalmente las fuentes se idealizan en líneas fuentes o áreas fuentes (de sección circular), en donde se resume toda la información geológica y geotectónica disponible.

#### 4.3 *Peligrosidad Sísmica Secundaria.*

El término Peligrosidad Sísmica Secundaria se refiere a todo tipo de fallas del terreno asociadas con terremotos. Con la excepción del fallamiento superficial relacionado al mecanismo focal del terremoto, que ocurre como resultado de un cierto nivel, frecuencia y duración de los sismos. Así, el conocimiento de las características, en un área específica, de futuros eventos sísmicos (estudios de

<sup>12</sup> Julián Bommer (1994), Sismología para Ingenieros

peligrosidad sísmica), es una necesidad, pero no condición suficiente para la definición del peligro geológico, para ello se requiere también, conocer las propiedades dinámicas de los materiales geológicos.

Para muchos tipos de peligros geológicos tales como deslizamientos, la relación entre las propiedades dinámicas de los materiales geológicos y las características del sismo que resultan un peligro geológico no son bien conocidas.

En cualquier evento, la investigación geológica detallada de un lugar es casi siempre necesaria para definir, aún cualitativamente la naturaleza de la Peligrosidad Sísmica Secundaria.

La frecuente ocurrencia de terremotos en los últimos años y los daños ocasionados en diferentes partes del mundo, constituyen una razón más para realizar diseños adecuados en obras de construcción; sobre todo en proyectos urbanos, donde deben tomarse en consideración variables como litología del subsuelo y fallas activas que pueden afectar y a las que están expuestas nuestras construcciones hoy en día.

### **4.3.1 Fenómenos Sísmicos Secundarios**

Entre los Fenómenos de Peligrosidad Sísmica Secundaria o Peligros Geológicos más importantes y de los que se requieren estudios para determinar el grado de amenaza que representan, pueden mencionarse los siguientes: Amplificación de las ondas Sísmicas, Deslizamientos de tierra, Licuefacción, Tsunamis, y Ruptura del terreno.

#### **4.3.1.1 Amplificación del Movimiento del Terreno**

La cuantía de los daños de un sismo, está en función de la energía liberada y de la distancia al epicentro, sin embargo, la sacudida del terreno varía de un sitio a otro y depende de la conformación del subsuelo y de la forma del mismo; es decir, la atenuación de las ondas sísmicas dependerá de los factores siguientes:

### A. Condiciones Geológicas del Subsuelo

Teóricamente se ha determinado, que la aceleración asociada a las ondas sísmicas que viajan a través de un cuerpo sólido, debe incrementarse al pasar de un medio de alta velocidad de propagación (lecho rocoso) a un medio de baja velocidad (sedimentos blandos). Es así como este aumento dependerá de la velocidad de propagación de los medios en que viajen las ondas y de la profundidad de la columna de suelo.

Las condiciones locales del subsuelo tienen un efecto sobre la amplitud del movimiento en la superficie; dado que en general, la intensidad de la sacudida del terreno y la cuantía de los daños será mayor en suelos blandos sin consolidar que en suelo firme o rocoso ver figura 4.3.

En investigaciones recientes y referentes a los daños ocasionados a las edificaciones por los sismos, se ha comprobado este efecto de amplificación del movimiento, al pasar las ondas de suelos aluviales blandos a suelos firmes, además de un efecto de resonancia entre los edificios con el movimiento de la columna de suelo, cuyo período predominante de vibración aumenta con la profundidad del estrato.

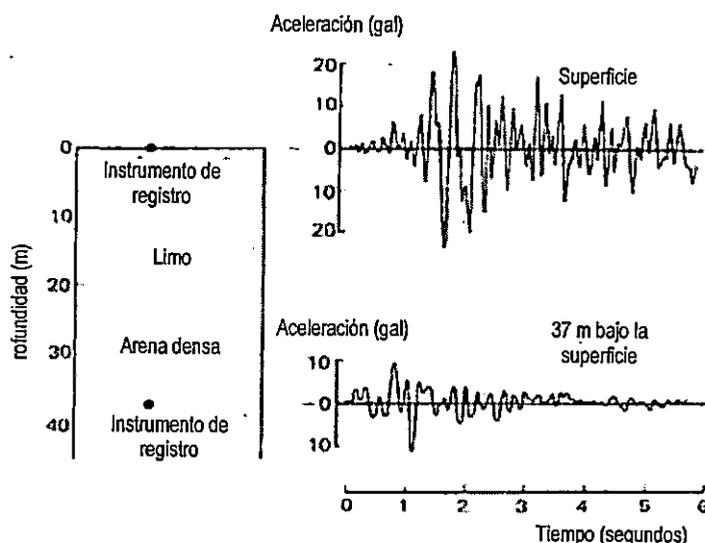


Fig. 4.3 Registro que muestra el efecto de la Amplificación. El inferior es el registro de un instrumento a 37 m de profundidad; el superior, el registro del movimiento del terreno en la superficie. La comparación de ambos registros muestra claramente el efecto de amplificación en estratos de aluvión y suelos blandos. Fuente: Franz Sauter, 1989 "Introducción a la Sismología"

Cuando las ondas de cuerpo P y S alcanzan la superficie, gran parte de su energía es reflejada de nuevo hacia el interior de la tierra, haciendo que la superficie terrestre sea afectada por trenes de ondas que se mueven simultáneamente hacia arriba y hacia abajo. Es así como, generalmente cerca de la superficie ocurre una amplificación de las ondas debido al tren de ondas incidente.

## B. Condiciones de Topografía

La topografía del terreno influye de manera significativa en la intensidad del movimiento sísmico, pudiendo mostrar ya sea un efecto de amplificación o atenuación del mismo.

Resultados de análisis teóricos, indican que las formas topográficas especialmente como montañas y valles, muestran varios grados de amplificación. En los bordes de valles, crestas y laderas se ha determinado analíticamente un incremento en la intensidad de la vibración, en cambio, en el fondo de los valles, un efecto de atenuación (Figura 4.4). Por otro lado, en algunos terremotos se ha observado que existe también amplificación del movimiento, debido a irregularidades en la topografía del terreno, al observar la cuantía de daños en las edificaciones situadas en los bordes de valles con respecto de otras situadas en terrenos planos.

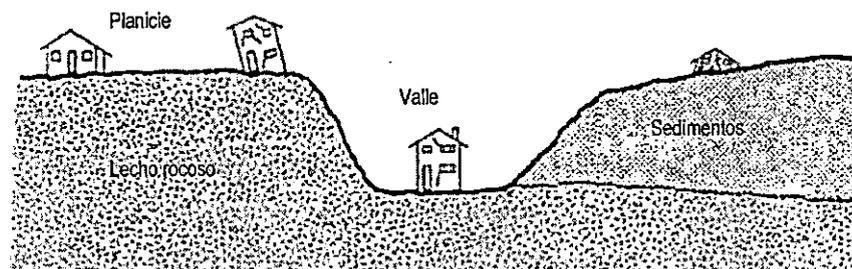


Fig. 4.4 El efecto de la amplificación de acuerdo a las condiciones topográficas. En los bordes de valles se ha observado un efecto de amplificación y en el fondo de los mismos un efecto de atenuación. Los depósitos de suelo blando amplifican también el efecto de la sacudida del terreno. Fuente: Franz Sauter, 1989, "Introducción a la Sismología".

Los resultados que influyen en la intensidad del movimiento cerca de discontinuidades topográficas son varios. Generalmente, se acepta que el ángulo de incidencia, el tipo de las ondas sísmicas, la longitud de onda y la geometría de la aspereza topográfica son los parámetros más importantes. En valles, la amplificación está relacionada con el ancho de la depresión; generalmente la amplificación en

los bordes será mayor si la longitud de la onda sísmica es menor que el doble del ancho del valle. Las condiciones geológicas tienen una igual influencia significativa, ya que si los bordes de valles están constituidos por suelos poco consolidados, el efecto amplificador será aún mayor.

### **C. Direccionalidad de las Ondas Sísmicas.**

La dirección de las ondas tiene un efecto determinante en la intensidad del movimiento sísmico, pues ésta varía no sólo según la distancia al epicentro, sino también según la posición azimutal del sitio respecto de la fuente sísmica y a la dirección en que se propaga la ruptura a lo largo de la falla.

La propagación de la dislocación en determinada dirección genera ondas sísmicas que son registradas en forma diferente a ambos lados de la fuente; en sitios localizados en la dirección de propagación de la ruptura se registran mayores intensidades y frecuencias más altas, en cambio, en sitios localizados en el lado opuesto al punto inicial de ruptura y a la dirección de propagación se experimentan menores intensidades y frecuencias más bajas. Este fenómeno de direccionalidad, se cree que se debe a que las ondas tienden a concentrarse o polarizarse en la dirección en que progresa la ruptura.

### **4.3.1.2 Deslizamientos de Tierra.**

Los movimientos de tierra comprenden tanto los enormes deslizamientos de materiales, como los pequeños y frecuentes desplazamientos, que casi no se hacen notar. Sin embargo, si una masa de tierra o rocas, se mueve a lo largo de una zona o superficie definida, el movimiento toma el nombre de: deslizamiento.

#### **A. Mecanismo de los Deslizamientos de tierras.**

El término deslizamiento, se refiere a un desplazamiento rápido de una masa de roca, de suelo residual o de sedimentos adjuntos a una pendiente, en los cuales el centro de gravedad de la masa en movimiento avanza hacia abajo y afuera de la ladera, sucediendo que la relación entre la resistencia al esfuerzo cortante del terreno y el esfuerzo producido sobre una superficie potencial de deslizamiento sea disminuida previamente de un valor inicial mayor de uno a la unidad en el momento del deslizamiento.

La velocidad de un deslizamiento dependerá de la pendiente de la ladera y de la inclinación de la superficie de deslizamiento. Las superficies de deslizamiento de mayor pendiente, se forman en material homogéneo; tales como rocas irregulares fracturadas, arenas cementadas y materiales finos como loess, siendo su deslizamiento de forma súbita.

#### **B. Clasificación de los Movimientos de Tierras.**

Entre los principales tipos de deslizamientos pueden mencionarse los siguientes:

- a) *Deslizamientos de residuos o materiales sueltos:* Movimiento de materiales no consolidados sobre una superficie. La mayor parte de deslizamientos de este tipo, se deben a cambios de pendiente en el terreno; son abundantes y perjudiciales durante los trabajos de excavación o después de ellos, ya que éstos aumentan la inclinación de la pendiente o eliminan el soporte de los residuos o materiales no consolidados sobre la pendiente.

Los deslizamientos naturales de materiales no consolidados son numerosos a lo largo de las orillas de los ríos, lagos o el mar, cuando dichas orillas sufren aumentos de pendiente; por lo que se producen en cualquier pendiente en la que la resistencia interna se reduzca por debajo del límite de seguridad, como consecuencia de un cambio en el grado de compactación o en el contenido de humedad, o cuando aumenta la carga por deslizamientos o arrastres desde zonas muy altas o por lluvias, hasta ser mayor que la resistencia del suelo. Si un deslizamiento de materiales sueltos se produce en una pendiente fuerte, y con una gran velocidad, suele llamársele: avalancha.

- b) *Deslizamientos de rocas:* Movimiento de material esencialmente consolidado, constituido principalmente por un lecho de roca recientemente desprendido. Las estructuras que favorecen los deslizamientos en las rocas son: grietas muy inclinadas hacia afuera, superficies de falla y estratos débiles y escurridizos; la eliminación de material de sostén en la parte inferior, hace que se inicie el deslizamiento o abre el camino para él. En la construcción de carreteras las excavaciones en pendientes fuertes han ocasionado muchos deslizamientos.

- c) *Desprendimientos*: Este término se aplica a deslizamientos de materiales sueltos, generalmente de pequeña magnitud, que muestren un cierto grado de rotación hacia arriba acompañando al avance hacia adelante.

Los desprendimientos suelen ir acompañados de abombamientos en la base. Son especialmente comunes a lo largo de los cortes, terraplenes, y en las pendientes naturales deforestadas.

### C. Causas de los Deslizamientos

Las causas que provocan deslizamientos pueden ser divididas en externas e internas.

1. *Causas externas*: Son las que producen un aumento en el esfuerzo ejercido sobre el material junto a la pendiente, en cuyo caso no se aumenta la resistencia. Pueden ser:
  - a) *Aumento de pendiente en un talud*: Muchos de los taludes naturales se encuentran en una condición potencialmente inestable, de manera que su falla se puede iniciar con facilidad.
  - b) *El depósito de materiales en la parte superior de la pendiente*: Algunas veces se puede afectar el equilibrio de los materiales en sus posiciones naturales si se colocan sobre ellos cargas excesivas, como es el caso frecuente en las obras de excavación al colocarse el material extraído demasiado cerca a los cortes.
  - c) *Movimientos tectónicos*: Si los planos de falla están de modo que aíslan bloques arreglados de forma que quedan libres para moverse, afectando algunas veces los movimientos tectónicos el equilibrio de los materiales en sus posiciones naturales.
2. *Causas Internas*: Son aquellas que provocan deslizamientos sin que haya habido ningún cambio en las condiciones superficiales y sin la ayuda de movimientos tectónicos; son debidas a una reducción de la resistencia al esfuerzo cortante. Pueden ser:
  - a) *Saturación del material*: Este quizá sea el factor más importante de todos, ya que cambia las condiciones de agua del subsuelo, debido a interferencias con las condiciones naturales de drenaje, evaporación excesiva de suelos que normalmente están húmedos o un incremento de agua del subsuelo producido por lluvias excesivas. La presencia excesiva de agua en el subsuelo, tiene los efectos principales de incrementar el peso efectivo del material que

satura, crear una presión de poro apreciable y tenderá a debilitar muchos materiales, incluyendo tipos de rocas más débiles y los materiales no consolidados con algún tipo de arcilla; intensificando así las tendencias al deslizamiento.

- b) *Cambios litológicos en la masa:* El intemperismo que existe y desintegra las rocas, es agente de cambios litológicos que con el tiempo son radicales, ya que otros agentes como el viento y agua, transportan el material y transforman la capa superficial en otra.
- c) *Cambios estructurales en la masa:* La erosión superficial de estratos de estabilidad variable pueden dejar en voladizo el material de un estrato más duro, que con el tiempo se romperá y causará un deslizamiento. Así como también, en un talud de material no consolidado puede remover el soporte necesario para el material superior, el que empezará a deslizarse hasta que se restaure la estabilidad.

#### 4.3.1.3 Licuefacción

Una de las fallas más serias que puede sufrir el suelo durante un terremoto es la licuefacción, que es la pérdida parcial o completa de la resistencia y capacidad de carga del suelo debido al aumento de la presión de poros, este fenómeno se presenta principalmente en depósitos de arena saturados, que se manifiesta en la superficie en forma de pequeños volcanes de eyección de lodo y en condiciones similares a las de las arenas movedizas.

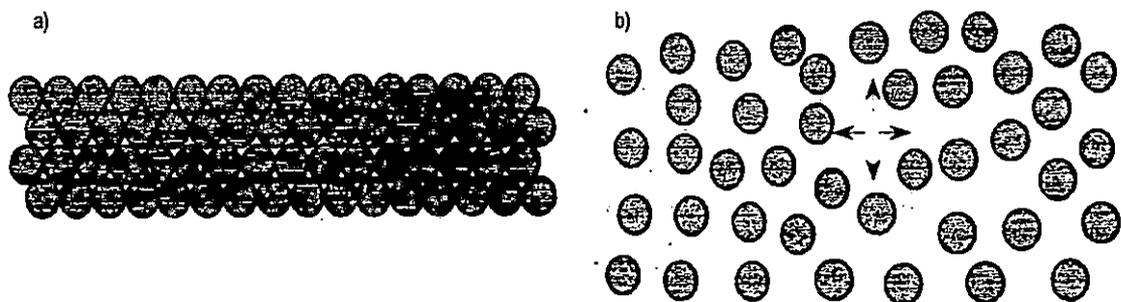


Fig. 4.5 Efecto de la licuefacción en suelos granulares. a) Antes del sismo: Sedimentos consolidados, granos en contacto, b) Durante el sismo: Se presenta la Licuefacción, la presión de poros separa los granos

Cuando los suelos granulares sin cohesión se someten a vibración, estos tienden a compactar. Si existe posibilidad de drenaje libre o el agua puede fluir instantáneamente, la presencia de agua en los poros no afectará significativamente el comportamiento del suelo bajo cargas cíclicas. En cambio si el suelo no cohesivo saturado está confinado y se impide el flujo libre del agua, la compactación del suelo y la consecuente reducción de volumen de vacíos causan un aumento de la presión de poros (fig. 4.5).

A consecuencia de la alta presión de poros, el material sufre una reducción gradual de la resistencia al cizallamiento; cuando la presión de poros iguala la sobre presión, la presión efectiva se reduce a cero, la arena pierde toda resistencia y se desarrolla un estado de licuefacción debido a un reordenamiento granular. La presión hidrostática aumenta, el agua contenida en los vacíos del material granular es forzada a fluir hacia arriba, donde emerge en forma de pequeños volcanes o conos que eyectan lodo y arena; a su vez las altas presiones de poros y el flujo de agua ascendente producen una condición de arenas movedizas. La susceptibilidad a la licuefacción aumenta con la presión de confinamiento.

Algunos efectos de la licuefacción que han sido observados en diferentes lugares del mundo pueden ser:

- a) Edificios hundidos o inclinados excesivamente sin daños estructurales, cuando han sido diseñados para solicitaciones sísmicas altas pero colapsan por la falla del suelo; demostrado durante el terremoto de Nigata Japón en 1964<sup>13</sup>
- b) Deslizamiento de tierra. Un ejemplo fue el ocurrido en el terremoto de Alaska en 1964 que hubo deslizamientos de tierra debido a la licuefacción de lentes de arena<sup>14</sup>.

Los principales factores que influyen en el potencial de licuefacción de un suelo son entre otros:

- a) Las características y composición granulométrica de la arena,
- b) La densidad relativa y la resistencia a la penetración,
- c) La profundidad del nivel freático y la presión de confinamiento,
- d) Las características del movimiento del terreno como contenido de frecuencias, intensidad y duración de la sacudida.

<sup>13</sup> Tomado de: Sauter (1989) "Introducción a la Sismología"

<sup>14</sup> Tomado de: Bommer (1994) "Sismología Para Ingenieros"

Ensayos de laboratorio y experimentos de campo han demostrado que el estado de licuefacción, se presenta únicamente en suelos saturados poco densos. Las arenas y arenas limosas sin consolidar tienen mayor probabilidad de producir este fenómeno.

El potencial de licuefacción en un emplazamiento depende de la intensidad de las vibraciones y de la resistencia del suelo. Según investigaciones de campo, se ha observado que la presencia de finos en una arena reduce su susceptibilidad a licuarse.

Las arcillas por ser plásticas, son menos propensas a la licuefacción, sin embargo, existen arcillas sensibles en las cuales un estado de alta presión de poros debido a cargas repetidas o cíclicas causa una pérdida de resistencia y grandes deformaciones, por lo que también en este caso se habla de licuefacción.

Para determinar los suelos más susceptibles a la licuefacción se puede obtener información muy útil de una curva granulométrica, que muestre la distribución de las partículas con respecto a su tamaño, en un gráfico del logaritmo del diámetro  $D$ , contra el porcentaje de la muestra, por peso;  $D_N$  es el diámetro del tamiz que deja pasar al  $N\%$  de la muestra. Los suelos más propensos a la licuefacción tienen las siguientes propiedades:

$$\begin{aligned} 0.07 \text{ mm} &\leq D_{50} \leq 0.4 \text{ mm} \\ 2 &\leq D_{60}/D_{10} \leq 5 \end{aligned}$$

La relación del diámetro  $D_{60}/D_{10}$  se conoce como el coeficiente de uniformidad.

Otra indicación de la resistencia a la licuefacción que puede determinarse con la prueba triaxial, es el parámetro de presión de poros  $A$ ; si una muestra triaxial está sometida a cambios de presión  $\Delta\sigma_1$  y  $\Delta\sigma_3$ , que causan un cambio en la presión intersticial  $\Delta u$ , el parámetro  $A$  es:

$$A = \frac{\Delta u - \Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3}$$

Si un suelo tiene un valor  $A$  mayor a 0.4, es susceptible a la licuefacción. Si los suelos en estudio cumplen estas condiciones es necesario hacer una evaluación más rigurosa del peligro de

licuefacción, siempre que exista un peligro de movimientos fuertes en el lugar. Una guía muy aproximada puede ser obtenida de la figura 4.6 Que muestra la relación entre la magnitud de los sismos y la máxima distancia desde la falla al sitio donde se ha observado licuefacción.<sup>15</sup>

En Nigata, Japón, que fue una zona muy afectada por fenómenos de licuefacción durante el terremoto de 1964, se determinó la influencia de la resistencia a la penetración, medida según el número de golpes en la prueba de penetración estándar SPT, sobre la condición de licuefacción y asentamiento de edificios. Los resultados indican que suelos con resistencia menor a 15 golpes son susceptibles a la licuefacción; en cambio, suelos con resistencia superior a 20 golpes no están propensos a sufrir licuefacción.

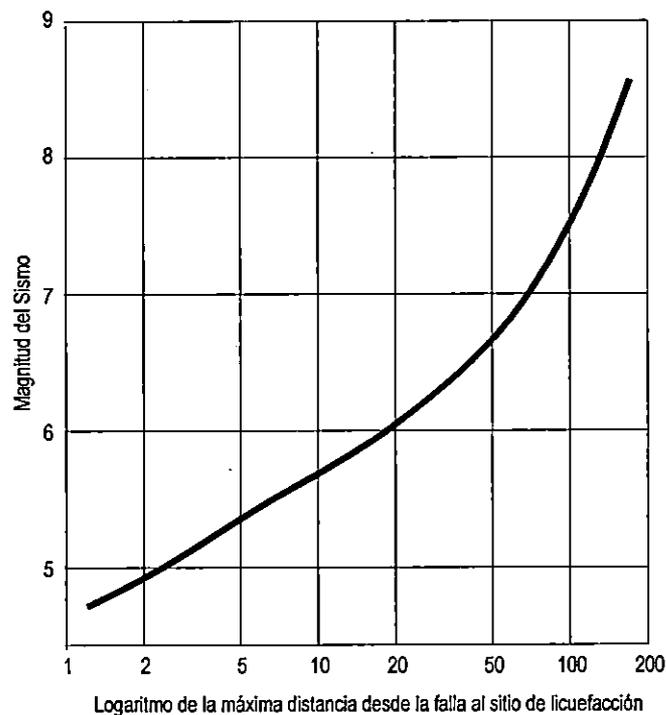


Fig. 4.6 Relación empírica entre magnitud y máxima distancia desde la falla a sitios de licuefacción

<sup>15</sup> Fuente: Bommer (1994), "Sismología para Ingenieros"

#### 4.3.1.4 Tsunamis

La palabra “Tsunamis” es de origen japonés y significa “ondas largas en el puerto”<sup>16</sup>, ocurren especialmente en el Océano Pacífico. Se originan por eventos sísmicos y erupciones volcánicas submarinas que sacuden enormes masas de agua generando olas marinas, que pueden alcanzar alturas considerables y causar destrucción y muerte en regiones costeras. Desde el epicentro, las ondas de agua de origen sísmico, se propagan en forma anular a todos los rumbos.

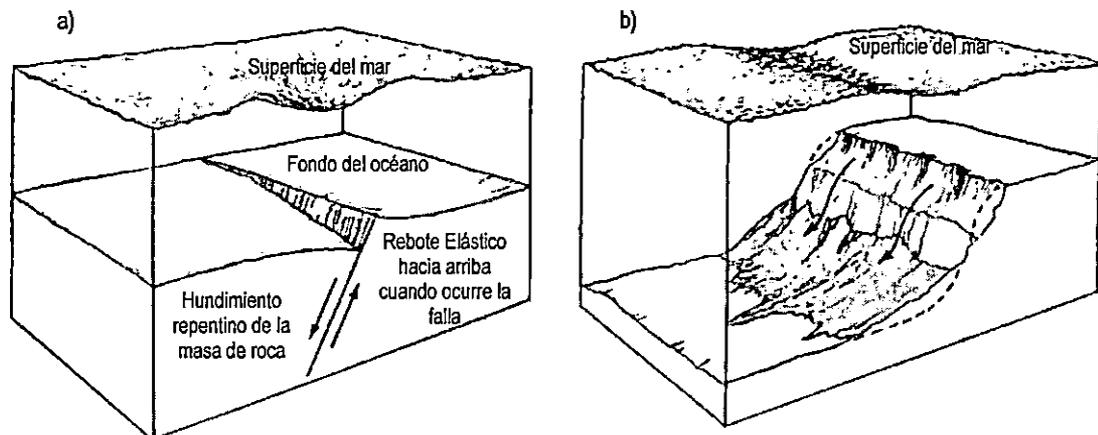


Fig. 4.7 Dos formas comunes en que se origina un Tsunami: a) Un hundimiento repentino del fondo del océano a lo largo de una falla causa que la superficie del agua se hunda y se genere una ola; b) Un sismo ocasiona un deslizamiento submarino de sedimentos sueltos que desplazan el agua y generan el Tsunami. Tomado de: Larson & Birkeland (1982)

Los tsunamis, que son asociados a eventos sísmicos con origen bajo el fondo marino, comúnmente son generados por el desplazamiento tectónico súbito y violento del fondo del océano con componente esencialmente vertical y por derrumbes submarinos que a su vez producen el desplazamiento de la columna o masa de agua que reposa sobre la zona (figura 4.7). Estos movimientos tectónicos tienen lugar principalmente en las zonas de subducción frente a las placas continentales. La energía impartida por esta dislocación es irradiada a partir del sitio del disturbio en forma de ondas de agua que se propagan con dirección esencialmente perpendicular a la ruptura que produjo el evento, es decir, tienen una orientación

<sup>16</sup> Fuente: Geografía de El Salvador

definida. Contrario a las olas producidas por el viento que se propagan por la superficie del agua, las ondas del tsunami, en forma similar a las ondas sonoras, se propagan a través de la masa o cuerpo del océano con un frente que se extiende desde la superficie al fondo del mar. La formación topográfica del fondo marino y la conformación de bahías y ensenadas inciden, por otro lado, en la formación de las olas, así no todos los sitios en las costas están sujetos al embate de los tsunamis.

Todo sismo que ocurre en el océano puede, teóricamente, generar un tsunami. No obstante, muchos eventos son de magnitud moderada o de foco muy profundo que no generan desplazamientos en el fondo del mar; por lo tanto, no generan tsunamis. Por otro lado, la generación de un tsunami presupone en general un desplazamiento tectónico vertical, ascendente o descendente, del fondo del mar, capaz de desplazar grandes masas de agua; se considera poco probable que desplazamientos horizontales en fallas transcurrentes o de transformación produzcan tsunamis.

No todos los tsunamis son causados por deslizamientos tectónicos del fondo del océano. En algunos casos deslizamientos de tierra o grandes avalanchas submarinas, a veces desencadenadas a su vez por un sismo, han generado tsunamis que han afectado las zonas costeras cercanas, aun cuando en estos casos la fuerza del fenómeno es menor. Erupciones volcánicas submarinas han sido la causa de grandes tsunamis.

La velocidad de propagación de un tsunami es sorprendentemente alta, puede ser de 600 a 800 km/h, dependiendo de la profundidad del océano. En mar profundo, las ondas son de pequeña altura, de 30 a 60 cm, que escapan a la vista. Encima de la profundidad media de los océanos (4,000 m aproximadamente), las ondas pueden propagarse con una velocidad hasta de 720 km/h. Cuando un tsunami se aproxima a la costa y disminuye la profundidad del mar, su energía se concentra en un área menor y la altura de la ola aumenta progresivamente, convirtiéndose en olas de superficie.

Las manifestaciones de los tsunamis en la costa son muy variadas y son función de la energía de la onda, de la configuración del fondo y del relieve costero. El efecto puede variar desde una subida y bajada tranquila y uniforme del nivel de agua, hasta la aparición de una gigantesca ola de varios metros de altura con gran poder destructivo. En las bahías y ensenadas de forma triangular o cónica que se estrechan

progresivamente, el aumento de la amplitud de la onda desde la entrada hasta el fondo de la bahía es generalmente mayor, debido al efecto de embudo, producido por la disminución de la sección transversal. Condiciones especiales de la topografía del fondo del mar favorecen a veces la acumulación de energía y la formación de olas de gran altura, que embisten la costa con gran furia.

El tamaño del tsunami no se puede predecir; en un sitio puede producir olas pequeñas y en otro olas de gran altura.

Hay lugares especialmente propensos a ser afectados por los tsunamis, tal es el caso del borde noroeste y oeste cerca de las fosas marinas frente a las costas de Alaska, Islas Aleutianas, Islas Kuriles, Japón, las Filipinas e Islas Marianas, que se consideran zonas de peligro permanente. Los Tsunamis se presentan en casi toda la región del Océano Pacífico, pero en la mayoría de las costas son leves.

Algunos tsunamis han alcanzado las proporciones de catástrofe, tal es el caso del que afectó la costa de Sanriku en Japón posterior al gran terremoto de 1896<sup>17</sup>, destruyendo 10,000 casas y causando 27,000 muertos, en Japón suele ocurrir un tsunami destructor casi cada 15 años. En las Islas de Hawaii se registraron dos tsunamis en el período de sólo siete años, de 1946 a 1952. El más fuerte, en 1946, causó 173 muertos y 25 millones de dólares de pérdidas<sup>18</sup>.

El Salvador no está a salvo del alcance de este fenómeno. En la madrugada del 10 de marzo de 1957, un tsunami de regular fuerza, procedente de las Islas Aleutianas causó daños en las costas Salvadoreñas y la pérdida de varias vidas. La construcción del Puerto Nuevo de Acajutla apenas había iniciado, cuando una ola de varios metros de altura destruyó el tramo en construcción y causó un cortocircuito en los cables eléctricos.

Después del tsunami de 1946, los Estados Unidos organizaron un sistema de advertencia de tsunamis para los países que bordean el Océano Pacífico el "Tsunami Warning System - TWS", cuya central se encuentra en Honolulu, Hawaii, operado por el Coast and Geodetic Survey. Si un sismo de magnitud moderada a grande ocurre en cualquier parte del Pacífico, se emite un comunicado previo a

---

<sup>17</sup> Fuente: Franz Sauter (1989) "Introducción a la Sismología"

<sup>18</sup> Fuente: "Geografía de El Salvador" (1986), Ministerio de Cultura y Comunicaciones

todas las estaciones afiliadas; éste presenta un mensaje de alerta de que existe la posibilidad de un tsunami. Conociendo la localización del foco sísmico y la velocidad de propagación del tsunami, las estaciones locales estiman del tiempo de llegada, y se controla el nivel medio del mar.

El Salvador participa en este sistema de advertencia a partir de 1972, a través del Instituto Geográfico Nacional, por medio de su estación mareográfica ubicada en el Puerto de Acajutla.

Los tsunamis, aún cuando no son frecuentes, son importantes por la pérdida de vidas y los daños que ocasionan. Las regiones de mayor peligro de tsunamis son las costas de los países e islas del Cinturón Circum-Pacífico, donde se generan el 80% de los tsunamis, pues es en los bordes del Océano Pacífico donde se encuentran las mayores zonas de subducción y donde ocurren los sismos de mayor magnitud. Otras regiones propensas a recibir la embestida de los tsunamis son el Mar Mediterráneo, el Océano Índico, el Atlántico y el Mar Caribe.

#### **4.3.1.5 Ruptura o falla del terreno**

Lo que usualmente experimentamos como un sismo o temblor, es la propagación de ondas a través de las rocas que constituyen el planeta, lo que es posible porque la tierra se comporta como un cuerpo elástico.

Actualmente sabemos que los terremotos ocurren por el rompimiento abrupto de las rocas como consecuencia de las fuerzas de tensión o compresión a que están sujetas. Estos rompimientos ocurren a lo largo de superficies en las cuales las rocas se deslizan con respecto a otras. Tales superficies se definieron en el capítulo 2 como fallas geológicas.

En muchos casos las fuerzas tectónicas producen un movimiento continuo en las fallas de tal manera que no se acumula esfuerzo y la energía se libera sin ruptura brusca. Esto se debe a la naturaleza de las rocas en la zona de fallas. Durante el curso de millones de años, los movimientos diferenciales intermitentes pero frecuentes a lo largo de la falla han roto y triturado las rocas en la superficie de la falla en forma de finos granos y polvos. Este material, que puede ocupar una banda de unos metros de anchura en algunos lugares, es alterado por filtraje de agua para producir arcillas y arenas que se conocen como

relleno de falla. El relleno húmedo tiene características plásticas y se comporta más como un líquido viscoso que como un sólido elástico y quebradizo y ofrece poca resistencia al deslizamiento, permitiendo un resbalamiento asísmico en la falla. Este deslizamiento, aunque evita que las fuerzas tectónicas produzcan terremotos, puede causar daños considerables.

El desplazamiento horizontal y vertical en las fallas debido a eventos sísmicos pequeños puede variar desde pocos centímetros hasta más de diez metros. El movimiento puede tomar lugar en un plano simple con una zona de separación de uno a diez metros de ancho o incluir un número de grietas auxiliares o secundarias causando una zona de separación; estas grietas auxiliares pueden ramificarse de la falla principal en ángulos pequeños o paralelos a ellas.

Algunas de las diferentes manifestaciones en la superficie, del movimiento en cada tipo de falla pueden ser:

- a) En el caso de las fallas normales el movimiento puede dejar un escarpe en la superficie que puede ser muy alto debido a la formación de un graben. Los trazos en la superficie de las fallas normales son muy complejos, estos pueden causar la abertura de grietas desde unos pocos centímetros a varios metros de ancho, paralelas al trazo de la falla y subir varios metros desde la fractura.
- b) El trazo en las fallas inversas en terrenos montañosos tiende a ser sinuoso y su localización precisa es difícil de establecer por la deformación o colapso del escarpe de falla sobresaliente.
- c) En las fallas horizontales el trazo en la superficie es una marca lineal angosta, tienen pocas ramificaciones o fracturas secundarias. Es común que las fallas horizontales no aparezcan en la superficie como una rotura continua sino como una serie de grietas paralelas que se conocen como “en echelon” (Fig. 4.8).

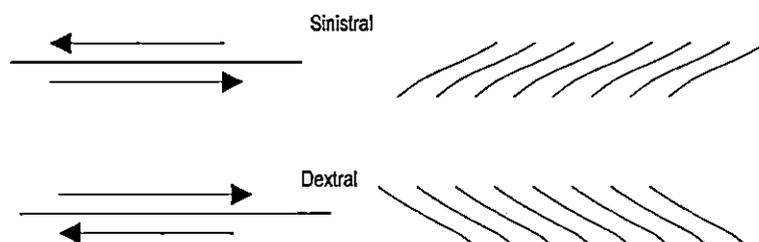


Fig. 4.8 Fallas Horizontales: Sinistral y Dextral y su apariencia en la superficie en forma de grietas "en echelon"

En las zonas de fallas, la ruptura no es instantánea: comienza en un punto y se propaga en una (unilateral) o dos direcciones (bilateral), con una velocidad cercana pero siempre menor a la velocidad de las ondas de corte. La propagación no es uniforme debido a la irregularidad de la superficie de la falla y la ruptura asociada con un terremoto puede extenderse por centenares de kilómetros.

La aparición de una ruptura en la superficie del terreno es la excepción, sólo los terremotos de mayor magnitud y de poca profundidad producen rupturas que se alcanzan a ver en la superficie. Los sismos con magnitudes mayores de 7.2 son casi siempre asociados con el fallamiento en la superficie, mientras que magnitudes menores de 5.25 pocas veces alcanzan el fallamiento en la superficie. Un terremoto superficial es más propenso a causar ruptura en la superficie que uno de la misma magnitud a una mayor profundidad.

El desplazamiento a lo largo de las fallas causado por un terremoto está relacionado con la profundidad del evento sísmico y es generalmente proporcional a la intensidad del mismo; la extensión de la superficie de deslizamiento de la falla también es determinada por los diferentes estratos de litología que se atraviesa en el camino a la superficie. El movimiento de las fallas puede ser absorbido y dispersado por el paso a través de algunas rocas y suelos (rocas altamente fracturadas y suelos débiles).

La ruptura de la superficie puede causar daños directos a las estructuras construidas a lo largo de las fracturas, o el volteo si la estructura es suficientemente rígida a los esfuerzos de flexión. Las estructuras vulnerables son edificios, sistemas de transporte (carreteras, líneas férreas, canales, autopistas, etc.), y conexiones de servicio (electricidad, agua potable, aguas negras, etc.)

El movimiento de las fallas puede además causar grandes cambios en la elevación de la superficie y la pendiente del terreno que puede tener como consecuencias, entre otras, la inundación de áreas cercanas a grandes cuerpos de agua o ríos al afectar el funcionamiento correcto de canales y ríos.

## CAPITULO V

# MARCO GEOLOGICO Y ZONIFICACION SISMICA DE EL SALVADOR

### **5.1 Geología de El Salvador**

Estando nuestro país en una región con un alto índice de actividad volcánica, es natural que en la mayor parte del territorio nacional predominen las rocas originadas por dicha actividad. A excepción del extremo noroeste de El Salvador donde pueden encontrarse Rocas de origen Sedimentario y Metamórfico (Región de Metapán, Chalatenango y sus alrededores inmediatos). En resumen puede decirse que el territorio salvadoreño está formado principalmente por las siguientes clases de rocas:

- A. **Rocas Extrusivas**, las cuales cubren más de un 90% del país, que por su composición química y mineralógica comprenden principalmente rocas efusivas (lavas) andesíticas y basálticas, así como también materiales piroclásticos, y en una escala mucho menor rocas efusivas riolíticas y dacíticas. Las andesitas son rocas extremadamente abundantes en el país; muchas de las lavas expulsadas por nuestros volcanes (por ej. el Volcán de San Salvador) pertenecen a esta categoría, lavas andesíticas del cuaternario se encuentran en la ribera oeste del Río Lempa, en las cercanías del puente Cuscatlán y extendiéndose al norte de la zona central del país, entre Tenancingo y el volcán Cacahuatique, se pueden observar aglomerados andesíticos de gran espesor (del Terciario), con menor cantidad de lavas andesíticas y tobas interestratificadas; quedando sepultados a lo largo del Río Titihuapa por piroclásticos más jóvenes (del cuaternario). Al igual que la andesita, el basalto es una roca ígnea sumamente común, su composición básica le proporciona una coloración que varía de negra a gris oscura, y con mucha frecuencia fue arrojada por los volcanes: Izalco, San Miguel, Santa Ana, San Vicente, etc. Además se incluyen los conos volcánicos situados entre Nueva Concepción, Santa Ana y Masahuat, compuestos de lavas basálticas y andesíticas del Cuaternario, asociadas en menor proporción con aglomerados volcánicos.

Las rocas de composición riolítica, se encuentran en distintas regiones de la zona norte del país, en tanto que la dacita, es la roca que forma las cúpulas de lava situadas dentro del Lago de Ilopango y sus alrededores inmediatos<sup>19</sup>.

Dos áreas extensas del país cubiertas por materiales piroclásticos (del Cuaternario), están localizadas, la primera al norte y noroeste de San Salvador (por ejemplo en los afloramientos de pómez que se observan en la carretera Panamericana desde San Martín hasta las cercanías de Cojutepeque, lo mismo que desde Apopa hasta Guazapa en la carretera Troncal del Norte); y la segunda, desde El Carmen, al este de San Miguel, hasta el Río Lempa en el Puente Cuscatlán. Los piroclastos de la primera área, están compuestos de una serie de tobas pumíticas, conocidas localmente con el nombre de “Tierra Blanca”, la cual representa varias series de depositaciones de cenizas volcánicas, con una edad promedio de 3000 años. La segunda área está compuesta en su mayoría de interstratificaciones de tobas escoriáceas y pumíticas, expulsadas probablemente por el volcán de San Miguel y por el complejo volcánico de Tecapa. También se encuentra el volcán Cacahuatique al oeste de San Francisco Gotera, en la actualidad completamente erosionado, formado de materiales piroclásticos intercalados con lavas andesíticas más jóvenes. Desde Metapán hasta Concepción de Oriente se encuentra una serie de piroclásticos ácidos (del Terciario), formados de tobas líticas y pumíticas, ignimbritas e intercalaciones de lavas riolíticas a dacíticas. La composición de estos piroclastos cambia a intermedia al norte de Santa Rosa de Lima.

- B. **Rocas Sedimentarias**, las más importantes son las de origen marino, localizadas al norte del Depto. de Santa Ana (en la zona sedimentaria marina de Metapán), y en parte de Chalatenango, ocupan un área equivalente a un 5% del territorio nacional. Estas comprenden en su mayoría calizas, conglomerados de cuarzo y areniscas (de color rojo, amarillo, verde, violeta, etc.). Fuera de estas series marinas se reconocen en El Salvador solamente rocas sedimentarias lacustres y fluviales, tratándose sobre todo de productos piroclásticos redepositados. De mucha menor importancia están las rocas de origen orgánico, localizadas en diferentes partes de la República, formando generalmente pequeños depósitos de Diatomita y Lignitos. Existen variedades de

---

<sup>19</sup> Tomado de Geografía de El Salvador.

diatomitas de agua dulce y salada, uno de los más grandes depósitos es el situado en la barranca del Sisimico, jurisdicción de Apastepeque, Depto. de San Vicente. Aluviones se encuentran a lo largo de los ríos más importantes, dentro de depresiones locales y sobre todo en planicies costeras de la parte SO y SE de la República, donde cubren un área total de más de 3500 Km<sup>2</sup>.

- C. **Rocas Intrusivas o Plutónicas**, pertenecientes todas al período Terciario, clasificadas por su composición mineralógica como granitos, granodioritas, monzonitas (ácidas) y dioritas (intermedias). Los afloramientos de rocas intrusivas o plutónicas se localizan en ciertas partes de la zona norte del país principalmente al oeste de Citalá y en Metapán.
- D. **Rocas Metamórficas**. Las Rocas Metamórficas son muy raras en nuestro país y solo se presentan en aquellos lugares de contacto térmico entre cuerpos intrusivos y rocas sedimentarias que han producido un metamorfismo y silificación intensos. El contacto térmico de éstas con las sedimentarias de Metapán; principalmente calizas ha dado lugar a la formación de yacimientos minerales de contacto de Cobre, Plomo, Zinc y Hierro. Se tiene conocimiento también de la existencia de mármol, originado en Metapán de la metamorfización de la caliza, Hornfels derivados de cualquier roca de grano fino, Cuarzitas derivadas de una arenisca, en Chalatenango y Conglomerados de Cuarzo y calcita recristalizados. Todas estas rocas se encuentran en áreas muy limitadas y no son foliadas.

Todas las rocas mencionadas hacen de El salvador un país de edad geológica relativamente joven. Una cuarta parte del territorio nacional es de la era cuaternaria, y tres cuartas partes están cubiertas por rocas de edad terciaria, por eso las más antiguas que son las Rocas Sedimentarias marinas, que cubren aproximadamente el 5% del territorio salvadoreño no juegan ningún papel importante en la constitución geológica del país, éstas se formaron a finales de la era Secundaria (período Cretácico del Mesozoico), lo cual se traduce en aproximadamente unos ochenta millones de años. Las rocas intrusivas que se conocen de lugares muy limitados son también terciarias

### 5.1.1 Explicación Técnica del Mapa Geológico de El Salvador

La Misión geológica Alemana, cuyas actividades comenzaron en 1967, finalizando a principios del año 1977, realizó en sus primeros cuatro años, un estudio geológico completo del país, el cual culminó con la elaboración del mapa geológico de El Salvador, escala 1:500,000 y la presentación de seis Hojas topográficas, escala 1:100,000, conteniendo cada una de ellas su respectiva geología. Los nombres correspondientes para cada una de las hojas son: Santa Ana, Sonsonate, Chalatenango, San Salvador, Carolina y San Miguel.

La explicación técnica del mapa geológico de El Salvador elaborado por la misión alemana, se presenta en la hoja Santa Ana y puede resumirse así:

La serie de rocas más antiguas hasta ahora conocidas, del territorio de la república es la serie sedimentaria marina, localizada en el noroeste, y perteneciente a los "Estratos de Metapán", está conformada por la *Formación Todos Santos* compuesta por las rocas más antiguas de El Salvador, la *Formación Yojoa* y la *Formación Valle de Angeles*.

Después del depósito marino en el noroeste del país, según los conocimientos actuales, El Salvador no volvió a ser una región marina y domina el Volcanismo Terrestre; comprobándose más de 700 centros de erupción.

El norte de El Salvador es atravesado por una franja ancha de rocas, aproximadamente paralela a la costa del Pacífico, desde los Estratos de Metapán hasta el sudeste del país, en las cercanías del Golfo de Fonseca. Estos depósitos de carácter ácido a básico de la *Formación Morazán* y las rocas volcánicas ácidas de la *Formación Chalatenango* no fueron comprobados por afloramientos mayores, en las partes centrales del país, ni cerca de la costa del Pacífico. La formación Morazán aflora desde el sector nor-occidental hasta el nor-oriental del país y su espesor total supera entre las diferentes secciones los 650 m. Los afloramientos de la Formación Chalatenango se describen como una secuencia de rocas volcánicas ácidas piroclásticas, ignímbritas y epiclastitas, de tipo riolítico - dacítico, eventualmente en transición a la formación Cuscatlán, una sección de espesores superiores a los 500 m.

Las *Intrusivas*, localizadas al noroeste del país, son esencialmente de carácter intermedio, cuya intrusión hay que clasificar más o menos limitada al norte, entre el depósito de las rocas de las formaciones Morazán y Chalatenango.

La *Formación Bálsamo* se extiende considerablemente en el sur. Se caracteriza por estar formada por rocas volcánicas intermedias a básicas y sus productos secundarios (epiclastitas volcánicas). La formación es más joven que las ignimbritas ácidas de la formación Chalatenango; pero anteriores a las de la formación Cuscatlán, la cual al sur del país parece dividir las. En el área de Ahuachapán, la parte media de esta formación es de edad 1.8 a 2.8 millones de años. Los afloramientos están en gran parte bordeando el Océano Pacífico, exceptuando la llanura costera del Río Lempa, con un espesor aproximado de 500 m, por sobre los 1000 m en la zona de Ahuachapán, hasta 100 m en el área de San Salvador y en las colinas de Jucuarán 600 m observados al Sur de la laguna de Olomega. Las rocas tienden a ser de tipo ácido en las partes bajas e intermedias a básicas en la parte superior.

Geológicamente, la cadena costera está compuesta por esta formación y geomorfológicamente, del occidente al oriente por las Cadenas Volcánicas de Tacuba, Bálsamo y Jucuarán.

La expulsión de rocas volcánicas ácidas (vulcanitas ácidas) hasta intermedias, obtuvo su mayor desarrollo durante el depósito de las vulcanitas de la parte inferior de la *Formación Cuscatlán*, el cual tuvo lugar debido a erupciones locales; pero intensas, en la parte central de El Salvador. La formación puede describirse como una secuencia volcánico - sedimentaria. La sección volcánica está constituida por tobas ácidas en la base, seguidas por lavas ácidas - intermedias y andesitas - basaltos en la parte superior. La secuencia sedimentaria está limitada a cuencas intermontanas, las cuales incluyen horizontes de diatomita epiclastitas y areniscas, intercaladas localmente por capas carbonosas, tobas y una localidad con calizas de agua dulce en el valle del Río Torola.

Las rocas volcánicas piroclásticas ácidas (piroclastitas ácidas), y productos secundarios de la Formación Cuscatlán, se depositaron prioritariamente en las depresiones y sus alrededores como por ejemplo, Lago de Ilopango y Ahuachapán. Las Ignimbritas pertenecientes a esta formación están superpuestas a las rocas de la Formación Bálsamo en la cadena del mismo nombre, mientras que en el

noroeste del país, rocas anteriores a la Formación Bálsamo se encuentran cubiertas por piroclastitas de la Formación Cuscatlán.

La acumulación de los sedimentos lacustrinos y fluviales de la formación Cuscatlán se presenta en cuencas con dirección occidente - oriente, en las proximidades del límite sur de los afloramientos de la Formación Todos Santos hasta la Chalatenango.

Es de mencionar también que tanto el volcanismo intermedio a básico de la parte superior de la formación Cuscatlán, como la actividad volcánica ácida hasta básica de la *Formación San Salvador* se concentró en la región comprendida entre los afloramientos de las rocas de la Formación Todos Santos hasta la Chalatenango en el norte, y la cadena costera en el sur compuesta predominantemente por las rocas de la Formación Bálsamo, no limitándose, sin embargo, a esta zona; formándose imponentes estructuras volcánicas que cruzan todo el país desde Ahuachapán hasta La Unión, junto al Golfo de Fonseca. Finalmente la formación se describe como una secuencia consistente en piroclastitas ácidas y efusivas ácidas - básicas intercaladas.

### 5.1.2 Características de las Unidades Geológicas de El Salvador

En la leyenda del Mapa Geológico de El Salvador se presentan los diferentes tipos de rocas (unidades o miembros) que conforman cada una de las formaciones donde estas se agrupan por edades y en donde además se define la zona de mayores afloramientos de acuerdo al nombre de dicha formación. En el siguiente apartado se establecen las 26 unidades litoestratigráficas, en que se distribuyen las 9 formaciones antes mencionadas, su simbología asignada y la definición de sus características y principales *productos secundarios*<sup>20</sup>.

<sup>20</sup> **Productos Secundarios:** Material retrabajado o redepositado. Término general aplicado a rocas formadas como consecuencia de la alteración de los minerales preexistentes. Formado del material derivado de la erosión o desintegración de otras rocas.

### 5.1.2.1 Formación Todos Santos

La formación consiste en una secuencia de conglomerados, areniscas rojas (red beds), limolitas, lutitas, con proporciones variables de detritos volcánicas y efusivas (lavas) básicas a intermedias e intercalaciones menores de pizarra. El color de la roca es rojo a café localmente gris y verde.

Se localizan en el extremo noroeste del país, específicamente al norte, este y oeste de Metapán (Santa Ana), al sur de Citalá a orillas del Río Lempa, y en el Río Sumpul, jurisdicción de San Fernando (Chalatenango). Las rocas más antiguas de la serie son la Areniscas Finas Multicolores con Feldespato, que afloran en el lado oeste de Metapán.

Localmente rocas volcánicas le sobreyacen o se encuentran intercaladas y se observa *metamorfismo de contacto*. La formación se divide en dos unidades:

- ts:** Conglomerados de cuarzo principalmente rojos, areniscas, siltitas<sup>21</sup>, lutitas; localmente *vulcanitas intermedias intercaladas*; en la parte superior localmente incluyendo capas rojas del Grupo Yojoa
- ts'm:** Metasedimentos, metavulcanitas<sup>22</sup>, principalmente ts, en parte eventualmente más antiguas o más jóvenes.

### 5.1.2.2 Formación Yojoa

La formación Yojoa está conformada por una sola unidad que se define así:

- yo:** Se define como Calizas y calizas margosas<sup>23</sup> con una intercalación de capas rojas (capas rojas mapeadas como ts).

Localizadas en el área de Metapán, al NO de El Salvador; sobreyacen paralelamente a la Formación Todos Santos. El cambio entre ambas unidades es gradual, con la disminución de material clástico; areniscas rojas, limolitas con intercalaciones de conglomerados de cuarzo y rocas volcánicas; una secuencia característica de lutitas limosas rojas-café, en parte moteadas de verde sobreyacen a las Series de Calizas Inferiores. La roca característica de esta unidad es caliza gris

<sup>21</sup> Siltita: Depósito clástico de material granular inorgánico con diámetro medio de partícula entre arcillas y arenas.

<sup>22</sup> El prefijo "meta" se antepone en las rocas metamórficas al nombre de la roca original cuando esta puede determinarse

<sup>23</sup> Margas: Nombre clásico asignado a las arcillas cargadas de cal

interclástica a granulada, de grano fino, en parte bituminosa. Es frecuente encontrar intercalaciones de margas y las capas son más finas que las calizas inferiores. La zona de transición de la Serie de Capas Rojas a la Serie de Calizas Superiores es de 1 a 2 m de espesor al norte de Metapán.

### 5.1.2.3 Formación Valle de los Angeles

**va:** Capas rojas (conglomerados de cuarzo y caliza, areniscas, siltitas, lutitas), localmente *vulcanitas intermedias intercaladas* y *Metamorfismo de contacto*.

Se distinguen dos partes, la superior es predominantemente arenoso y limoso. La parte inferior de la secuencia es un conglomerado de fragmentos subangulares y redondeados de calizas, en menor proporción fragmentos angulares y subangulares de areniscas, limolitas, lavas andesíticas; la matriz es limosa a arenosa fina y el cemento es calcítico o limonítico.

Sobreyacen en la parte inferior conglomerática, una secuencia de areniscas de grano medio a fino, limolitas y lutitas, con ocasionales capas conglomeráticas e intercalaciones de materiales volcánicos cada vez más frecuentes en la parte superior.

### 5.1.2.4 Formación Morazán

La formación Morazán se subdivide en:

**m1'a:** Se describe como una secuencia de piroclastitas ácidas hasta intermedias, en la parte basal, localmente *efusivas intermedias* hasta intermedias-ácidas, *Ignimbritas* y *Metamorfismo de contacto* en parte contemporáneas con la unidad m1'b. El contacto inferior con el grupo Valle de Angeles es gradual.

Las *Tobas blancas de Ostúa* se consideran en parte equivalentes. Salvo algunos afloramientos en el área de Chalatenango, las exposiciones están limitadas al noroeste del país.

**m1'b:** El término corresponde a la parte superior del miembro m1'a. Se describe como una secuencia de rocas efusivas ácidas e ignimbritas, localmente piroclastitas.

Salvo un dudoso afloramiento de esta unidad en el extremo oriental del país, las exposiciones están limitadas al lado nor-occidental.

**m2'a:** La sección está constituida por rocas efusivas intermedias hasta intermedias-ácidas y piroclastitas subordinadas, en parte *silificadas*, con *metamorfismo de contacto* o con *alteración hidrotermal*<sup>24</sup>; aflora en la faja comprendida entre los sectores nor-occidental y nor-oriental del país.

**m2'b:** Consiste en una secuencia de piroclastitas intermedias, hasta intermedias-ácidas, epiclastitas volcánicas y efusivas subordinadas, con evidencias de *metamorfismo de contacto* y *alteración hidrotermal*.

Subyace al miembro ch1 de la Formación Chalatenango y los afloramientos están limitados a la franja nor-occidental del país.

#### 5.1.2.5 Intrusivas

**I:** Es un miembro contemporáneo con las Formaciones Morazán y Chalatenango. Esta formado por rocas intrusivas ácidas hasta intermedias. Las primeras descripciones en el sector occidental del país, son en el área de Metapán, donde se reportan dioritas.

Existen además buenos afloramientos de granito en San Rafael y Santa Rita, pertenecientes al Depto. de Chalatenango y granodiorita: al norte de Tejutla (Chalatenango), y en la jurisdicción de Metapán. Las Monzonitas se encuentran también en el área de Metapán y al oeste de Concepción de Oriente expuestas como un cuerpo intrusivo rodeado de tobas ácidas.

#### 5.1.2.6 Formación Chalatenango

**ch1:** Está formado por rocas piroclásticas ácidas, *epiclastitas volcánicas*, *ignimbritas* y rocas efusivas intercaladas, localmente *silificadas*. Su distribución está limitada al NE y NO del país, en el sector del Río Torola y el Río Lempa respectivamente.

<sup>24</sup> Alteración Hidrotermal: Cambios resultantes de la interacción de "soluciones hidrotermales" (emanaciones magmáticas ricas en agua) y fases sólidas preexistentes, adición o remoción de material a través de fluidos hidrotermales (ej.: silificación), etc.

En el noreste del país, pocos kilómetros al oeste de Santa Rosa de Lima, se reportan unas dacitas columnares.

**ch2:** Es el miembro superior de la formación Chalatenango, La unidad está constituida por efusivas ácidas de tipo riolítico, eventualmente en transición al miembro c2 de la formación Cuscatlán, y por piroclastitas subordinadas, localmente *Ignimbritas*. Aflora principalmente en el sector norte, al este y oeste del país.

#### 5.1.2.7 Formación Bálsamo

**b1:** Es una sección constituida por *epiclastitas volcánicas*, piroclastitas e *ignimbritas*; localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas, “*facies*<sup>25</sup> *claro*” (con lapilli de pómez) y *limo rojo*; *alteración hidrotermal*, *escorias*, *cinder* y *facies de cuencas*. Es en parte contemporáneo con el miembro b2 y los afloramientos están principalmente al sur del lado oeste del Río Lempa.

En el sector occidental, la sección ubicada en la Sierra del Bálsamo, está constituida por tobas brechosas andesíticas, tobas interestratificadas y pequeños flujos de lavas; siendo el espesor mínimo de 300 m el que disminuye a 125 m en 7.5 km al suroeste.

En la parte central, se encuentran tobas aglomeráticas y andesitas. Las primeras son poco estratificadas y constituidas por grandes bloques de 20 a 50 cm o mayores, generalmente redondeados de tipo andesítico, entremezclado con material piroclástico gris claro de grano medio.

La parte superior se encuentra intercalada por corrientes de lava y algunas tobas ácidas; y el espesor de la sección es de 300 a 500 m. Se asume también que parte de la sección constituida por corrientes de lodos, lahares y productos volcánicos, fueron resultado de una serie de erupciones cuya intensidad fue disminuyendo mientras que aumentó la producción de lavas.

En las colinas de Jucuarán en el sector oriental se reportan rocas similares y probablemente de la misma edad que las observadas en la Cordillera del Bálsamo.

---

<sup>25</sup> Facie: El aspecto perteneciente a una unidad geológica, incluyendo composición mineral, tipo de base, contenido fósil, etc.

- b2:** Es una secuencia de rocas volcánicas de tipo efusivas básicas-intermedias, piroclastitas, epiclastitas volcánicas subordinadas, en parte contemporánea con los miembros b1 y b3, localmente con *alteración hidrotermal, limos rojos, escorias y cinder*

En el área de Ahuachapán, se encuentran aglomerados antiguos densos en el Río Paz y al Sur de Tacuba, de tipo andesítico en una toba arenosa gris; se estima un espesor mínimo de 100 a 150 m y alcanza hasta 1000 m. Al este del Lago de Güija se describe una masa heterogénea de aglomerados o brechas, constituidos por fragmentos angulares a subredondeados de basaltos y andesitas en una matriz tobácea. Tanto la parte superior como la inferior, están intercaladas por lavas andesíticas y basaltos de poco espesor.

Al oriente del país, se encuentran en el volcán Cacahuatique unas tobas brechosas basálticas, estratificadas, de 200 m de espesor aproximadamente con lavas y tobas intercaladas.

- b3:** Forma el miembro superior de la Formación Bálsamo, en parte contemporáneo con el miembro b2, y constituido por efusivas básicas-intermedias. Localmente con *alteración hidrotermal, silificación y limos rojos*.

#### 5.1.2.8 Formación Cuscatlán

- c1:** Es el miembro inferior de la formación Cuscatlán y está constituido por rocas, tanto sedimentarias como volcánicas. Las primeras son fluvio-lacustres y se ubican en cuencas intermontanas alineadas rumbo noroeste. Estas son: La Cuenca de Metapán, Cuenca de Lempa, Cuenca del Río Titihuapa y la Cuenca de Olomega. Otros sedimentos han sido encontrados en el nororiente del país a lo largo del Valle del Río Torola. Las unidades volcánicas sobreyacen, tanto en el centro como en el oriente del país a rocas de la Formación Bálsamo, localmente a la Formación Morazán y Chalatenango presentando también *limo rojo, epiclastitas volcánicas, ignimbritas y silificación*.

La Sección Volcánica, en parte, está conformada por:

Tobas Fundidas de Comalapa y Zaragoza: Se definen dos tipos de tobas fundidas en la Cadena Costera, las de Comalapa de tipo riodacítico y las de Zaragoza de tipo dacítico.

Las tobas fundidas de Comalapa, subyacen a la tierra Blanca (s4) y sobreyacen a la Formación Bálsamo, cubren un área de 12 km en dirección N-S y 6 a 7 km E-O con un espesor de 100 m. La parte inferior está constituida por tobas brechosas, sin textura regular, color gris rojizo y rosado opaco, el vidrio tiene un tono rojo pálido. La parte superior es vidriosa y dura, de textura paralela, de un tono gris y el vidrio es negro. La unidad está compuesta por una pasta fundamental, constituida por trozos de vidrio en una masa de granulación fina, trozos de obsidiana con ocasionales inclusiones de feldespatos, minerales especialmente plagioclasas, piroxenos, magnetita y cuarzo e inclusiones de rocas extrañas principalmente basálticas y andesíticas, las cuales están redondeadas y meteorizadas.

Las tobas fundidas de Zaragoza afloran desde Zaragoza a la ciudad de La Libertad, y tienen unos 12 km de largo por 3 km de ancho. La sección tiene un espesor que va de los 30 m a los 100 m. El techo y la base de la unidad es bastante similar a las de Comalapa, salvo que es de un tono gris oscuro toda la sección; se observa una mayor proporción de piroxeno y magnetita.

Las diferencias entre el techo y la base supone un proceso en que la temperatura inicial fue más baja que en la etapa final de la erupción, produciéndose por consiguiente el aspecto vidrioso en el techo.

Tobas al Norte del lago de Ilopango: son de la misma etapa volcano-tectónica que las tobas fundidas de Comalapa y Zaragoza.

Se extienden al Norte hasta el volcán de Guazapa, al noroeste hasta San Isidro, al este en las cercanías de San Vicente y al sureste entre el Río Lempa y Zacatecoluca. Localidades de buena exposición están en las cercanías de Guazapa y las localidades tipo al norte del Lago de Ilopango en dirección del volcán de Guazapa. Están caracterizados por la abundancia de bombas de pómez, lapilli de pómez, fragmentos angulares de lavas dacíticas, vítreas y andesitas principalmente, entre una masa fina de cenizas no estratificadas. El espesor de los depósitos es variable, pero ninguno supera los 50 m.

La Serie Sedimentaria, en parte está conformada por:

Sedimentos del Valle del Río Torola: En el lado oeste afloran limolitas y casi al final de la sección, en el lado este, la sección comprende calizas grises, areniscas limosas, calizas oolíticas arenosas y areniscas limosas; todas tobáceas. Al sur la unidad consiste en una caliza oolítica basal de tono café claro pardo, friable, fosilífera, la matriz está compuesta por fragmentos de oolitas, arcillas y en menor proporción fragmentos clásticos de cuarzo, feldespato y hornblenda cementados por un limo carbonáceo y sobreyaciendo calizas densas de tono gris o amarillento, bien estratificadas.

Cuenca de Lempa: Es una depresión que se extiende por el este y el oeste del Río Lempa, cuyo curso lleva el mismo rumbo; limita con montañas marginales constituidas por materiales volcánicos más antiguos que los sedimentos de la cuenca. Están divididas en dos series las capas de Lempa Inferior predominantemente de *facies lacustres* y las Capas de Lempa Superior de *sedimentación fluvial*. Salvo por las diatomitas los componentes de estos sedimentos proceden de materiales volcánicos, éstos son: detritos y fragmentos procedentes de la demolición de rocas volcánicas más antiguas.

Sección de Ilobasco: La sección geológica está formada por una secuencia de tobas de pómez inferior y superior intercaladas por horizontes de lignitos, diatomita, tobas y tobas redepositadas. El conjunto sobreyace discordantemente a “tobas aglomeráticas”.

Estratos El Sisimico: Existen capas lacustres en la Barranca El Sisimico al noroeste del Volcán de San Vicente, los cuales están constituidos por tobas y arenas tobáceas. Asumen un espesor de 30 m para estas capas, y subyacen a 100 m de tobas brechosas.

Cuenca de Olomega: En la Faja Volcánica Costera se mencionan areniscas tobáceas acumuladas en un lago que fue más extenso de lo que es actualmente.

Cuenca del Río Titihuapa: En ella se encuentran fósiles y capas de lignito.

Cuenca de Metapán: La sección comprende diatomitas en la parte inferior, cuyo espesor es de 5-7 m, estratos lacustres de 2 a 5 m en la parte superior, los cuales subyacen a unas tobas.

- c2:** Sección de rocas volcánicas efusivas de tipo ácido-intermedio, de ocurrencia aislada, en parte contemporáneas con el miembro c1 y en menor grado con el miembro c3.

En el área del Valle Central Interior al oriente del país y en el Campo Volcánico de Apastepeque se encuentran rocas volcánicas ácidas jóvenes.

- c3:** Está constituido por rocas volcánicas de tipo andesítica y basáltica, en parte contemporánea con el miembro c2. Se observa localmente *Limo rojo y alteración hidrotermal*.

Las coladas de lava constituyen la parte principal de esta unidad, sin embargo, conos de *cinder* y *escorias* han sido reportadas. Diques son escasamente mencionados, se encuentran algunos en el sector oriental del país; en los estratos de Guazapa se encuentran suelos fósiles rojos con profundidad hasta de 4 m.

#### **5.1.2.9 Formación San Salvador**

- s1:** La unidad esta formada con una secuencia de piroclastitas ácidas, *epiclastitas volcánicas*; localmente efusivas básicas-intermedias; en parte contemporánea con el miembro s2 y ubicado en la faja central al occidente del país.

En la región de Ahuachapán se describen Tobas Aglomeráticas Jóvenes de color gris, constituidas por fragmentos oscuros angulosos de material andesítico en una toba fina de color gris poco compacta. La parte superior está constituida por fragmentos porosos de vidrio volcánico negro y material efusivo compacto. El espesor de la unidad es de 120 a 150 m; para la parte inferior-media no se determina la procedencia del material, la superior establece el foco de erupción al noroeste de Las Chinamas.

En el Lago de Coatepeque se definen coladas individuales de lava de 6 a 30 m de espesor, escoriáceos y bloques sueltos en la parte superior e inferior de la sección, densos en la parte central; son predominantemente andesitas de piroxeno oscuro y basaltos olivínicos porfidíticos. Han sido observados también diques de basalto piroxénico o andesitas basálticas olivínicas de 3 a 8 m de espesor aflorando en la parte N y NO de la caldera. La procedencia de estos materiales son varios focos de erupción actualmente hundidos en la caldera.

s2: Secuencia de rocas volcánicas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas; contemporáneas en parte con los miembros más jóvenes s3'a, s3'b, s4, y afloran en la parte central a lo largo del país.

En el sector occidental, el Cerro de Apaneca está constituido por basaltos; a  $\frac{3}{4}$  km de Apaneca, el Cerrito de Apaneca, por lapilli y arena; el Volcán de La Lagunita al Norte de Apaneca y el Volcán de La Laguna Verde al NE del anterior por andesitas. El Volcán Chingo es contemporáneo, con el volcán de Santa Ana, y está en parte constituido por productos piroclásticos intercalados con depósitos lacustres.

En el sector Central, las unidades dominantes son el Volcán de San Salvador y el Volcán de San Vicente. El Volcán de San Salvador, se clasifica como un estrato volcán compuesto.

En el sector oriental, tres son las unidades que predominan, el Grupo Volcánico de Tecapa-Usulután-Berlín-Taburete, el Volcán de San Miguel o Chaparrastique y las Islas del Golfo de Fonseca, que se describen como andesitas y basaltos.

s3'a: Secuencia de piroclastitas ácidas y *epiclastitas volcánicas* (tobas color café), en parte contemporáneas con los miembros s2 y s3'b. En el occidente del país, estos materiales de tipo dacítico fueron acumulados previa la formación de la caldera de Coatepeque.

Al Norte y NE del Lago de Ilopango la base la componen bancos que exceden los 15 m de espesor constituidos por fragmentos de pómez y líticos, sobreyace una secuencia de cenizas dacíticas de un espesor superior a los 30 m.

En el sector de Ahuachapán se encuentran tobas de color café superior, como una secuencia de tobas blandas y finas de color gris claro o rojizas intercaladas por horizontes de pómez gruesa.

En el área del volcán Tecapa una secuencia de materiales piroclásticos, que incluyen fragmentos de pómez, tobas e ignimbritas de composición intermedia a ácida; constituyen la base del volcán. Al sur de Santiago de María, tobas fundidas y otros materiales volcánicos ácidos-intermedios han sido observados y la probable procedencia de éstos es un volcán en las cercanías de California.

**s3'b:** Está constituido por efusivas ácidas, en parte contemporáneo con los miembros s2, s3'a, s4 y s5'a. Los afloramientos están ubicados en dos sectores, en el Lago de Coatepeque y en el Lago de Ilopango.

**s4:** Se define como una secuencia de piroclastitas ácidas y *epiclastitas volcánicas* subordinadas, localmente efusivas ácidas (s3'b). Es en parte contemporáneo con los miembros s2, s3'b, s5'a, s5'c, nombrado informalmente Tierra blanca y no incluye tobas ácidas subyacentes (c1). Se asume que este material fue producto de la actividad del volcán de San Salvador, guardando estrecha relación con los eventos volcano-tectónicos del Lago de Ilopango.

El espesor es superior a los 50 m en las cercanías del Lago de Ilopango y se reduce a 4 m en la ciudad de San Salvador; los fragmentos de pómez alcanzan tamaños de 25 a 30 cm.

**s5'a:** Le definen como una secuencia de efusivas básicas-intermedias, contemporáneas en parte con los miembros s3'b, s4, s5'b, s5'c; aflora principalmente en el sector occidental y oriental, a lo largo de la faja central del país.

En el Noroccidente del país se reportan basaltos en el volcán San Diego con espesor total de 70 m aproximadamente. En el sector central, la colada de lava al NE del Volcán de San Salvador, es de tipo basáltica. En el sector Oriental la colada del año 1844 del Volcán de San Miguel se describe como un basalto andesítico.

**s5'b:** El miembro se describe como una acumulación de escorias, tobas lapilli y cinder. Es en parte contemporáneo a los miembros s5'a y s5'c.

En el NO del país, en el Lago de Coatepeque, un cono de lapilli y los fragmentos eyectados de tipo basáltico Ligeramente al Norte del volcán de Santa Ana se encuentra un grupo de cráteres y conos de escorias, y al Sur se observan conos parásitos, como el Cerro Verde, y San Marcelino; el último cono compuesto por escoria fina basáltica, con numerosas bombas torcidas y aplastadas hasta de 1 m de diámetro.

En los alrededores del volcán de San Salvador se mencionan un grupo de escorias. La composición de las rocas del Picacho, es andesítica, porfídítica con fenocristales de plagioclasa. El cono de

escorias en el Boquerón son andesitas con fenocristales de labradorita, olivino, y augita. En las cercanías de Quezaltepeque se encuentra también un cono de escorias y lapilli basáltico.

En Oriente, el volcán Limbo, al oeste de la Ciudad de San Miguel, constituido por lapilli, siendo un cono adventicio del Volcán de Chinameca.

**s5'c:** Es una secuencia volcánica constituida principalmente por cenizas y tobas de lapilli, en parte contemporánea con los miembros s3'b, s4, s5'a, s5'b.

Aflora en el sector occidental del país, consisten en gran medida de cristales menores de 0.5 mm de diámetro y el contenido de vidrio basáltico bajo. *Sobreyacen a s2 y s3'a.*

**Q'f:** Son depósitos sedimentarios del Cuaternario constituidos principalmente por secciones con intercalaciones de rocas piroclásticas, *depósitos de estuario con o sin manglares, barras costeras, depósitos coluviales que en algunas zonas subyacen a depósitos como ch2, conos de deyección y suelos anmoor.* Están ubicados a lo largo de la línea de costa en sectores emergidos como la zona de la Bahía de Jiquilisco, el Golfo de Fonseca; a lo largo del Río Lempa, y en depresiones como el sector de la Laguna de Olomega y la Laguna ciega de Zapotitán.

## **5.2 Zonas Sismológicas en El Salvador**

La ocurrencia de sismos en el espacio y tiempo es lo que se ha dado por llamar "*sismicidad*". Para una región en particular, la sismicidad está definida por los parámetros de ubicación del evento (latitud y longitud), la magnitud y profundidad del evento, así como también la frecuencia con que han ocurrido en un período determinado.

La representación de la sismicidad, puede ser a través de *mapas epicentrales*, donde se muestran los epicentros de los sismos con su ubicación, magnitud, y profundidad; *mapas de flujo de energía*, donde se muestran curvas de igual nivel de energía sísmica liberada por los sismos, y finalmente a través de *ecuaciones de recurrencia*, donde se hace una distinción de acuerdo a las zonas sismogénicas que afectan la región en particular, buscando no mezclar sismos que tienen diferente origen tectónico.

Sin embargo, la información necesaria para la representación de la sismicidad, será aquella proporcionada por datos de sismógrafos, la cual es recopilada y ordenada en un catálogo sísmico<sup>26</sup> para obtener datos cuantitativos y poder así representar la sismicidad de la región.

Algunos de los terremotos más destructores, que han ocasionado la pérdida de muchas vidas humanas, económicas y que a la vez han formado parte de los catálogos sísmicos utilizados en los estudios de peligrosidad para el país, son:

- ◆ El ocurrido el 23 de mayo de 1576, con epicentro entre San Marcos y Santo Tomás.
- ◆ El 30 de Septiembre de 1659, produciendo completa destrucción de San Salvador y erupción del volcán boquerón.
- ◆ El 16 de Abril de 1858, la intensidad fue registrada cerca del Cerro San Jacinto.
- ◆ El 18 de Abril de 1902, produciendo daños en el occidente del país y en San Salvador.
- ◆ El 18 de julio de 1912, causó daños en Armenia, Izalco y Santa Ana.
- ◆ El 8 de Junio de 1917, causó destrucción en Armenia y daños en Ateos, un segundo sismo lo hizo en San Salvador, Apopa, Nejapa, Quezaltepeque, Opico y Santa tecla.
- ◆ El 6 y 7 de Mayo de 1951, dos sismos el día 6 que afectaron a Jucuapa, Chinameca, San Buena Ventura, Nueva Guadalupe y otro el día 7, afectando Santiago de María y Berlín.
- ◆ El 3 de Mayo de 1965, el evento destruyó una densa área poblada, afectando Soyapango, Ilopango, Santo Tomás, Mejicanos y lugares aledaños.
- ◆ El 10 de Octubre de 1986, Terremoto que afectó a San Salvador con pérdida de 1500 muertos y unos 100,000 damnificados.

Por lo anterior, se ha hecho primordial realizar estudios que determinen las magnitudes de los movimientos posibles en el terreno, con la información recopilada y procesada en referencia a los fenómenos sísmicos ocurridos en el país y que dependen en gran parte de la configuración tectónica que presenta la región.

---

<sup>26</sup> Un catálogo sísmico, es aquel que posee datos de sismos registrados de un período determinado de años, para una región específica.

### 5.2.1 Configuración Tectónica de la Región

Para evaluar la Peligrosidad Sísmica de una región es necesario primero estudiar y modelar<sup>27</sup> su sismicidad, es decir, poseer un conocimiento de los mecanismos tectónicos de la región. Para nuestro país, esto se consigue estudiando su asentamiento sismotectónico como parte de un sistema más extenso y que se describe a continuación.

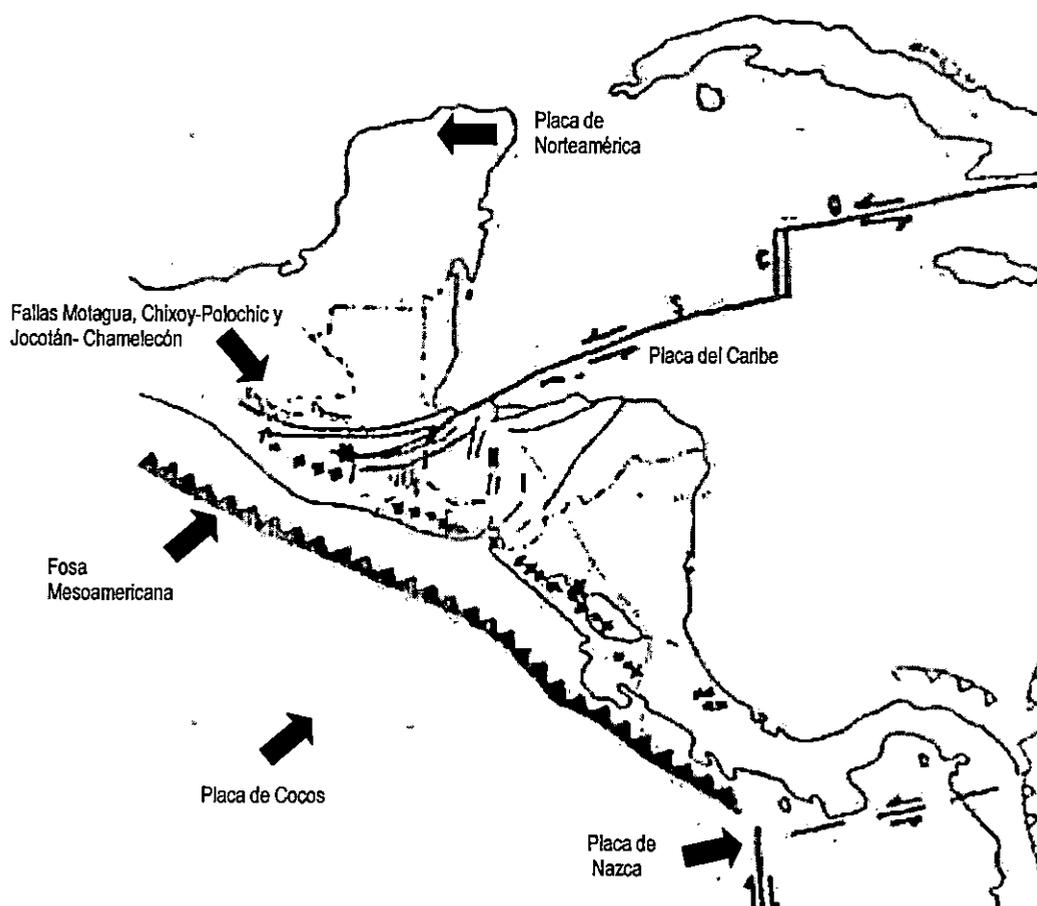


Fig. 5.1: Límites de las estructuras y principales fallas que conforman la tectónica de la región. Tomado de Alfaro et al (1990)

El Salvador está localizado en la parte occidental de la Placa Caribe, que contiene regiones de diferente tectonismo. A lo largo de la Costa del Pacífico en Centroamérica, se tiende una estrecha cadena

<sup>27</sup> *Modelamiento Geométrico*: Un modelo geométrico utilizado para una evaluación de Peligrosidad para El Salvador, consiste en una combinación de líneas y zonas fuentes.

volcánica, con una longitud de 1060 km y un total de 75 volcanes activos aproximadamente. Al Suroeste de El Salvador, la Placa de Cocos subduce bajo la Placa Caribe formando la Fosa Mesoamericana, originándose así, una zona de actividad sísmica, profunda e inclinada, llamada Zona de Benioff. Al Noroeste, el país se encuentra marcando con el límite de las Placas de Norte América y del Caribe que cruzan Guatemala y que está expresado principalmente por las fallas Chixoy-Polochic, Motagua y Jicotán-Chamelecón. Finalmente al noreste, está bordeado por un conjunto de grábenes que se extienden principalmente en la parte central del territorio hondureño; constituyendo de esta forma la Depresión de Honduras (Ver figura 5.1).

Como se describió anteriormente, El Salvador es un país con una actividad sísmica muy pronunciada, como consecuencia directa de su complejidad tectónica, por lo que si bien la ubicación de la mayoría de terremotos y volcanes, está relacionada con los bordes de las placas tectónicas y su interacción; la actividad sísmica puede ser generada también al interior de las placas (sismos intraplaca).

### 5.2.2 Trabajos de sismicidad en El Salvador.

Existen, 5 trabajos a lo largo de ocho años, que han abarcado el estudio cuantitativo de la sismicidad en El Salvador, el primero desarrollado por *Rauda Rosales et al (1985)*, el segundo por *Algermissen et al (1986)*, el tercero por *Ayala Ayala et al (1989)*, otro fue el de *Alfaro et al (1990)* y finalmente el desarrollado por *Singh et al (1993)*; todos ellos elaborados independientemente. Sin embargo para propósitos de estudio, sólo se presenta un resumen de los trabajos de Algermissen, Alfaro y Singh, por ser los dos primeros; los más conocidos y el de Singh, el trabajo utilizado para nuestra revisión en la evaluación del peligro sísmico secundario debido a deslizamientos de tierra.

Si bien es cierto, que la zonificación sísmica de una región, consiste en la representación de un mapa que indique las áreas donde el nivel de Peligrosidad Sísmica sea casi constante, o donde se exijan los mismos criterios para el diseño sismorresistente, debe ser un código de diseño sísmico, el que ha de proporcionar esta información sobre la peligrosidad en todos los posibles emplazamientos de la región que él cubra.

La metodología que se emplea en la preparación de estos mapas se basa en el análisis de Cornell, según se explicó en el apartado 4.2.1, donde se evalúa la peligrosidad en términos de un parámetro del movimiento fuerte para un número de sitios en la región, obteniendo para cada uno de ellos una relación entre el valor del parámetro y su período de retorno, eligiendo un tiempo de exposición y una probabilidad de excedencia para fijar el valor del parámetro en cada sitio. Siendo el último paso, dibujar curvas de igual nivel del parámetro en cuestión.

Es así como mapas de isoaceleración para una vida útil de 50 años y una probabilidad de excedencia del 10% (en estructuras normales) para El Salvador, han sido elaborados en cada uno de los estudios que a continuación se describen, no sin antes exponer las delimitaciones de las zonas sismogénicas consideradas.

#### **A. Algermissen et al (1986).**

Este estudio utilizó para su catálogo sísmico, la información de los datos recopilados por la National Earthquake Information Center, Golden Colorado y fue complementado con registros históricos a partir del año 1520. El trabajo define 4 fuentes sismogénicas: La zona de subducción (1), la Cadena Volcánica (2A y 2B), la frontera de la Placa del Caribe con Norteamérica (3) y la Depresión de Honduras (4). Además define una última zona (5) la cual considera como sismicidad de fondo, es decir que en ella se ubican todos los terremotos no asociados a ninguna fuente y en su informe no se presentan las relaciones de recurrencia obtenidas.

La delimitación geométrica de las zonas sismogénicas definida por Algermissen es como se muestra en la figura 5.2; y el resultado presentado de la Peligrosidad para el país, es a través del mapa de Isoaceleraciones que se muestra en la figura 4.4 (USGS, 1988).

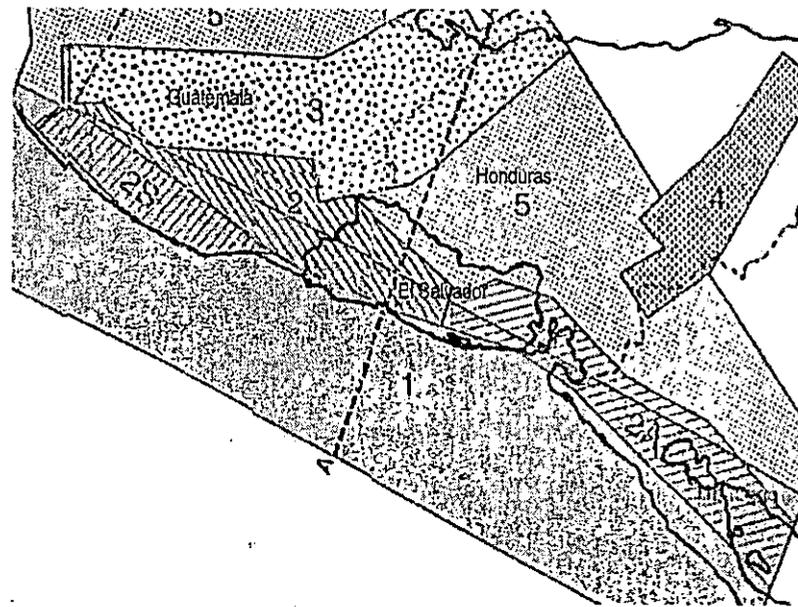


Fig. 5.2: Delimitación geométrica de fuentes sismogénicas, por Algermissen et al (1986). Zona de subducción (1), Cadena volcánica (2A y 2B), Frontera de Placa del Caribe con la de Norteamérica (3), Depresión de Honduras (4) y Zona de sismicidad de fondo (5). Tomado de "Evaluación de Espectros de respuesta para el Diseño de Estructuras en El Salvador".

#### B. Alfaro et al (1989).

Este estudio tiene como base datos que fueron encontrados en las descripciones históricas (antes de 1900) y datos de descripciones e instrumentos después de 1900. Antes de 1900, teniendo en cuenta que los únicos registros de terremotos de que se disponía eran daños físicos ocasionados a las estructuras, pero que utilizando escalas de intensidades se pueden evaluar algunos parámetros de interés ingenieril. De esta manera, para estos eventos se calcularon aproximadamente magnitudes, epicentros e hipocentros. Asumiendo que el área de rompimiento de la falla debido a un terremoto corresponde al área de réplicas<sup>28</sup>.

Para datos de sismicidad histórica se recopiló información desde 1520, con un total de 3202 eventos, utilizando para la sismicidad histórica las fuentes de White (1985), White (1988), White y Cifuentes (1988), White y Harlov (1988).

<sup>28</sup> Réplicas: Son sismos de pequeña magnitud que siguen un terremoto principal.

Para la sismicidad posterior a 1900, la información de la International Seismological Center (ISC), The U.S. Coast and Geodetic Survey (CGS), The Preliminary Determination of Epicentres (PDE), el Catálogo de R. Geller (GELL), el catálogo de L. Sykes (SYKES) y The Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA).

La magnitud mínima se tomó para todas las fuentes de 3 (ML), y la magnitud máxima se obtuvo en base a tres criterios: la longitud de la falla, la distancia máxima entre volcanes o la magnitud máxima registrada. La relación de recurrencia es de forma lineal y bilineal, dependiendo de la tendencia que tengan los puntos dispersos en la gráfica Log N vrs M.

El trabajo identifica las diferentes fuentes sismogénicas. En la región centroamericana, tres diferentes regímenes: *Los bordes de la Placa Caribe con la Placa de Norteamérica, la Fosa Mesoamericana (Zona de subducción)*: formada por la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa Caribe, *la Cadena Volcánica*: formada por una línea de volcanes que van desde Guatemala hasta Costa Rica y *la Depresión de Honduras*, que es un grupo de fallas orientadas de Norte a Sur en la parte central de Honduras.

Las zonas a su vez se dividen en tres segmentos, definidos de la forma siguiente:

1. La frontera de la Placa del Caribe con la Placa de Norteamérica, comprende:
  - a) Fallas de *Chixoy-Polochic* (FCH-P),
  - b) Falla de *Motagua* (FM) y
  - c) Falla de *Jocotán-Chamelecón* (FJ-CH), seccionadas en tres segmentos cada una de ellas, de acuerdo a las rupturas históricas de éstas
2. La Zona de subducción :
  - a) Zona Superficial de *Benioff* (ZSB) 0-35 km
  - b) Zona Intermedia de *Benioff* (ZIB) 36-60 km
  - c) Zona Profunda de *Benioff* (ZPB) 61-260 km

3. La Cadena Volcánica:
  - a) El segmento de Guatemala, el cual se extiende desde la frontera México-Guatemala hasta la frontera Guatemala-El Salvador (SGS).
  - b) El segmento en la parte oeste de El Salvador (SOS).
  - c) El segmento este de El Salvador-Nicaragua, el cual está delimitado desde el centro de El Salvador, hasta el centro de Nicaragua (SN)
4. La Zona de depresión de Honduras (ZDH): Que se localiza al norte de El Salvador.
5. La delimitación geométrica de las fuentes sismogénicas del estudio de Alfaro, es como se ilustra en la siguiente figura 5.3. y el resultado presentado de la Peligrosidad para el país, es a través del mapa de Isoaceleraciones que se muestra en la figura 5.4.

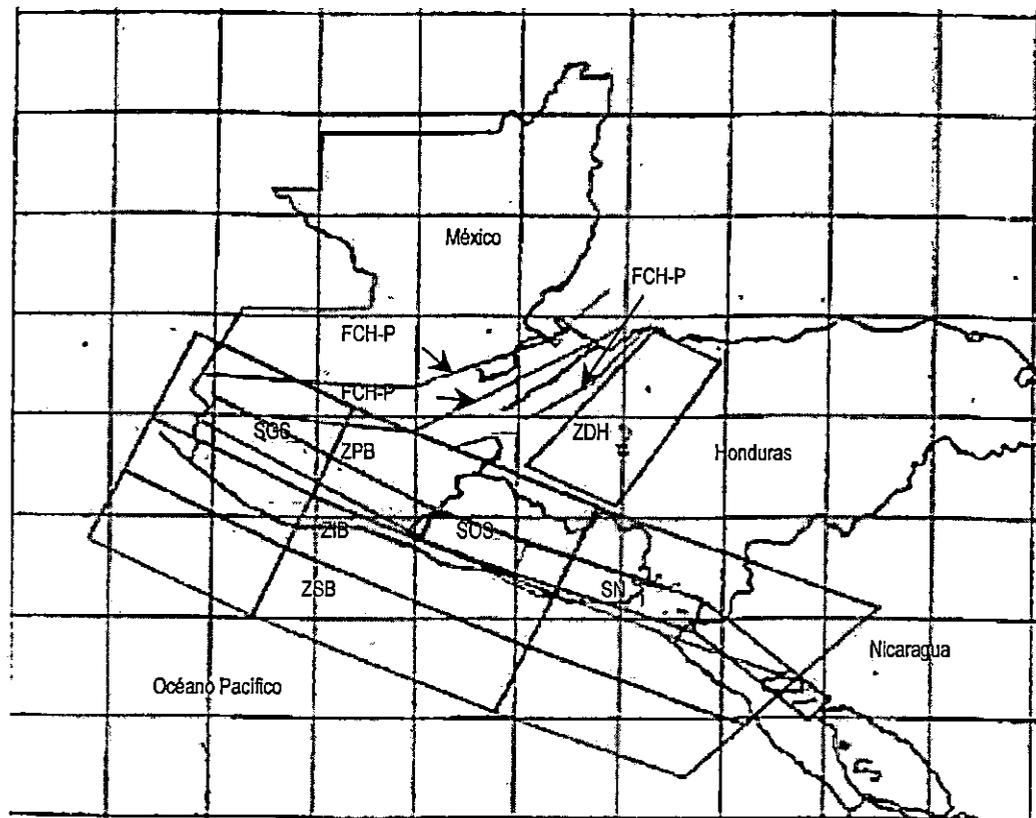


Fig. 5.3 Delimitación geométrica de fuentes sismogénicas, por Alfaro et al (1989). Tomado de Alfaro et al.

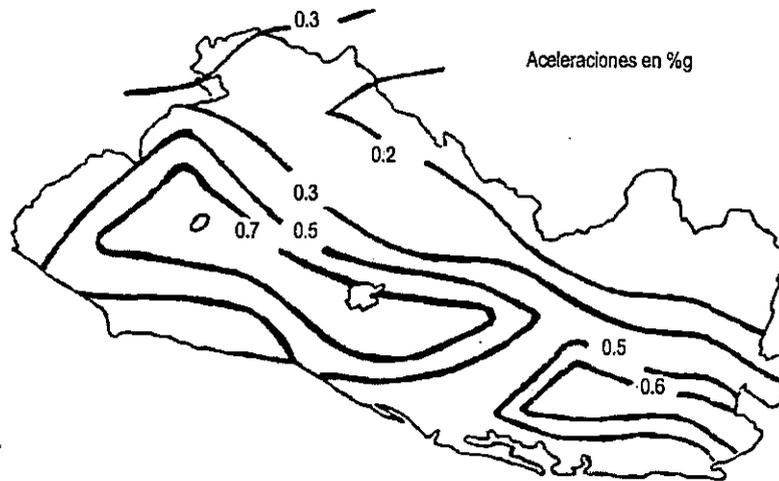


Fig. 5.4: Mapa de Isoaceleración en El Salvador para una vida útil de 50 años y una probabilidad de excedencia del 10%. Redibujado de Alfaro et al (1990). Tomado de "Sismología para Ingenieros", Julian Bommer 1994

### C. Singh et al (1993).

El catálogo sísmico utilizado fue obtenido a partir de la base de datos del USGS/NEIC (United States Geological Survey/National Earthquake Information Center), con un total de 2790 eventos para los años de 1898 a 1988. En él se identifican 4 zonas sismológicas, siendo éstas las siguientes: La Zona de Subducción, la Frontera de la Placa del Caribe con la Placa Norteamericana, la Depresión de Honduras y la Cadena Volcánica. Esta división es igual a la propuesta por Alfaro et al (1990), excepto que para extraer los eventos asociados a cada zona sismogénica se utilizaron volúmenes de la corteza que son ligeramente diferentes en planta a las propias zonas. En otras palabras, las zonas usadas para extraer los eventos del catálogo (figuras 5.5 y 5.6); son de mayor extensión que las usadas para llevar a cabo los cálculos de peligro sísmico, tal como pueden compararse con la fig. 5.3 de las zonas sismogénicas propuestas por Alfaro. Esto fue hecho, para reflejar mejor los patrones observados de sismicidad y eliminar algunos errores sistemáticos en la localización de los eventos.

Como resultado final del proceso de evaluación del peligro sísmico se presentan mapas de El Salvador con curvas de igual valor de  $a_{m\acute{a}x}$  para tres diferentes períodos de recurrencia: 100, 500 (Ver

figura 4.4, UNAM 1993) y 1000 años. A mayor período de recurrencia los valores de aceleraciones resultan más conservadores.

En lo que respecta al presente trabajo, sólo nos interesa el Mapa de isoaceleraciones para un período de recurrencia de 100 años que se presenta en el Mapa N° 6, sobre la base del cual se establece posteriormente el factor sísmico para la determinación de la amenaza por deslizamientos de tierra.

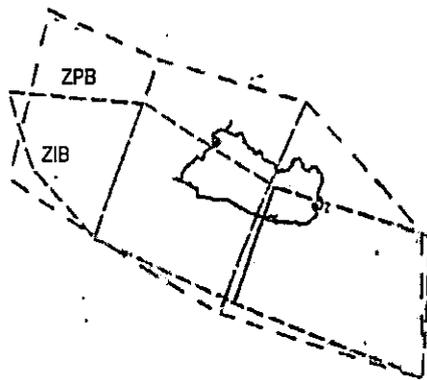


Fig. 5.5: Delimitación de fuentes sísmogénicas, para zona de subducción profunda (ZPB) e intermedia (ZIB), usada por Singh.

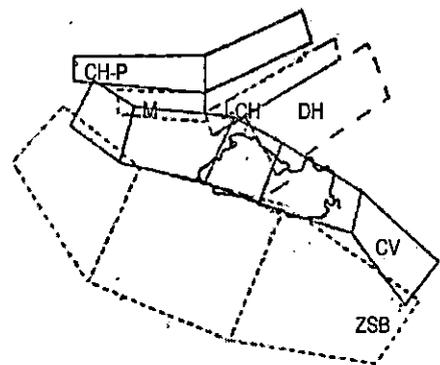


Fig. 5.6: Delimitación de fuentes sísmogénicas, para zona de subducción superficial (ZBS), cadena volcánica (CV), fallas Chixoy-polochic, Motagua y Jocotán-Chamelecón (CH-P, M, J-CH), depresión de honduras (DH), usada por Singh.

## CAPITULO VI

# EVALUACION DEL PELIGRO SISMICO SECUNDARIO EN BASE A MAPAS TEMATICOS DE SUSCEPTIBILIDAD

La evaluación del peligro sísmico secundario consiste en definir un valor estimado de la amenaza en nuestro país por fenómenos como la Amplificación del Movimiento del Terreno, la Licuefacción y los Deslizamientos de Tierra, mediante la elaboración de los Mapas de Susceptibilidad. Los mapas son el producto de una metodología definida para El Salvador por el Servicio Geológico Británico (Ver Anexo 1)<sup>1</sup>, y que toma como punto de partida la elaboración del Mapa Geológico Simplificado basándose en la información del Mapa Geológico de El Salvador elaborado por la Misión Geológica Alemana y publicado por el Instituto Geográfico Nacional (ver sección 5.1.1). De acuerdo al Capítulo 1 y según la Propuesta realizada por el Servicio Geológico Británico (BGS), el proyecto comprende los mapas siguientes:

1. Mapa Geológico Simplificado
2. Mapa de Susceptibilidad a la Amplificación del Movimiento del Terreno
3. Mapa de Susceptibilidad a Licuefacción
4. Mapa de Susceptibilidad a los Deslizamientos de Tierra
5. Mapa de Susceptibilidad a la Ruptura del Terreno
6. Mapa de Susceptibilidad a Tsunamis

La metodología es de carácter analítico y ha sido aplicada con buenos resultados en países como Costa Rica (ver anexo 1) y China.

Este proyecto presenta los primeros cuatro mapas de los listados arriba: el mapa de Susceptibilidad a la Amplificación del Movimiento del Terreno y el de susceptibilidad a la Licuefacción

---

<sup>1</sup> Este documento es la única información disponible de la metodología utilizada para la Evaluación de la Peligrosidad Sísmica Secundaria propuesta para El Salvador, no se conocen las consideraciones geotécnicas tomadas en cuenta.

que se derivan directamente del Mapa Geológico Simplificado y el Mapa de Susceptibilidad a los Deslizamientos de Tierra.

La metodología de elaboración para estos se define, como ya se dijo, en la propuesta del BGS; excepto para el mapa de deslizamientos la cual se definió por acuerdo del CEPREDENAC<sup>2</sup> con la adaptación de la metodología desarrollada por el Dr. Sergio Mora Castro y el Dr. Wilhelm-Gunther Vahrson (Determinación “a priori” de la amenaza de deslizamientos en grandes áreas y utilizando indicadores morfodinámicos), utilizada actualmente para la elaboración de este mapa en Centroamérica.

Para la elaboración de los mapas se utilizó el Software MicroStation Versión 5.0 (proporcionado también por el BGS), como parte de un Sistema de Información Geográfica (SIG). El SIG puede definirse como una base informatizada de datos con algún tipo de componente espacial. Esto significa que la información que almacenan está referenciada geográficamente. El sistema está compuesto de diversos elementos: el ordenador (la computadora), el digitizador (mesa digitizadora), el trazador gráfico (plotter), y el programa (MicroStation u otro programa con la misma aplicación). Los SIG permiten almacenar esa información espacial de forma eficiente, facilitando su actualización, manipulación y acceso directo al usuario. La información puede proceder de cartografía a diferentes escalas.

Todavía son muy numerosos los países que no cuentan con ningún tipo de cartografía digital: toda la información geográfica disponible está constituida por mapas en papel, de distintas escalas y proyecciones. Con la información en formato digital se puede obtener la impresión de cualquier zona de interés a la escala que sea requerida.

## **6.1 Simplificación del Mapa Geológico de El Salvador**

El Mapa Geológico Simplificado cubre toda el área territorial y se considera también como parte del Proyecto de evaluación de la Peligrosidad sísmica secundaria. La simplificación del Mapa Geológico se llevó a cabo en una serie de pasos que se resumen de la siguiente manera:

---

<sup>2</sup> CEPREDENAC: Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central

1. Digitizar los principales rasgos del país contenidos en el Mapa Geológico de El Salvador, Escala 1:100,000. La digitización consiste en convertir dicha información a formato digital. Este proceso puede realizarse a partir de medios muy variados en función del tipo de variables que quieran introducirse al sistema, para mapas convencionales el medio idóneo es un digitizador de mesa, que facilita la obtención automática de coordenadas; pero también resulta un proceso lento y laborioso, que requiere una detallada depuración de errores.

Para digitizar la información debe definirse la escala y las unidades de la base cartográfica utilizada, y establecer con las coordenadas lambert correspondientes los puntos de referencia del área de trabajo, la que se limita únicamente a la superficie disponible sobre la mesa digitizadora. Gracias a ello basta recorrer con el cursor la línea o puntos que se pretenden digitizar para que transmitan al ordenador sus coordenadas. La posición del cursor puede registrarse punto a punto apretando el botón de entrada de la tableta digitizadora. Esta consiste en una matriz de circuitos colocados debajo de una superficie plana o tableta, que permite detectar el punto exacto donde se encuentra el cursor.

Los elementos digitizados son:

- a) El contorno del país (Límites internacionales y con el océano)
  - b) Ríos y lagos importantes (El Río Lempa, el lago Güija, lago de Coatepeque, lago de Ilopango y la Laguna de Olomega)
  - c) Las 26 unidades del mapa geológico.
2. Reclasificar las unidades geológicas en grupos de mayor significado para la ingeniería, donde se espera que los materiales que los componen presenten un comportamiento similar durante un evento sísmico.
3. Como resultado de la reclasificación se presentan seis unidades:
    - a) Qal Aluvión Cuaternario
    - b) Qa Manglares y Sectores Inundables
    - c) Vc Suelos Volcánicos Cuaternarios

- d) Vt Suelos Volcánico Terciarios
- e) Hr Rocas Duras
- f) Sr Rocas Suaves

Estos grupos combinan y unifican todas las rocas y suelos en nuevas clases que conforman el Mapa Geológico Simplificado.

### 6.1.1 Características de la Reclasificación Geológica

A continuación se describen cada uno de los grupos simplificados y las unidades geológicas, incluyendo productos secundarios, consideradas en ellos. La ubicación de cada unidad estratigráfica en su estado natural no siempre corresponde con la ubicación de sus productos secundarios es por eso que se hace la diferenciación dentro de cada grupo de clasificación colocando en la columna izquierda las unidades lito-estratigráficas y a la derecha sus productos derivados<sup>3</sup>.

#### **Qal: Aluvión Cuaternario**

Depósitos de materiales detríticos (fragmentos de roca) arrastrados al fondo de los valles por corrientes de agua lluvia o de los ríos, y depósitos costeros recientes. Aquí se incluyen las siguientes unidades geológicas

Unidades lito-estratigráficas	Productos Secundarios
Q'f: Depósitos sedimentarios del cuaternario.	Q'f: Depósitos acuáticos con intercalaciones de piroclastitas, playa barra costera con nivel antiguo de costa, depósitos coluviales sin/con representación de depósitos subyacentes y cono de deyección <sup>4</sup> .
	c1: Depósitos fluvio - lacustres y facies de cuencas

<sup>3</sup> La terminología utilizada en los cuadros de la reclasificación propuesta por el B.G.S., se extrajo de la leyenda del Mapa geológico de El Salvador

<sup>4</sup> Cono de deyección: Zona terminal de un torrente, por la que éste desemboca en un valle principal.

### Qa: Manglares y Suelos Inundables del Cuaternario

Estas son áreas de pantanos y manglares, con nivel freático superficial o sometidas a la acción de las mareas. Este grupo se presenta como el de comportamiento dinámico más deficiente respecto al comportamiento esperado para otros grupos simplificados. Podrían generarse los fenómenos de licuefacción y amplificación de movimiento, en función de las condiciones particulares de cada sitio.

Unidades lito-estratigráficas	Productos Secundarios
	Q'f: Depósitos de estuario <sup>5</sup> con/sin manglares y suelo Anmoor

### Vc: Suelos Volcánicos del Cuaternario

Constituido por suelos cohesivos que forman los edificios volcánicos más recientes, piroclastos y materiales volcánicos asociados: lavas, tobas y lahares.

Unidades lito-estratigráficas	Productos Secundarios
c1: Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas	c1: Sobre m o ch, Ignimbritas <sup>6</sup> , epiclastitas volcánicas (fluviales) y Limo rojo <sup>7</sup> .
	c3: Escorias y Cinder, Alteración Hidrotermal y Limo rojo
s1: Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánica; localmente efusivas básicas - intermedias.	s1: Sobre lavas, Ignimbritas y Epiclastitas volcánicas
s3'a: Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas (tobas color café)	s3'a: Sobre lavas y Epiclastitas volcánicas (fluviales)
s4: Tierra Blanca: piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas (s3'b)	s4: Sobre lavas y Epiclastitas volcánicas
s5'b: Conos de acumulación (escorias, tobas, lapilli, cinder)	
s5c: Cenizas volcánicas y tobas Lapilli	s5c: Sobre s4, sobre s2, sobre c1 y sobre s3'a

### Vt: Suelos Volcánicos del Terciario

Rocas y edificios volcánicos, principalmente de tipo riolítico – dacítico hasta andesíticos.

<sup>5</sup> Estuario: Desembocadura de un río caracterizada por la considerable penetración o invasión de las aguas marinas

<sup>6</sup> Depósitos de nubes ardientes: Tobas ardientes fundidas y no - fundidas (Clasificación de campo). Flujo piroclástico.

<sup>7</sup> La coloración roja se asocia a un proceso de oxidación.

Unidades Lito - Estratigráficas	Productos Secundarios
b1: Epiclastitas volcánicas y piroclastitas; localmente efusivas básicas – intermedias intercaladas	b1: Facies claro (con lapilli de pómez), Ignimbritas, Escorias y Cinder, Alteración hidrotermal, Epiclastitas volcánicas (fluviales), Facies de cuencas (fluvio - lacustre) y Limo rojo
	b2: Escorias y Cinder, Alteración hidrotermal y Limo rojo
	b3: Alteración hidrotermal y Limo rojo
ch1: Piroclastitas ácidas, Ignimbritas, epiclastitas volcánicas localmente efusivas ácidas intercaladas.	ch1: Ignimbritas y Epiclastitas volcánicas (fluviales)
m1'a: Piroclastitas ácidas hasta intermedias; en la parte basal localmente efusivas intermedias hasta intermedias – ácidas.	m1'a: Piroclastitas blancas cerca de Ostúa e Ignimbritas
m1'b: Efusivas ácidas e Ignimbritas, localmente piroclastitas.	
	m2'a: Alteración hidrotermal
m2'b: Piroclastitas intermedias hasta intermedias – ácidas, epiclastitas volcánicas, efusivas subordinadas.	m2'b: Alteración hidrotermal

### Hr: Rocas Duras

Las Rocas duras están compuestas principalmente por Rocas Extrusivas, Intrusivas, lavas, la mayoría de las metamórficas y sedimentos fuertes, areniscas y calizas endurecidas. Este grupo no presenta características dinámicas desfavorables en lo que respecta a fenómenos derivados de la actividad sísmica; sin embargo, algunos efectos de amplificación se pueden esperar donde los materiales constituyentes se encuentren en un estado de meteorización muy avanzado o hayan sido afectados significativamente por alteración hidrotermal<sup>8</sup>. En él se incluyen las siguientes unidades geológicas:

Unidades Lito - Estratigráficas	Productos Secundarios
b2: Efusivas básicas – intermedias, piroclastitas, epiclastitas volcánicas subordinadas (estratos no diferenciados y edificios volcánicos)	
b3: Efusivas básicas – intermedias	b3: Silificación
	c1: Silificación
c2: Efusivas ácidas e intermedias - ácidas (ocurrencias aisladas en parte eventualmente igual a ch2)	c2: Silificación

<sup>8</sup> El producto de la alteración hidrotermal para cualquier unidad geológica clasificada como roca dura se establece fuera de este grupo.

c3: Efusivas básicas – intermedias	
	ch1: Silificación
ch2: Efusivas ácidas, piroclastitas ácidas subordinadas	ch2: Ignimbritas y Silificación
l: Rocas intrusivas ácidas hasta intermedias	
	m1'a: Rocas efusivas intermedias intercaladas y metamorfismo de contacto
m2'a: Efusivas intermedias hasta intermedias-ácidas, piroclastitas subordinadas (alteración regional por influencia hidrotermal)	m2'a: Metamorfismo de contacto y Silificación
	m2'b: Metamorfismo de contacto
s2: Efusivas básicas - intermedias, piroclastitas subordinadas	
s3'b: Efusivas ácidas	
s5'a: Efusivas básicas – intermedias	
ts: Conglomerados de cuarzo principalmente rojos, areniscas, siltitas, lutitas; localmente vulcanitas intermedias intercaladas, en la parte superior localmente incluyendo capas rojas del Grupo Yojoa.	ts: Rocas efusivas intermedias intercaladas y Metamorfismo de contacto
ts'm: Metasedimentos, metavulcanitas, principalmente ts, en parte eventualmente más antiguas o más jóvenes.	
va: Capas rojas (conglomerados de cuarzo y caliza, areniscas siltitas, lutitas), localmente vulcanitas intermedias intercaladas.	va: Rocas efusivas intermedias intercaladas y Metamorfismo de contacto
yo: Calizas y calizas margosas con una intercalación de capas rojas (ts).	yo: Metamorfismo de contacto

### Sr: Rocas Suaves

Las Rocas suaves se componen de arcillas del pre - holoceno (último período de la era cuaternaria, que inició hace unos diez mil años), areniscas débiles, yesos y calcitas débiles, etc.

Unidades Lito - Estratigráficas	Productos Secundarios
	va: Alteración hidrotermal
	yo: Alteración hidrotermal

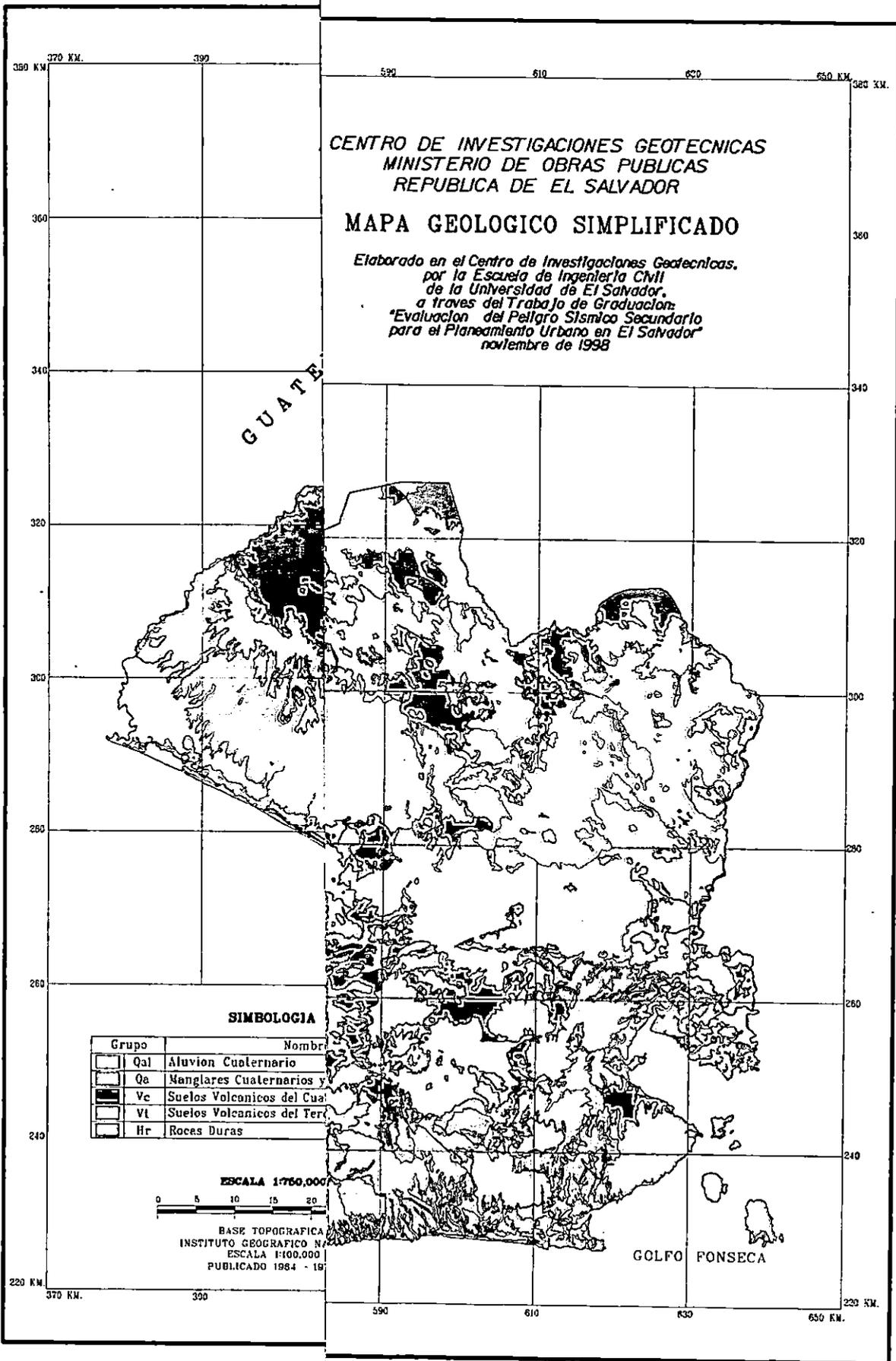
El grupo Sr, compuesto del material derivado de la alteración hidrotermal de los miembros va y yo, se elimina de la clasificación debido a que requiere la inspección de campo, a fin de verificar la existencia de la alteración que provoque la debilidad en dichas unidades; ya que ésta no se define en el mapa geológico de El Salvador.

La geología de El Salvador se presenta finalmente en cinco unidades simplificadas con propiedades geológicas y geotécnicas similares que determinan principalmente la respuesta del suelo a los disturbios sísmicos.

### 6.1.2 Metodología de Elaboración del Mapa Geológico Simplificado

Una vez se han digitalizado todos los elementos de las diferentes unidades que componen la litología del país, las líneas se procesan dentro de un archivo de trabajo de MicroStation, de la siguiente manera:

- a) Se eliminan las líneas en común entre estratos adyacentes para unificar las áreas pertenecientes a un mismo grupo simplificado.
- b) Se definen los límites externos y los internos de cada zona simplificada, es decir, se cierran las áreas de clasificación y se definen las áreas incluidas dentro de ellas pertenecientes a otro grupo simplificado para permitir una identificación precisa de las nuevas unidades geológicas, asignando a cada unidad un color determinado.
- c) El proceso anterior se repite para el territorio nacional y definir así en su totalidad las zonas que conforman cada una de las unidades simplificadas, y posteriormente, se procede a separarlas dentro del archivo, en diferentes niveles de trabajo, que permitan el manejo independiente de las áreas que conforman cada grupo, lo que facilita a su vez la elaboración de los mapas derivados directamente de éste. Cada archivo de MicroStation contiene 63 niveles, de los cuales en cada uno de ellos puede almacenarse cada elemento del gráfico ya sea por colores, características, etc. Su función es facilitar la manipulación en forma de capas, de acuerdo a la conveniencia del usuario.
- d) Finalmente se forma el Mapa Geológico Simplificado a escala 1:750,000 (Ver Mapa N°1) con 5 nuevas unidades de mayor significado para la Ingeniería Civil.



Mapa N° 1

## **6.2 Mapas de Susceptibilidad a Fenómenos Sísmicos Secundarios**

El objetivo principal de los mapas de Susceptibilidad es delimitar áreas que presentan mayor amenaza a la ocurrencia del fenómeno que representan; por medio de parámetros que califican las zonas con alto, medio y bajo grado de amenaza. No se pretende dar diagnósticos definitivos, la correcta identificación de las áreas permitirá no sólo calificarlas, sino también particularizarlas para estudios más detallados y técnicos que permitan establecer con mayor precisión la naturaleza del fenómeno. Los mapas pueden utilizarse en conjunto con otros estudios que ayuden a considerar la amenaza en el proceso de planeamiento, y puede constituir una base en el desarrollo de políticas que utilizan información geocientífica dentro del planeamiento de uso del suelo. La influencia de la composición litológica es quizá una de las más relevantes en la metodología y al mismo tiempo la más complicada de evaluar, ya que la ausencia de datos geotécnicos cuantitativos debe sustituirse con la aplicación de calificativos subjetivos basados en las descripciones sumarias de que se dispone.

### **6.2.1 Mapas Derivados del Mapa Geológico Simplificado**

Los Mapas de Susceptibilidad trabajados en este proyecto que se derivan del Mapa Geológico Simplificado son:

- a) Mapa de Susceptibilidad a la Amplificación del Movimiento del Terreno
- b) Mapa de Susceptibilidad a Licuefacción

Dichos Mapas son el resultado de una metodología de evaluación simple definida por el Servicio Geológico Británico, que utiliza únicamente la información contenida en el Mapa Geológico Simplificado, y que ha sido adaptada a los recursos disponibles en países subdesarrollados como el nuestro.

El procedimiento de elaboración para los dos mapas es prácticamente el mismo y se resumen en:

1. Renombrar una copia del archivo que contiene el Mapa Geológico Simplificado con el nombre correspondiente a Licuefacción o Amplificación, según el caso.

2. Activar los niveles que contienen las áreas que, según la clasificación para cada fenómeno, deben agruparse.
3. Las áreas deben identificarse con el color correspondiente de acuerdo al grado de susceptibilidad que representan.
4. Los colores adoptados serán rojo para la alta susceptibilidad, verde para la media y blanco para la baja susceptibilidad a la ocurrencia del fenómeno.

#### **6.2.1.1 Mapa de Susceptibilidad a la Amplificación del Movimiento del Terreno**

El fenómeno de Amplificación de las ondas sísmicas hace que lugares ubicados a similar distancia del epicentro pero con suelo constituido por depósitos sedimentarios, sean sacudidos con mayor fuerza que los lugares ubicados sobre subsuelo constituido por roca.

El sismo de México en 1985 se ha convertido en el ejemplo clásico del fenómeno de amplificación de las ondas sísmicas. En El Salvador este fenómeno se puso en evidencia durante el Terremoto del 10 de octubre de 1986, ya que hubo instrumentación ubicada sobre tipos de suelo diferente, que mostró valores diferentes de aceleración<sup>9</sup>.

Los valles están formados por lo general por sedimentos acumulados y geológicamente jóvenes, lo que favorece la amplificación de las ondas sísmicas que viajan a través de los estratos de sedimentos. Este es un punto significativo si se considera que estos proveen topográficamente un lugar favorable para urbanizar y en ellos se localizan las principales ciudades y poblaciones del país

Una forma para determinar la amplificación, es la construcción de pozos, cuyo fondo es constituido por lecho de roca o material con características similares, y la superficie es el sitio blando o depósito sedimentario. En cada pozo se instalan equipos de registro en el fondo y en la superficie con el fin de medir simultáneamente un sismo y determinar el factor de amplificación.

---

<sup>9</sup> Fuente: R. E. Torres Comejo 1996 "Vigilancia Sísmica en El Salvador"

En la sección 4.3.1.1 se vieron los factores de que depende la atenuación de las ondas sísmicas, donde se considera que las condiciones geológicas relacionadas con las condiciones topográficas, representan un factor determinante en la amplificación de las ondas sísmicas.

Las propiedades geotécnicas de las unidades del Mapa Geológico Simplificado proporcionan una estimación de la respuesta del suelo a disturbios sísmicos. El incremento de la Amplificación del Movimiento del Terreno ocurrirá en las clases geológicas más débiles; este incremento se refleja en 4 clases de susceptibilidad a la amenaza: Muy baja, baja, media y alta, que son agrupadas según la tabla VII y presentadas en el Mapa N° 2.

TABLA VII  
Grupos del Mapa de Amplificación del Movimiento del Terreno

Grupo	Características	Unidad del Mapa Geológico Simplificado	Grado de Amenaza a la Amplificación
I	Aluviones, Coluviones, Depósitos lacustres, manglares y áreas inundables temporalmente.	Qa, Qal	Alta
II	Suelos volcánicos cohesivos del Cuaternario y del Terciario (Suelos de Ingeniería)	Vc, Vt	Media
III	Roca Suave	SR	Baja <sup>10</sup>
IV	Roca Dura	Hr	Muy Baja

### 6.2.1.2 Mapa de Susceptibilidad a Licuefacción

Según investigaciones de campo dentro y alrededor de San Salvador realizadas después del terremoto de 1986, puede decirse que la licuefacción en el área epicentral del terremoto fue en el mejor de los casos, imposible; la ausencia de este efecto es consistente con la profundidad del nivel freático bajo San Salvador que oscila entre 50 a 150 m. Sin embargo, pudo haber ocurrido licuefacción local en las colinas al Norte y Sur de la ciudad, donde el nivel freático superficial está a 16.5 pies y las condiciones litológicas son desfavorables<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Este grupo no ha sido considerado por no definirse el grupo de rocas suaves en el Mapa Geológico Simplificado

<sup>11</sup> Fuente: Earthquake Spectra 1987

Después del terremoto de 1965 en San Salvador, los efectos de licuefacción fueron vistos cerca del lago de Ilopango donde el nivel freático es más superficial que bajo la ciudad de San Salvador<sup>12</sup>.

En la zona Costera del País, es muy probable que el fenómeno de licuefacción se presentara como efecto de los movimientos sísmicos pasados, donde aluviones, manglares y sectores inundables tienen niveles freáticos muy cercanos a la superficie; pero no se tienen registros de tal fenómeno debido a que hasta hace pocos años, se ha despertado el interés de desarrollo turístico, industrial y comercial en estas zonas.

La susceptibilidad de licuefacción depende directamente de las condiciones geológicas. En el Mapa las zonas de mayor amenaza son concentradas en áreas aluvionales que por su naturaleza asociada a las masas o flujos de agua, presentan niveles freáticos poco profundos, lo que es consistente con lo establecido en la sección 4.3.1.3 donde se define que el fenómeno de licuefacción se presenta únicamente en suelos saturados poco densos.

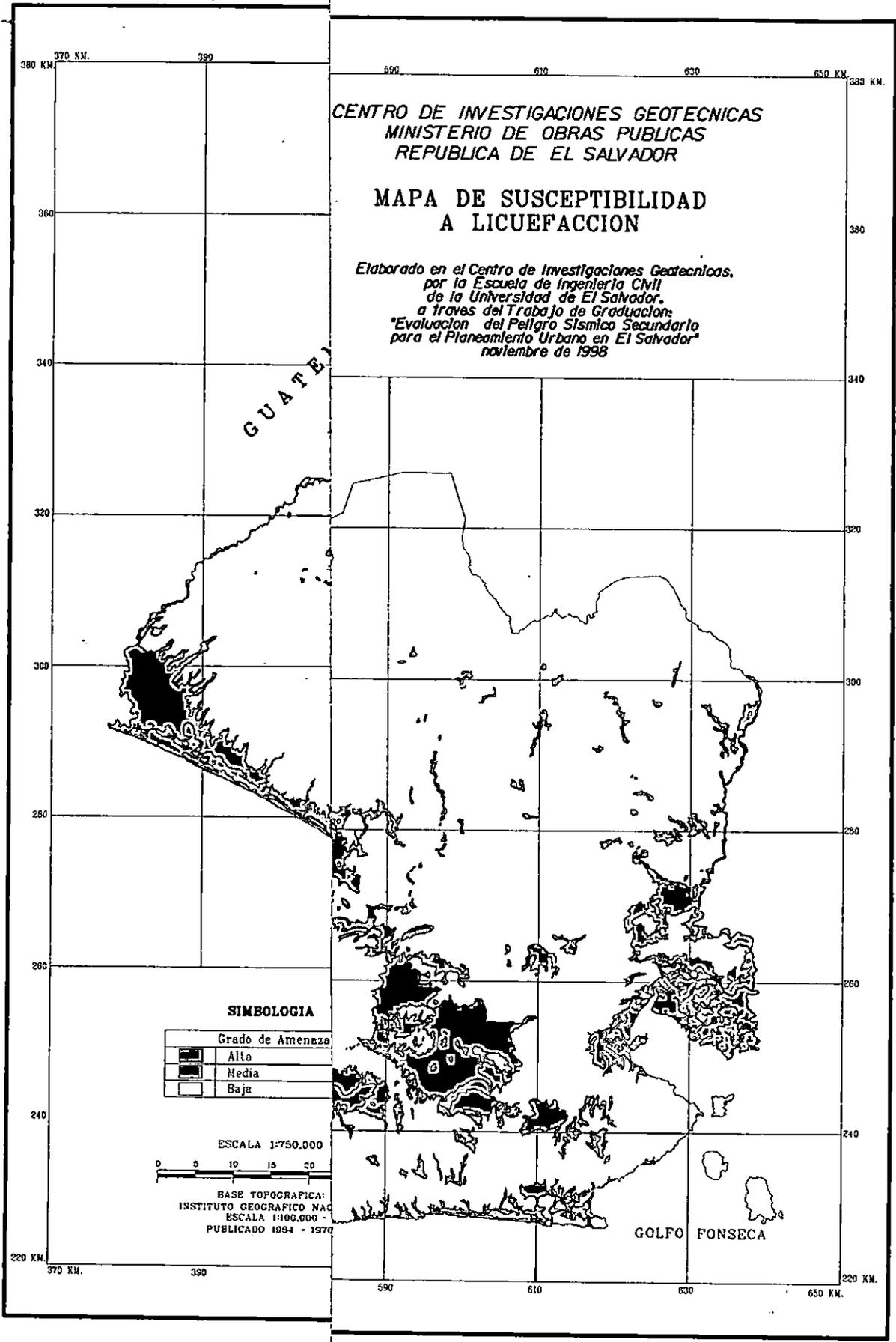
Según la tabla VIII, las unidades del Mapa Geológico Simplificado son agrupadas en 3 grados de amenaza y presentadas en el Mapa N°3

TABLA VIII

Grupos del Mapa de Licuefacción

Grupo	Características	Unidades del Mapa Geológico Simplificado	Grado de amenaza a la Licuefacción
I	Áreas aluvionales o de playas arenosas con un nivel freático muy cercano a la superficie. Corresponde a zonas pantanosas, anegadas y manglares.	Qa	Alta
II	Áreas aluvionales con un nivel freático menos cercano a la superficie que en el caso de la Alta Susceptibilidad. Corresponde en general a aluvión Cuaternario.	Qal	Intermedia
III	Área de baja o muy baja susceptibilidad de licuefacción. Se trata de rocas duras, rocas suaves, rocas volcánicas, así como los suelos desarrollados sobre éstas últimas durante el Terciario y el Cuaternario. Otras rocas y clases de Suelo.	Hr Sr Vt Vc	Baja

<sup>12</sup> Fuente: Earthquake Spectra 1987



CENTRO DE INVESTIGACIONES GEOTECNICAS  
 MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS  
 REPUBLICA DE EL SALVADOR

**MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD  
 A LICUEFACCION**

*Elaborado en el Centro de Investigaciones Geotecnicas,  
 por la Escuela de Ingenieria Civil  
 de la Universidad de El Salvador,  
 a traves del Trabajo de Graduacion:  
 "Evaluacion del Peligro Sismico Secundario  
 para el Planeamiento Urbano en El Salvador"  
 noviembre de 1998*

GUATEMALA

**SIMBOLOGIA**

Grado de Amenaza	
	Alta
	Media
	Baja

ESCALA 1:750.000  
 0 5 10 15 20

BASE TOPOGRAFICA:  
 INSTITUTO GEOGRAFICO MAG  
 ESCALA 1:100.000 -  
 PUBLICADO 1984 - 1970

GOLFO FONSECA

Mapa N° 3

## 6.2.2 Mapa de Susceptibilidad a los Deslizamientos de Tierra

Los deslizamientos de tierra representan uno de los desastres naturales que provocan cada año daños importantes y pérdidas de vidas humanas.

A lo largo de la historia, se ha comprobado que entre las causas principales de los deslizamientos pueden mencionarse: la cantidad y duración de lluvias, incremento del contenido de humedad y las presiones intersticiales en el suelo, erosión, condiciones litológicas desfavorables y la actividad sísmica de la zona.

Existen zonas en el país que por años han presentado condiciones de deslizamientos frecuentes, tal es el caso del Cerro Miramundo en el Departamento de Chalatenango, el Cerro La Burrera al Noroeste de Sensuntepeque en Cabañas, y muchos otros, caracterizados por ocurrir en zonas de pendientes fuertes, suelo suelto y saturado, rocas fracturadas, áreas deforestadas, flujos de agua en estaciones lluviosas ó fracturamiento en sus taludes.

Entre deslizamientos ocurridos en el país pueden mencionarse:

- ◆ En 1934, después de 7 días de intenso temporal, se presentaron severos deslizamientos en varios puntos del país. Todo el relieve Salvadoreño cambió debido a las enormes cantidades de deslizamientos; el principal de éstos ocurrió en el Volcán de San Salvador, el área afectada fue aproximadamente cinco veces más grande y al Oeste que la de 1982, al punto que, la masa deslizante descubrió estratos superficiales de lava volcánica<sup>13</sup>.
- ◆ En 1982, como producto de un intenso temporal, ocurrió, uno de los mayores deslizamientos de tierra en la historia de El Salvador, conocido como "Montebello". El desprendimiento se localizó en la zona conocida como El Picacho (estructura geológica de origen volcánico que limita por el noroeste a la ciudad de San Salvador), del cual una masa deslizante con un volumen aproximado de 500,000 mts<sup>3</sup> se desplazó a una velocidad considerable y estaba constituido por fragmentos de roca, suelos granulares y limos con un alto contenido de agua, el cual deslizó en forma de fluido viscoso, encausándose por una quebrada hasta llegar y sepultar la colonia Montebello.

---

<sup>13</sup> Tomado de: Hrafn & Ledru (1996)

- ◆ En 1986 durante el terremoto del 10 de octubre, se registraron cientos de deslizamientos que fueron distribuidos en un área aproximada de 200 km<sup>2</sup>, ocurridos principalmente en taludes de bancos de corte a lo largo de quebradas y carreteras. Fracturas superficiales y deslizamientos fueron el resultado de la sacudida del 13 de octubre<sup>14</sup>.
- ◆ En 1995, desde la cumbre del Volcán de San Vicente, por causas similares a las de 1982, la masa fluida arrastrando árboles y gran cantidad de rocas, deslizó por más de 8 kilómetros, interceptando en su camino dos puentes<sup>15</sup>.

A pesar de casos como el de “Montebello” y otros ocurridos en diferentes partes del país, son muy pocos los estudios que se han realizado con relación a este fenómeno; es por eso que utilizando un método de zonificación que permita señalar áreas que presentan amenaza de deslizamiento, se ha desarrollado el Mapa de Susceptibilidad a los Deslizamientos de Tierra.

#### **6.2.2.1 Determinación “A Priori” de la Amenaza de Deslizamiento, Utilizando Indicadores Morfodinámicos**

El método desarrollado por el Dr. Sergio Mora Castro y el Dr. Wilhelm-Gunther Vahrson (1991) se presenta como un modelo “a priori” sobre áreas extensas para estimar la amenaza de deslizamientos en laderas, utilizando indicadores morfodinámicos de los cuales puede encontrarse información disponible en forma relativamente sencilla.

Para determinar la amenaza a los deslizamientos se utilizan cinco indicadores morfodinámicos, los cuales son:

##### *Relieve Relativo del terreno (Rr)*

El índice de relieve relativo, es la traducción de la rugosidad natural del terreno. Para medirla se establece, por unidad de área, la mayor diferencia de elevación que precise la escala del mapa que se esté utilizando. Este indicador se calcula de la siguiente manera:

---

<sup>14</sup> Tomado de: The San Salvador Earthquake of 10 October 1986 and its historical Context.

<sup>15</sup> Tomado de: Hrafn & Ledru (1996)

$$Rr = \frac{dh}{A}$$

Donde: dh : Es la mayor diferencia de elevación

A : Area en su unidad correspondiente.

Usualmente y sobre todo cuando se trabaja en la escala 1:50,000, las unidades que se utilizan son m/Km<sup>2</sup>. Utilizando la cuadrícula del mapa, definida según la escala del análisis; se procede a hacer una codificación de determinaciones de Rr para cada centro de la cuadrícula.

La tabla IX define clases finitas de índice de influencia de Relieve relativo de terreno para aplicarlas en los procesos de cálculo automático. En la tabla se puede apreciar que el Relieve Relativo, puede tener una ponderación de cero, esto es en el caso de áreas de poco relieve (planas o casi planas). En tal caso y aunque los otros factores indiquen condiciones muy adversas, simplemente no se desarrollan los deslizamientos por falta de laderas de pendiente suficiente.

TABLA IX

Calificación del factor de Relieve Relativo del terreno (Rr)

Relieve Relativo (M / km <sup>2</sup> )	Calificativo	Valor parámetro (Rr)
0 – 75	Muy bajo	0
75 – 175	Bajo	1
176 – 300	Moderado	2
301 – 500	Mediano	3
501 – 800	Alto	4
> 800	Muy alto	5

#### Índice de Influencia de la Litología (L)

Idealmente para este indicador deben tomarse en cuenta factores como: Cohesión, fricción interna, grados de alteración meteórica e hidrotermal; pesos volumétricos, capacidad de drenaje; posición del nivel freático y tipos de rellenos en las discontinuidades. Basándose en la información disponible, la tabla X muestra las condiciones litológicas típicas, con los criterios anteriores aplicados.

**TABLA X**  
**Calificación del factor litología del terreno (L),**  
**valorando la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.**

Valor	Calificativo	Litologías
1	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Aluvión grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo.</li> <li>◆ Calizas duras, permeables.</li> <li>◆ Rocas intrusivas poco fisuradas, bajo nivel freático.</li> <li>◆ Basaltos, andesitas, ignimbritas y otras rocas efusivas, sanas, permeables y poco fisuradas.</li> <li>◆ Rocas metamórficas, sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo.</li> </ul> <p>Características físico mecánicas: Materiales sanos con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas, sin relleno.</p>
2	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Rocas sedimentarias no o muy poco alteradas, estratificación maciza (decimétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo.</li> <li>◆ Rocas intrusivas, calizas duras, lavas, ignimbritas, rocas metamórficas poco o medianamente alteradas y fisuradas.</li> <li>◆ Aluviones con compactaciones leves, con proporciones considerables de finos, drenaje moderado, nivel freático a profundidades intermedias.</li> </ul> <p>Características físico mecánicas: Resistencia al corte media a elevada, fracturas cizallables.</p>
3	Medio	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Rocas sedimentarias, intrusivas, lavas, ignimbritas, tobas poco soldadas, rocas metamórficas mediana a fuertemente alteradas, coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados, drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos.</li> </ul> <p>Características físico mecánicas: Resistencia al corte moderada a media, fracturación importante.</p>
4	Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Aluviones fluvio lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas son estratificaciones, foliaciones a favor de la pendiente y con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros.</li> </ul> <p>Características físico mecánicas: Resistencia al corte moderada a baja, con la presencia frecuente de arcillas.</p>
5	Muy alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica, rocas con estado de alteración avanzado, drenaje pobre. Se incluyen los casos 3 y 4 con niveles freáticos muy someros sometidos a gradientes hidrodinámicos elevados.</li> </ul> <p>Características físico mecánicas: Resistencia al corte muy baja, materiales blandos con muchos finos.</p>

### Humedad del suelo (H)

De acuerdo a la metodología, la determinación de la humedad del suelo es un factor importante y sólo requiere de la información de precipitación promedio mensual. Esta determinación sigue los pasos siguientes:

1. Se categorizan los promedios mensuales, según la tabla XI

TABLA XI  
Categorización de los valores acumulados  
de precipitación promedio mensual.

Precipitación promedio (mm / mes)	Valor asignado
< 125	0
125 – 250	1
> 250	2

2. Se suman los doce valores asignados a cada mes en una estación, y se llega a un valor acumulado entre 0 y 24.
3. Este valor acumulado se clasifica en cinco grupos, según la tabla XII

TABLA XII  
Calificación del factor Humedad del terreno (H)

Valor acumulado	Calificativo	Valor parámetro (H)
0 – 4	Muy bajo	1
5 – 9	Bajo	2
10 – 14	Medio	3
15 – 19	Alto	4
20 – 24	Muy Alto	5

### Intensidad Sísmica (S)

Con el objeto de establecer los criterios para definir las clases de influencia de la actividad sísmica sobre la generación de deslizamientos, se realiza una correlación entre la intensidad (Mercalli

modificada), y las aceleraciones pico de la gravedad inducida al suelo; de ahí, se definen los índices de influencia de la sismicidad.

Esta información, se resume en la tabla XIII, en la que se han definido 10 clases para cada situación específica.

**TABLA XIII**  
Calificación del factor Sismicidad (S)

Aceleraciones Pico (% g)	Calificativo	Parámetro
1 - 12	Leve	1
13 - 20	Muy bajo	2
21 - 29	Bajo	3
30 - 37	Moderado	4
38 - 44	Medio	5
45 - 55	Elevado	6
56 - 65	Fuerte	7
66 - 73	Bastante fuerte	8
74 - 85	Muy fuerte	9
> 85	Extremadamente fuerte	10

**TABLA XIV**  
Calificación del factor Lluvias del terreno (L)

Lluvias Máximas Promedio n < 10 años (mm)	Calificativo	Valor parámetro (L)
< 50	Muy bajo	1
50 - 90	Bajo	2
90 - 130	Medio	3
130 - 175	Alto	4
> 175	Muy Alto	5

#### Intensidad de Lluvias (L)

Para la caracterización de la intensidad de lluvias, se debe seguir los pasos siguientes:

1. Determinar para todas las estaciones, la serie de los valores máximos diarios anuales.

2. Para registros de estaciones menores de 10 años ( $n^{16} < 10$  años), calcular en cada estación el promedio de las lluvias máximas en mm
3. Asignar a estos valores, el valor del parámetro LL, según la tabla XIV

Valores de los Niveles y Clases de Amenaza.

Utilizando los valores paramétricos antes descritos, se obtiene una serie de rangos y clases que ilustran la amenaza de generación de deslizamientos en determinada región o localidad.

TABLA XV  
Clasificación de la Amenaza de Deslizamiento

Potencial	Clase	Grado de Amenaza
0 – 6	I	Muy bajo
7 – 32	II	Bajo
33 – 162	III	Moderado
163 – 512	IV	Mediano
513 – 1250	V	Alto
> 1250	VI	Muy Alto

#### 6.2.2.2 Adaptación del método Mora & Vahrson para El Salvador

Para la elaboración en El Salvador, del Mapa de Susceptibilidad a los Deslizamientos de Tierra, se adoptaron inicialmente las siguientes consideraciones:

1. La base cartográfica a utilizar es proporcionada por el Instituto Geográfico Nacional, cuadrantes escala 1:50,000, proyección cónica conformal Lambert. (55 hojas para todo el País)
2. Se establece 1 km<sup>2</sup> como área de trabajo para todos los parámetros a considerar.

El trabajo que se presenta en esta sección es el resultado de la revisión del mapa elaborado por el Centro de Investigaciones Geotécnicas, para la cual se agregan las consideraciones siguientes:

---

<sup>16</sup> n: número de años de registro

1. Debido a que en las últimas ediciones de los cuadrantes topográficos no se presenta información completa de las hojas: Santa Rosa de Lima, La Unión y Conchagua, la información faltante se toma de la edición de 1975, de los cuadrantes del mismo nombre.
2. Se considera la información contenida en zonas de traslapes (horizontales y verticales) entre cuadrantes.
3. A excepción de las hojas de Cuisnahuat, La Libertad, Jucuarán, Olomega, Conchagua, La Unión, Santa Rosa de Lima y Monteca, todos los cuadrantes contienen 27 km en longitud y 18 km en latitud. Para la revisión de cada cuadrante se utilizan plantillas de iguales dimensiones (una por parámetro) con una fila extra para las hojas donde se consideren los traslapes horizontales.

La determinación del parámetro y del valor asignado de acuerdo al método Mora & Vahrson (ver sección 6.2.2.1) se hace de la siguiente manera:

#### Relieve Relativo (Rr)

Para la obtención del Rr se utilizan los cuadrantes topográficos escala 1:50,000, estos presentan curvas de nivel con intervalos de 20 m. y una cuadrícula kilométrica.

Para cada unidad de área se mide la curva de mayor y la de menor altura, se restan entre sí para obtener una diferencia de nivel y se divide entre el área de estudio ( $1 \text{ km}^2$ ). Para cada valor de Rr se determina el parámetro correspondiente según la tabla IX

La evaluación de traslapes se establece latitudinalmente sobre los kilómetros 264, 320 y 375. La línea de traslape inicia en la última fila de un cuadrante y termina en la primera fila del siguiente, información que pasa a ser parte de la fila No. 19 del cuadrante anterior. Los traslapes verticales significativos, se establecieron en la zona oriental, estos inician en la última columna de un cuadrante para finalizar en la primera columna del siguiente, pasando la información del primer cuadrante a ser parte de éste último.

Se revisa un promedio de 15 puntos (Km.<sup>2</sup>) por cuadrante de los cuales se establece los puntos a corregir o la necesidad de repetir el calculo de toda la hoja si los puntos erróneos superan el 50% de la muestra. Finalmente se repitió el calculo de 9 hojas.

Un resumen de los cálculos se presenta en la tabla XVI.

### Litología (L)

El parámetro litológico se toma de las seis hojas que conforman el Mapa Geológico de la República de El Salvador en escala 1:100,000. La información se determina con plantillas transparentes cuadradas kilométricamente en la escala correspondiente, la cual se coloca sobre las hojas geológicas, con el área de cada cuadrante topográfico previamente establecida, de forma que la información por kilómetro cuadrado corresponda al kilómetro cuadrado con las mismas coordenadas de los otros parámetros. La posición de la plantilla debe prevenir la condición de filas extras para no correr la información a posiciones erróneas.

Para definir la litología por kilómetro cuadrado, en caso de tener varias unidades dentro de la misma área, se elige el estrato predominante. En kilómetros que presentan igual distribución de estratos, se elige el más desfavorable para determinar el parámetro.

Un área de aproximadamente 30 km<sup>2</sup> no presenta la información del parámetro litológico. La ubicación de dicha información corresponde a la zona fronteriza con Honduras de los cuadrantes topográficos Arcatao y Río Sumpul, y debería encontrarse en la hoja Chalatenango del Mapa Geológico escala 1:100,000. Para evitar asunciones erróneas, en cuanto a la litología del lugar no se evalúa el grado de amenaza por los deslizamientos de tierra de la zona.

La calificación del parámetro litológico, fue adaptada a la tabla X por el departamento de Geología del CIG, de acuerdo al método Mora & Vahrson, definiendo cada una de las veintiséis unidades, con el calificativo de bajo, moderado, mediano, alto y muy alto, según el caso. Los resultados se presentan en la tabla XVII

**TABLA XVI-A**  
**Consideraciones realizadas con los Cuadrantes Topográficos en la Revisión**  
**de Relieve Relativo - Zona Occidental**

N° Hoja	NOMBRE	N° de columnas	N° de filas	UBICACION SEGUN PROYECCION LAMBERT				TRASLAPE CONTENIDO EN HOJA ADYACENTE			
				Coordenadas X (km)		Coordenadas Y (km)		Nombre de la hoja (traslape en km)			
				Inicio	Final	Inicio	Final	Norte	Sur	Este	Oeste
2157-I	San Fco. Menéndez*	27	19	365	392	301	320	-	D.Río Paz (0.6)	Ahuachapán (0.075)	-
2157-II	D. Río Paz	27	18	365	392	283	301	San Fco. Menéndez (-)	-	Jujutla (0.15)	-
2258-III	Paso el Jobo	27	18	392	419	320	338	-	Ahuachapán (-)	Cand de la Front (-)	-
2257-IV	Ahuachapán*	27	19	392	419	301	320	Paso El Jobo (0.06)	Jujutla (0.5)	Santa Ana (0.05)	San Fco. Menéndez (-)
2257-III	Jujutla	27	18	392	419	283	301	Ahuachapán (-)	Acajutla (0.075)	Sonsonate (-)	D. Río Paz (0.12)
2256-IV	Acajutla	27	18	392	419	265	283	Jujutla (-)	-	Cuisnahuat (0.16)	-
2259-II	El Shiste*	27	19	419	446	356	375	-	Sn Antonio Pajonal (0.7)	Metapán (-)	-
2258-I	San Antonio Pajonal	27	18	419	446	338	356	El Shiste (-)	Cand de la Front (0.3)	Masahuat (-)	-
2258-II	Cand. de la Frontera	27	18	419	446	320	338	Sn Antonio Pajonal (-)	Santa Ana (-)	Nva Concepción (-)	Paso El Jobo (-)
2257-I	Santa Ana*	27	19	419	446	301	320	Cand de la Front (0.17)	Sonsonate (0.45)	San Juan Opico (-)	Ahuachapán (-)
2257-II	Sonsonate	27	18	419	446	283	301	Santa Ana (-)	Cuisnahuat (-)	Nva Sn Salvador (0.12)	Jujutla (-)
2256-I	Cuisnahuat	27	20	419	446	263	283	Sonsonate (0.02)	-	La Libertad (0.1)	Acajutla (-)
2359-III	Metapán*	27	19	446	473	356	375	-	Masahuat (0.7)	San Ignacio (-)	El Shiste (0.06)
2358-IV	Masahuat	27	18	446	473	338	356	Metapán (-)	Nva Concepción (0.25)	Tejutla (-)	Sn Antonio Pajonal (0.06)
2358-III	Nueva Concepción	27	18	446	473	320	338	Masahuat (-)	San Juan Opico (-)	El Paraiso (-)	Cand de la Front (0.025)
2357-IV	San Juan Opico*	27	19	446	473	301	320	Nva Concepción (0.175)	Nva Sn Salvador (0.35)	Suchitoto (0.02)	Santa Ana (-)
2357-III	Nueva San Salvador	27	18	446	473	283	301	San Juan Opico(-)	La Libertad (-)	San Salvador(0.01)	Sonsonate(-)
2356-IV	La Libertad	27	23	446	473	260	283	Nva Sn Salvador (0.05)	-	Olocuilta(0.06)	Cuisnahuat (-)

\* La última fila considerada corresponde al traslape que termina en la hoja siguiente.

**TABLA XVI-B**  
**Consideraciones realizadas con los Cuadrantes Topográficos en la Revisión**  
**de Relieve Relativo - Zona Central**

N° Hoja	NOMBRE	N° de columnas	N° de filas	UBICACION SEGUN PROYECCION LAMBERT				TRASLAPE CONTENIDO EN HOJA ADYACENTE			
				Coordenadas X (km)		Coordenadas Y (km)		Nombre de la hoja (traslape en km)			
				Inicio	Final	Inicio	Final	Norte	Sur	Este	Oeste
2359-II	San Ignacio*	27	19	473	500	356	375	-	Tejutla (-)	-	Metapán (0.04)
2358-I	Tejutla	27	18	473	500	338	356	San Ignacio (-)	El Paraíso (0.25)	Río Sumpul (-)	Masahuat (0.035)
2358-II	El Paraíso	27	18	473	500	320	338	Tejutla (-)	Suchitoto (-)	Chalatenango (-)	Nva. Concepción (-)
2357-I	Suchitoto*	27	19	473	500	301	320	El Paraíso (0.20)	San Salvador (-)	Ilobasco (-)	Opico (-)
2357-II	San Salvador	27	18	473	500	283	301	Suchitoto (-)	Olocuilta (-)	Cojutepeque (-)	Nva. San Salvador (-)
2356-I	Olocuilta*	27	19	473	500	264	283	San Salvador (0.10)	Río Jiboa (-)	San Vicente (-)	La Libertad (-)
2356-II	Río Jiboa	27	18	473	500	246	264	Olocuilta (-)	-	Herradura (0.05)	-
2458-IV	Río Sumpul	27	18	500	527	338	356	-	Chalatenango (0.20)	-	Tejutla (-)
2458-III	Chalatenango	27	18	500	527	320	338	Río Sumpul (-)	Ilobasco (-)	Arcatao (0.05)	El Paraíso (-)
2457-IV	Ilobasco*	27	19	500	527	301	320	Chalatenango (0.20)	Cojutepeque (-)	Sensuntepeque (-)	Suchitoto (-)
2457-III	Cojutepeque	27	18	500	527	283	301	Ilobasco (-)	San Vicente (-)	Titihuapa (-)	San Salvador (-)
2456-IV	San Vicente*	27	19	500	527	264	283	Cojutepeque (0.10)	Herradura (-)	Pte. Cuscatlán (-)	Olocuilta (-)
2456-III	La Herradura	27	18	500	527	246	264	San Vicente (-)	D. Río Lempa (0.05)	Berlín (-)	Río Jiboa (-)
2455-IV	D. del Río Lempa	27	18	500	527	228	246	Herradura (-)	-	Jiquilisco (-)	-
2458-II	Arcatao	27	18	527	554	320	338	-	Sensuntepeque (-)	-	Chalatenango (-)
2457-I	Sensuntepeque*	27	19	527	554	301	320	Arcatao (0.20)	Titihuapa (-)	Carolina (-)	Ilobasco (-)
2457-II	Río Titihuapa	27	18	527	554	283	301	Sensuntepeque (-)	Pte. Cuscatlán (-)	Sesori (-)	Cojutepeque (0.05)
2456-I	Puente Cuscatlán*	27	19	527	554	264	283	Titihuapa (0.05)	Berlín (-)	Valle la Esperanza (-)	San Vicente (0.05)
2456-II	Berlín	27	18	527	554	246	264	Pte. Cuscatlán (-)	Jiquilisco (0.1)	Usulután (-)	Herradura (0.05)
2455-I	Jiquilisco	27	18	527	554	228	246	Berlín (-)	-	Jucuarán (-)	D. Río Lempa (0.10)

\* La última fila considerada corresponde al traslape que termina en la hoja siguiente.

**TABLA XVI-C**  
**Consideraciones realizadas con los Cuadrantes Topográficos en la Revisión**  
**de Relieve Relativo - Zona Oriental**

N° Hoja	NOMBRE	N° de columnas	N° de filas	UBICACION SEGUN PROYECCION LAMBERT				TRASLAPE CONTENIDO EN HOJA ADYACENTE			
				Coordenadas X (km)		Coordenadas Y (km)		Nombre de la hoja (traslape en km)			
				Inicio	Final	Inicio	Final	Norte	Sur	Este	Oeste
2557-IV	Carolina*	27	19	554	581	301	320	-	Sesori (0.40)	Jocoaitique (-)	Sensuntepeque (0.05)
2557-III	Sesori	27	18	554	581	283	301	Carolina (-)	Valle la Esperanza (-)	Sn. Fco. Gotera (-)	Tituapa (0.07)
2556-IV	Valle la Esperanza*	27	19	554	581	264	283	Sesori (-)	Usulután (-)	Jocoro (-)	Puente Cuscatlán (0.15)
2556-III	Usulután	27	18	554	581	246	264	Valle la Esperanza (-)	Jucuarán (0.12)	San Miguel (-)	Berlín (0.17)**
2555-IV	Jucuarán	27	19	554	581	227	246	Usulután (-)	-	Olomega (-)	Jiquilisco (0.22)
2558-II	Sabanetas	27	18	581	608	320	338	-	Jocoaitique (-)	-	-
2557-I	Jocoaitique*	27	19	581	608	301	320	Sabanetas (0.05)	Sn Fco. Gotera (0.5)	Monteca (-)	Carolina (0.07)
2557-III	Sn. Fco. Gotera	27	18	581	608	283	301	Jocoaitique (-)	Jocoro (-)	Nva. Esparta (-)	Sesori (0.15)
2556-I	Jocoro*	27	19	581	608	264	283	Sn. Fco. Gotera (-)	San Miguel (0.65)	Sta. Rosa de Lima (-)	Valle la Esperanza (0.20)**
2556-III	San Miguel	27	18	581	608	246	264	Jocoro (-)	Olomega (0.8)	La Unión (-)	Usulután (0.27)**
2555-IV	Olomega	27	20	581	608	226	246	San Miguel (-)	-	Conchagua (-)	Jucuarán (0.30)**
2657-IV	Monteca*	29	19	608	637	301	320	-	Nva. Esparta (0.6)	-	Jocoaitique (0.10)
2657-III	Nva. Esparta	27	18	608	635	283	301	Monteca (-)	Sta. Rosa de Lima (0.2)	Nva. Concepción (-)	Sn. Fco. Gotera (0.20)
2656-IV	Sta. Rosa de Lima*	31	19	608	639	264	283	Nva. Esparta (-)	La Union (0.75)	-	Jocoro (0.30)**
2656-III	La Unión	32	18	608	640	246	264	Sta. Rosa de Lima (-)	Conchagua (0.3)	-	San Miguel (0.35)**
2655-IV	Conchagua	35	20	608	643	226	246	La Unión (-)	-	-	Olomega (0.45)**
2657-III	Nueva Concepción de Oriente	27	18	635	662	283	301	-	-	-	Nva. Esparta (0.20)

\* La última fila considerada corresponde al traslape que termina en la hoja siguiente.

\*\* La primera columna considera el traslape contenido en la hoja al Oeste.

TABLA XVII

## Determinación del Parámetro Litológico para El Salvador

Formación	Unidad	Descripción	Calificativo	Valor del Parámetro
San Salvador	Qf	Limo arenoso, arena limosa, arcillas, aluviones finos y gruesos	Muy alto	5
	s5'c	Tobas medianamente consolidadas	Mediano	3
	s5'b	Escoria volcánica, tobas consolidadas	Bajo	1
	s5'a	Andesitas, basaltos sin meteorización	Bajo	1
	s4	Tierra blanca de San Salvador, arena limosa y limo arenoso	Alto	4
	s3'b	Riolitas y dacitas sin meteorización	Mediano	3
	s3'a	Tobas color café, tobas de ceniza volcánica	Alto	4
	s2	Andesitas y basaltos, tobas consolidadas no meteorizadas	Bajo	1
	s1	Tobas consolidadas, tobas aglomeráticas, tobas fundidas y andesitas	Mediano	3
Cuscatlán	c3	Andesitas, basaltos medianamente meteorizados	Moderado	2
	c2	Riolita, dacita y andesita	Moderado	2
	c1	Tobas consolidadas, ceniza volcánica	Mediano	3
El Bálsamo	b3	Andesitas y basaltos con ligera meteorización	Moderado	2
	b2	Andesitas, tobas consolidadas	Mediano	3
	b1	Aglomerados volcánicos, intercalados con tobas y corrientes de lava andesíticas y basálticas	Mediano	3
Chalatenango y Morazán	ch2	Riolitas, dacitas, tobas consolidadas, fuertemente meteorizadas	Moderado	2
	ch1	Tobas fundidas o tobas soldadas, tobas consolidadas	Mediano	3
	l	Granito, granadorita, diorita	Moderado	2
	m2'b	Tobas bien consolidadas (meteorizadas)	Mediano	3
	m2'a	Riolitas, andesitas y dacitas (fuertemente meteorizadas)	Moderado	2
	m1'b	Riolitas, dacitas y tobas fundidas	Moderado	2
	m1'a	Tobas ácidas	Mediano	3
Valle de Angeles	va	Conglomerados de cuarzo y caliza, areniscas, silíticas, lutitas	Moderado	2
Grupo Yojoa	yo	Calizas y calizas arcillosas	Moderado	2
Todos Santos	ts	Areniscas, silíticas, lutitas, conglomerados de cuarzo	Alto	4
	ts'm	Sedimentos metamorfizados	Muy alto	5

Fuente: "Cartografía de Deslizamientos de Tierra de El Salvador", Departamento de Geología, CIG.

El parámetro litológico se evalúa nuevamente para todo el país, pues su definición requiere precisión al extraerse, para que las áreas coincidan con las definidas en los cuadrantes topográficos; aun así siempre hay información faltante en las fronteras con otros países y con el océano; en los cuadrantes de La Unión, Santa Rosa de Lima, Monteca, Olomega, Acajutla, La Libertad, Cuisnahuat, etc. La Litología se establece en estos casos tomando el parámetro predominante del área adyacente.

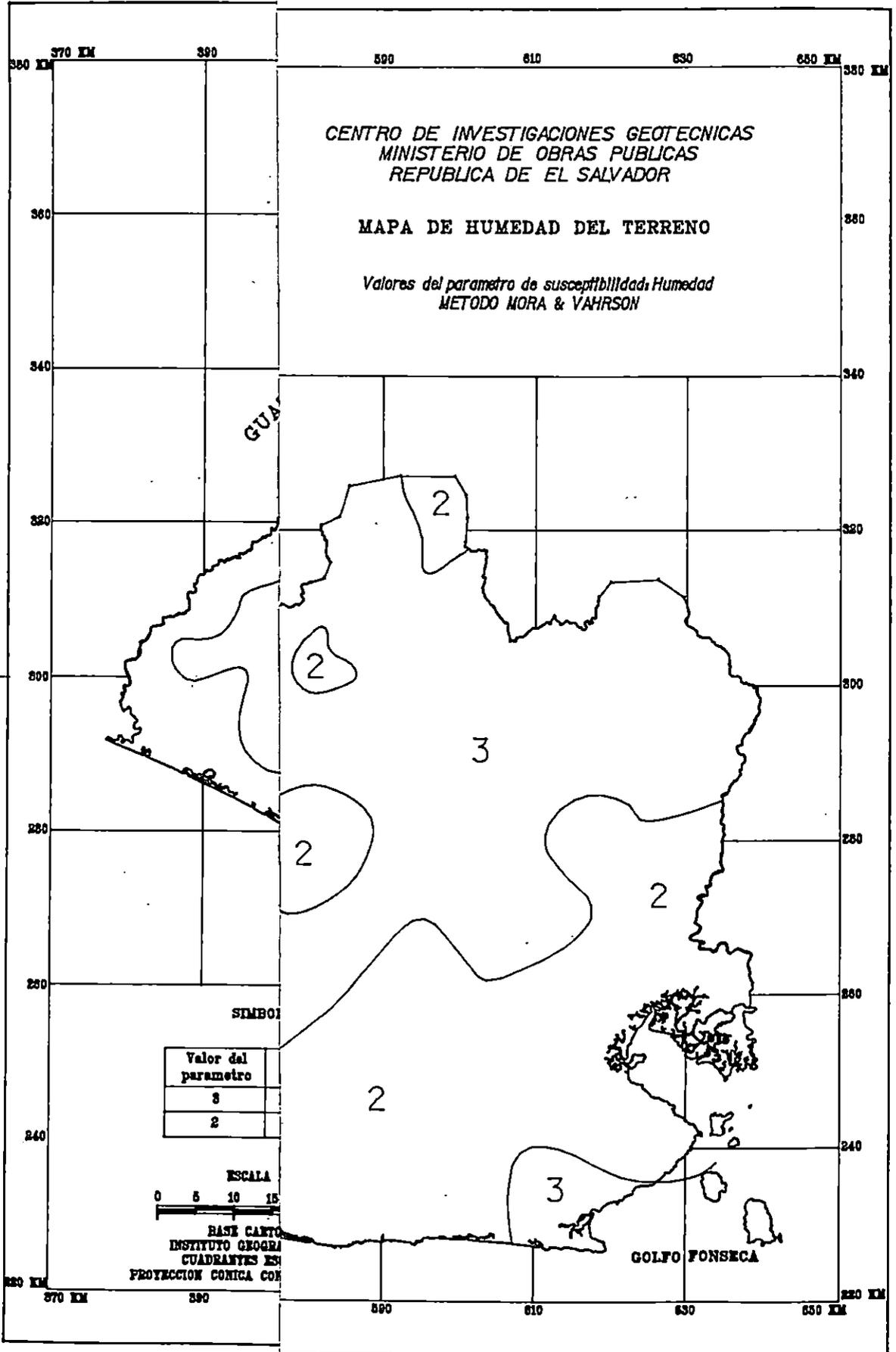
### Humedad (H)

Para la evaluación de la humedad el CIG procesó los datos de precipitación promedio mensuales, hasta el año de 1985, para cada una de las 226 estaciones pluviométricas a lo largo de todo el país, información extraída del almanaque meteorológico de 1993, publicada por el Departamento de Meteorología de la Dirección de Recursos Naturales Renovables del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Para cada estación se cuenta con un promedio de precipitación por mes, a los cuales se le asigna el valor según la tabla XI, con el resultado de la suma de los doce valores se determina el parámetro correspondiente a cada estación de acuerdo a la tabla XII.

Con los parámetros de humedad de cada estación, se elabora el Mapa de Humedad del Suelo definiendo por interpolación, curvas de igual valor (ver Mapa N° 4), este se imprimió en escala 1:300,000 con una cuadrícula kilométrica que facilitara la obtención de los parámetros por kilómetro cuadrado.

Debido a esto la revisión, aunque es completa, se concentra en aquellos puntos en el límite de dos áreas de diferente parámetro de humedad, para establecer cual es el valor predominante.



CENTRO DE INVESTIGACIONES GEOTECNICAS  
 MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS  
 REPUBLICA DE EL SALVADOR

MAPA DE HUMEDAD DEL TERRENO

Valores del parametro de susceptibilidad: Humedad  
 METODO MORA & VAHRSON

SIMBOLOS

Valor del parametro	
3	
2	

ESCALA  
 0 5 10 15  
 BASE CARTOGRAFICA  
 INSTITUTO GEOGRAFICO  
 CUADRANTES EN  
 PROYECCION CONICA CON

Mapa N° 4

### Intensidad de Lluvias (LI)

La intensidad de Lluvias para toda el área territorial se establece utilizando los valores de las intensidades máximas diarias durante los años de 1970 a 1976, para cada una de las 226 estaciones distribuidas, para entonces, en todo el país.

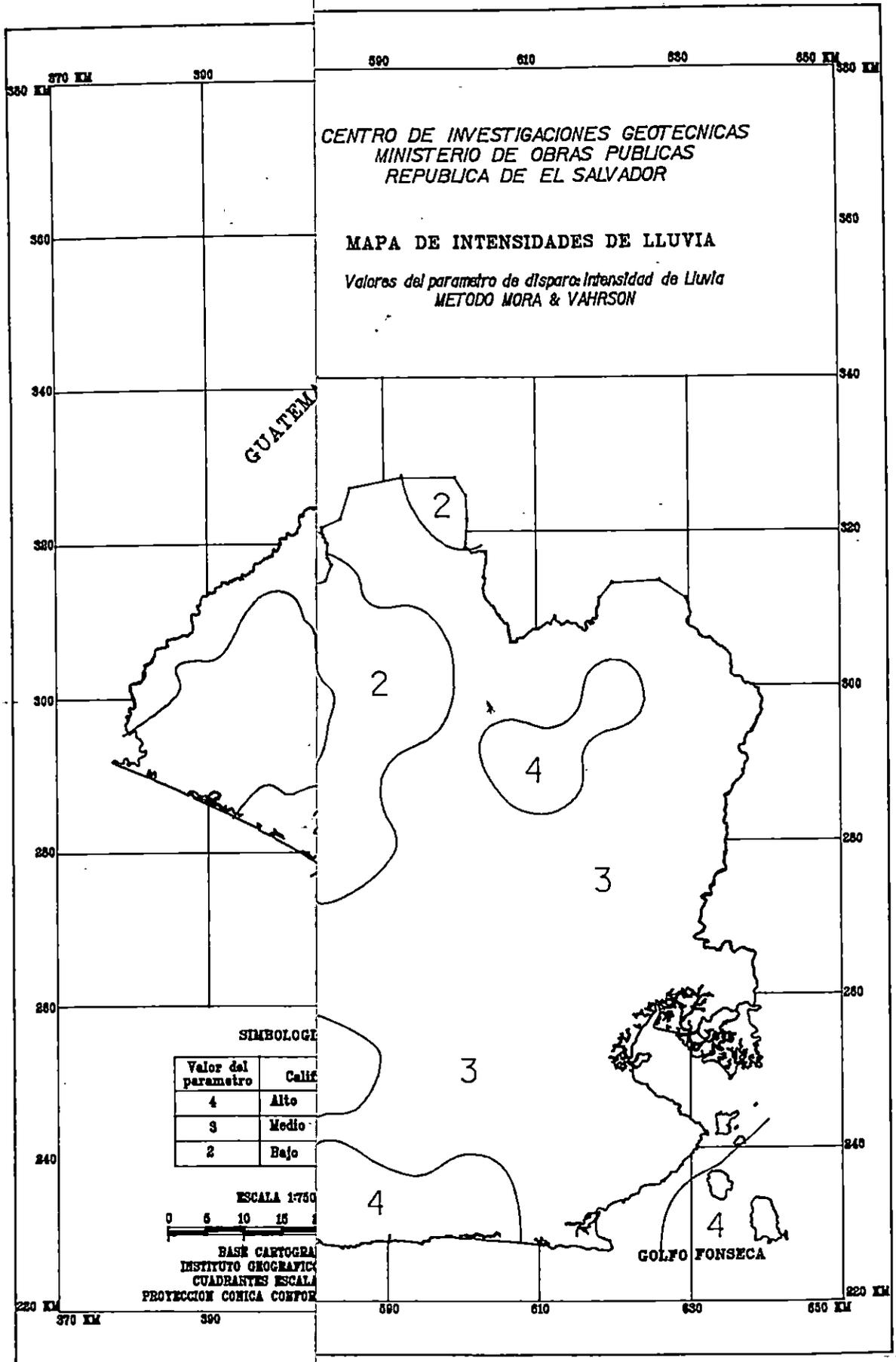
Al igual que para el parámetro de humedad se elaboró un Mapa de zonificación de Intensidades de Lluvia. Los valores máximos diarios de intensidad de lluvia por año, con un total de siete valores por estación fueron promediados, como lo establece el método para una serie de registros menor de diez años. Una vez promediados se le asigna un valor de LI conforme a la tabla XIV.

Una vez que se tienen asignados los valores por estación, se procede de igual forma que para el parámetro de humedad, para obtener el mapa de Intensidades de Lluvia (ver Mapa N° 5) La revisión enfatiza las zonas límites entre áreas de diferente parámetro de intensidad.

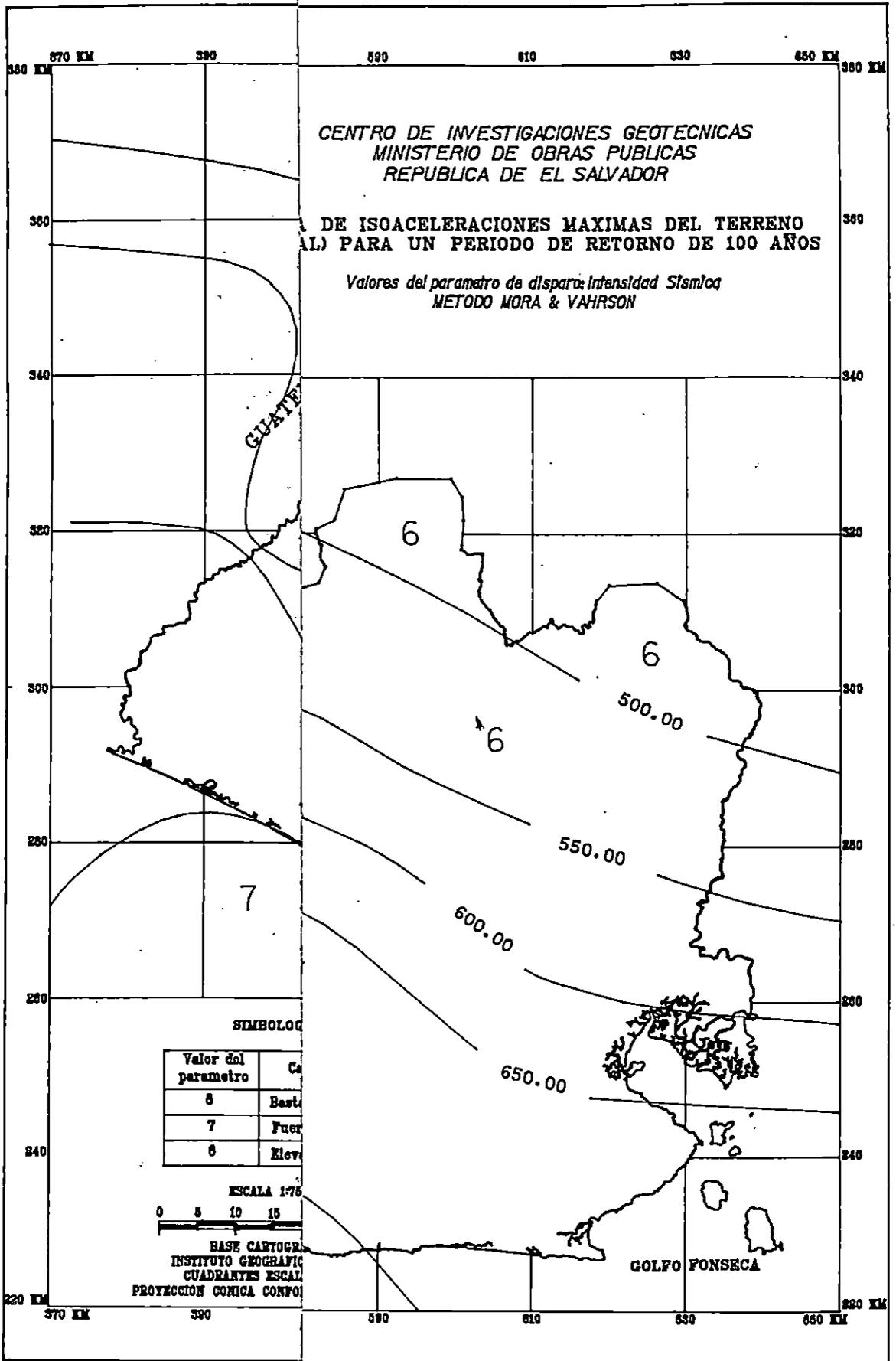
### Intensidad Sísmica (S)

La amenaza sísmica, como se estableció en el capítulo 4 se determina a partir de la intensidad sísmica, en este caso, entendiéndolo como intensidad, un parámetro que proporcione una estimación del movimiento del terreno. Uno de los parámetros utilizados para definir dicha cantidad es la aceleración pico o la aceleración máxima registrada. Para establecer este nivel de amenaza o peligro sísmico a menudo se elaboran estudios cuyo resultado es una zonificación sobre la base de mapas de Isoaceleraciones (Curvas de igual aceleración del movimiento del terreno), delimitando las áreas en las que se espera igual respuesta al suelo a la hora de un evento sísmico

El Mapa de Isoaceleraciones utilizado para evaluar el parámetro Sismicidad (ver Mapa N° 6) es el resultado de un estudio realizado en julio de 1993 por Singh et al (ver sección 5.2.2), para un período de retorno de 100 años, y se imprimió en el CIG en escala 1:300,000, con la cuadrícula kilométrica que permite la revisión del parámetro.



Mapa N° 5



Mapa N° 6

Como el mapa está elaborado en unidades de aceleraciones ( $\text{Gal} = \text{cm}/\text{seg}^2$ ) se necesita convertir dichas unidades a porcentajes de gravedad, para introducirse a la tabla XIII y para asignar el parámetro de sismicidad que corresponde. Dicha conversión se hace dividiendo el valor de la aceleración entre 980 gals (el valor de la gravedad), y multiplicándolo por 100; una vez hecha esta conversión se obtiene la Tabla XVIII:

TABLA XVIII  
Determinación del Parámetro Sísmico para El Salvador

Aceleración pico (Gals)	Porcentaje de gravedad	calificación	Valor del Parámetro
650	66.33	Bastante fuerte	8
600	61.22	Fuerte	7
550	56.12	Fuerte	7
500	51.02	Elevado	6

Para obtener finalmente el potencial y la clase de amenaza que establece el método se requiere evaluar la fórmula del potencial de amenaza en base a los diferentes parámetros involucrados la cual se define así:

$$\text{Amenaza de Deslizamiento (Ad)} = (\text{Rr} \times \text{L} \times \text{H}) \times (\text{S} + \text{Ll})$$

Para ello se utiliza una hoja electrónica, donde se procesan todos los parámetros para obtener directamente el grado de amenaza por  $\text{Km}^2$ . Un ejemplo de los resultados, es la hoja de Santa Rosa de Lima que se presenta en el anexo 2

Después de calcular la clase de amenaza para los cincuenta y cinco cuadrantes, cada valor es introducido en un archivo del programa MicroStation, para obtener el mapa de susceptibilidad, revisado y corregido (ver Mapa N° 7)

En la tabla XIX se presenta un resumen del trabajo realizado durante la revisión del Mapa preliminar elaborado en el CIG.

TABLA XIX-A  
Resumen de Revisión Mapa de Deslizamientos - Zona Occidental

Hoja	Variable	kms <sup>2</sup> revisados	kms <sup>2</sup> corrigidos	kms <sup>2</sup> no considerados anteriormente	Kms <sup>2</sup> Omitidos fuera de contorno	Evaluación de traslape horizontal que termina en	Evaluación de traslape vertical que inicia en	Otros
San Fco. Menéndez	Rr	7	1	-	-	D. RioPaz	-	
	H	Toda la hoja	-	-	-		-	
	S	-	-	-	-		-	
Desembocadura del Río Paz	Ll	7	4	-	-	-	-	
	H	Toda la hoja	2	-	-		-	
	S	-	-	-	-		-	
Paso El Jobo	Rr	7	-	-	-	-	-	
	H	Toda la hoja	-	1	-		-	
	S	-	-	-	-		-	
Ahuachapán	Ll	14	-	-	-	Jujutla	-	
	H	Toda la hoja	5	-	-		-	
	S	-	5	-	-		-	
Jujutla	Ll	9	7	-	-	-	-	
	Rr	15	2	-	-		-	
	H	Toda la hoja	12	-	-		-	
Acajutla	S	11	3	-	-	-	-	
	Ll	9	11	-	-		-	
	Rr	15	1	-	-		-	
El Shiste	H	Toda la hoja	1	-	-	San Antonio Pajonal	-	
	S	11	2	-	-		-	
	Ll	7	2	-	-		-	
San Antonio Pajonal	Rr	7	1	-	15	-	-	Kms <sup>2</sup> omitidos para definir Lago Güija
	H	Toda la hoja	-	-	16		-	
	S	-	-	-	15		-	
Candelaria de la Frontera	Ll	15	3	2	-	-	-	
	Rr	-	2	-	-		-	
	H	Toda la hoja	-	-	-		-	

**TABLA XIX-B**  
Resumen de Revisión Mapa de Deslizamientos - Zona Occidental

Hoja	Variable	kms <sup>2</sup> revisados	kms <sup>2</sup> corregidos	kms <sup>2</sup> no considerados anteriormente	Kms <sup>2</sup> Omitidos fuera de contorno	Evaluación de traslape horizontal que termina en	Evaluación de traslape vertical que inicia en	Otros	
Sta. Ana	Rr	27	12	14	-	Sonsontate	-	Kms <sup>2</sup> omitidos para definir Lago Coatepeque	
	H	Toda la hoja	4				-		
	S		4				-		
	LI	hoja	5				-		
Sonsontate	Rr	15	2	-	-	-	-		
	H	Toda la hoja	-	-	-	-	-		
	S		1	-	-	-	-		
	LI	hoja	1	-	-	-	-		
Cuisnahuat	Rr	17	4	1	-	-	-		
	H	Toda la hoja	4	11	-	-	-		
	S		1	1	-	-	-		
	LI	hoja	3	11	-	-	-		
Metapán	Rr	12	1	3	19	Masahuat	-	Kms <sup>2</sup> omitidos para definir Frontera con Honduras	
	H	Toda la hoja	3				-		
	S		-				-		
	LI	hoja	6				-		
Masahuat	Rr	16	4	-	1	-	-	Km <sup>2</sup> omitido para definir Lago Güija	
	H	Toda la hoja	14	-					
	S		-	-					
	LI	hoja	5	-					
Nueva Concepción	Rr	15	3	-	-	-	-		
	H		2	-	-	-	-		
	S	Toda la hoja	-	-	-	-	-		
	LI	hoja	2	-	-	-	-		
San Juan Opico	Rr	15	2	-	-	Nueva San Salvador	-		
	H		2	-	-		-	-	
	S	Toda la hoja	-	-	-		-	-	
	LI	hoja	10	-	-		-	-	
Nueva San Salvador	Rr	15	3	-	-	-	-		
	H		-	-	-	-	-		
	S	Toda la hoja	-	-	-	-	-		
	LI	hoja	1	-	-	-	-		
La Libertad	Rr	15	4	69	-	-	-		
	H	Toda la hoja	5				-		
	S		-				-		
	LI	hoja	9				-		

TABLA XIX-C  
Resumen de Revisión Mapa de Deslizamientos - Zona Central

Hoja	Variable	kms <sup>2</sup> revisados	kms <sup>2</sup> corregidos	kms <sup>2</sup> no considerados anteriormente	Kms <sup>2</sup> Omitidos fuera de contorno	Evaluación de traslape horizontal que termina en	Evaluación de traslape vertical que inicia en	Otros	
San Ignacio	Rr	7	-	-	-	Tejutla	-		
	H	Toda la hoja	-	-	-		-		
	S	-	-	-	-		-		
	LI	-	-	-	-		-		
Tejutla	Rr	103	35	-	-	-	-		
	H	Toda la hoja	14	1	-		-		
	S	-	-	-	-		-		
	LI	-	-	-	-		-		
El Paraiso	Rr	33	7	-	12	-	-	Kms <sup>2</sup> omitidos para definir el embalse del Cerrón Grande	
	H	Toda la hoja	1	-	37		-		
	S	-	2	-	37		-		
	LI	-	1	-	37		-		
Suchitoto	Rr	41	5	-	7	San Salvador	-	Kms <sup>2</sup> omitidos para definir el embalse del Cerrón Grande	
	H	Toda la hoja	1	-	5		-		
	S	-	3	-	5		-		
	LI	-	2	-	5		-		
San Salvador	Rr	20	20	27	-	-	-	Se repitió por completo	
	H	Toda la hoja	1	-	-		-		
	S	-	-	-	24		-		Kms <sup>2</sup> omitidos para definir el Lago de Ilopango
	LI	-	1	-	24		-		
Olocuitla	Rr	30	5	-	-	Río Jiboa	-		
	H	Toda la hoja	24	-	-		-		
	S	-	13	-	-		-		
	LI	-	9	-	-		-		
Río Jiboa	Rr	12	3	2	-	-	-		
	H	Toda la hoja	1	15	-		-		
	S	-	3	13	-		-		
	LI	-	1	13	-		-		
Río Sumpul	Rr	7	1	-	-	-	-	Se repitió por completo	
	H	Toda la hoja	-	-	-		-		
	S	-	-	-	-		-		
	LI	-	-	-	-		-		
Chalatenango	Rr	15	10	-	-	-	-	Kms <sup>2</sup> omitidos para definir Frontera con Honduras	
	H	-	-	7	-		-		
	S	-	30	-	30		-		
	LI	-	3	-	35		-		
Ilobasco	Rr	31	10	4	-	Cojutepeque	-	Kms <sup>2</sup> omitidos para definir el embalse del Cerrón Grande	
	H	Toda la hoja	-	-	8		-		
	S	-	5	-	8		-		
	LI	-	14	-	8		-		
Cojutepeque	Rr	19	6	-	-	-	-	-	
	H	-	1	-	-		-		
	S	-	6	-	-		-		
	LI	-	11	-	-		-		

TABLA XIX-D  
Resumen de Revisión Mapa de Deslizamientos - Zona Central

Hoja	Variable	kms <sup>2</sup> revisados	kms <sup>2</sup> corregidos	kms <sup>2</sup> no considerados anteriormente	Kms <sup>2</sup> omitidos fuera de conorno	Evaluación de traslape horizontal que termina en	Evaluación de traslape vertical que inicia en	Otros
San Vicente	Rr	123	24	-	-	La Herradura	-	
	H	Toda la hoja	-	-	-		-	
	S		1	-	-		-	
La Herradura	U	Toda la hoja	4	-	-	-	-	
	Rr		7	1	-		-	
	H		3	2	-		-	
D. Río Lempa	S	Toda la hoja	-	-	-	-	-	
	Rr		-	-	14		-	
	H		-	-	8		-	
Arcatao	S	Toda la hoja	-	-	8	-	-	
	U		15	5	-		12	
	Rr		-	-	-		-	
Sensuntepeque	H	Toda la hoja	-	-	-	Titihuapa	-	
	S		2	2	-		3	
	Rr		1	1	-		7	
Titihuapa	U	Toda la hoja	4	3	3	-	-	
	S		2	2	-		-	
	Rr		15	3	1		-	
Pte. Cuscatlán	H	Toda la hoja	-	-	-	Berlín	-	
	S		2	2	-		-	
	Rr		14	5	-		-	
Berlín	U	Toda la hoja	7	3	-	-	-	
	H		1	1	-		-	
	S		6	6	-		-	
Jiquilisco	Rr	Toda la hoja	2	2	9	-	-	
	H		9	9	-		-	
	S		16	16	-		-	
Jiquilisco	U	Toda la hoja	14	14	10	-	-	
	H		-	-	-		-	
	S		-	-	-		-	

Km<sup>2</sup> omitidos para definir Frontera con Honduras

Km<sup>2</sup> omitidos para definir Frontera con Honduras

TABLA XIX-E  
Resumen de Revisión Mapa de Deslizamientos - Zona Oriental

Hoja	Variable	kms <sup>2</sup> revisados	kms <sup>2</sup> corregidos	kms <sup>2</sup> no considerados anteriormente	Kms <sup>2</sup> Omittidos fuera de contorno	Evaluación de traslape horizontal que termina en	Evaluación de traslape vertical que inicia en	Otros
Carolina	Rr	15	4	2	1	Sesori	-	
	H	Toda la hoja	-	1	2		-	
	S	1	1	2	1		-	
Sesori	Ll	15	5	1	1	-	-	
	Rr	2	-	-	-		-	
	H	Toda la hoja	-	-	-		-	
Valle La Esperanza	S	-	3	-	-	Usulután	-	
	H	Toda la hoja	6	-	-		-	
	Ll	8	1	-	-		-	
Usulután	Rr	14	3	-	-	-	-	
	H	Toda la hoja	3	-	-		Berlín	
	S	2	2	-	-		-	
Jucuarán	Ll	8	14	-	-	-	-	
	Rr	3	3	-	-		-	
	H	Toda la hoja	-	13 (fila 19)	-		-	
Sabanetas	S	12	5	-	-	-	-	
	Ll	5	2	-	-		-	
	Rr	15	2	-	-		-	
Jocoatique	H	Toda la hoja	-	-	-	San Francisco Gotera	-	
	S	1	-	-	-		-	
	Ll	10	-	-	-		-	
San Francisco Gotera	Rr	11	1	-	-	-	-	
	H	Toda la hoja	-	-	-		-	
	S	5	5	-	-		-	
Jocoro	Ll	15	1	-	-	-	-	
	H	Toda la hoja	1	-	-		-	
	S	14	14	-	-		-	
San Miguel	Rr	20	14	-	-	San Miguel	Valle la Esperanza	Se repitió por completo
	H	Toda la hoja	3	-	-		-	
	S	2	2	-	-		-	
San Miguel	Ll	1	1	-	-	-	-	
	Rr	25	12	-	-		Usulután	Se repitió por completo La fila 18 termina en Omitega
	H	Toda la hoja	3	-	-		-	
San Miguel	S	4	4	-	-	-	-	
	Ll	9	9	-	-		-	

**TABLA XIX-F**  
**Resumen de Revisión Mapa de Deslizamientos - Zona Oriental**

Hoja	Variable	kms <sup>2</sup> revisados	kms <sup>2</sup> corregidos	kms <sup>2</sup> no considerados anteriormente	Kms <sup>2</sup> Omitidos fuera de contomo	Evaluación de traslape horizontal que termina en	Evaluación de traslape vertical que inicia en	Otros
Olomega	Rr	20	15	24	-	-	Jucuarán	Se repitió por completo
	H	Toda la hoja	4		-		-	
	S		15		3		-	
	LI		13		-		-	
Monteca	Rr		15	7	23	-	Nueva Esparta y Concepción de Oriente	-
	H	Toda la hoja	-	5	-	-		
	S	-	29	-	-			
	LI	1	5	-	-			
Nueva Esparta	Rr	15	8	-	-	-	-	Se repitió por completo
	H	Toda la hoja	1	-	-		-	
	S	-	-	-	-			
	LI	5	-	-	-			
Santa Rosa de Lima	Rr	13	6	9	20	La Unión	Jocoro	Se repitió por completo
	H	Toda la hoja	2		-		-	
	S		5		-		-	
	LI		-		-		-	
La Unión	Rr		11	4	65	-	-	San Miguel
	H	Toda la hoja	-	-		-		
	S	6	-	-				
	LI	-	-	-				
Conchagua	Rr	15	10	65	-	-	Olomega	Se repitió por completo
	H	Toda la hoja	4		-		-	
	S		-		-		-	
	LI		-		-		-	
Concepción De Oriente	Rr		7	2	-	-	-	-
	H	Toda la hoja	-	53	-	-		
	S	-	-	3	-	-		
	LI	-	-	53	-	-		

Rr: Relieve relativo

S: Intensidad Sísmica

H: Humedad

LI: Intensidad de Lluvias

El parámetro de litología se repitió por completo para todas las hojas

## CAPITULO VII

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

Del análisis de los resultados y en base a lo anteriormente expuesto, expresamos las siguientes conclusiones:

1. La peligrosidad sísmica secundaria, puede entenderse como un fenómeno generado por un sismo que aumenta el riesgo y la amenaza en la ocurrencia del mismo; es así como en este estudio, se relacionó la peligrosidad desatada por los fenómenos de amplificación del movimiento del terreno, la licuefacción y los deslizamientos de tierra, con las características geológicas del país, tomando además la influencia de otros indicadores morfodinámicos para el fenómeno de deslizamientos de tierra.
2. La litología y la tectónica, fuera de otros accidentes relacionados, juegan un papel básico para la evaluación de la peligrosidad sísmica secundaria en un área determinada, ya sea si va a ser asiento de una estructura importante o más aún si se trata de un proyecto de desarrollo urbano.
3. Los mapas presentados con categoría preliminar, dejan ver la importancia de ampliar los estudios de efectos sísmicos secundarios y de recalcar su importancia; con el fin de lograr de que en cada proyecto grande o pequeño, el establecimiento de estos riesgos tome un lugar preferencial.
4. Los mapas elaborados, podrían ser modelo o base preliminar para realizar un planeamiento urbano ciudadano a nivel nacional, ya que nos muestran el comportamiento que el terreno tendría eventualmente con un sismo a los fenómenos de deslizamiento de tierra, licuefacción y amplificación del movimiento del terreno.
5. Los mapas de susceptibilidad señalan la conveniencia de cimentar sobre roca firme (siempre que sea posible), no como una restricción en el uso de suelos de menor estabilidad para el desarrollo de

- obras de ingeniería, sino como la necesidad de mayores consideraciones al construir en terrenos de naturaleza pantanosa, sueltos, inconsolidados o en la proximidad de las márgenes de ríos y costas.
6. Según lo expuesto, la amplificación de las ondas sísmicas, aumenta en suelos sueltos poco consolidados, y disminuye en estratos rocosos, esto es consistente con la clasificación propuesta por el Servicio Geológico Británico, la cual determina con muy baja amenaza a la amplificación del movimiento del terreno a los estratos de roca dura, con media amenaza a los suelos volcánicos y con alto grado de amenaza a los depósitos sedimentarios jóvenes.
  7. Uno de los factores más importantes en el desarrollo del fenómeno de licuefacción es la profundidad del nivel freático, lo que sugiere áreas con alto grado de amenaza a las zonas pantanosas y manglares (Qa), cuyo nivel freático es muy cercano a la superficie.
  8. En las planicies costeras, donde se concentra mucha de la actividad turística e industrial y que son zonas formadas por materiales aluviales con altos contenidos de humedad, la susceptibilidad a deslizamientos de tierra es muy baja, debido a las bajas pendientes de la zona, no así, la susceptibilidad a los fenómenos de licuefacción y amplificación del movimiento del terreno que fué determinada con un alto grado de amenaza.
  9. En la cadena costera conformada por la Cordillera del Bálsamo, las montañas de Jucuarán y la formación Tacuba, se determinó un mediano grado de amenaza por deslizamientos. Esto debido a las grandes elevaciones y la litología predominante de materiales piroclásticos y aluviales en la zona.
  10. El predominio de los aglomerados volcánicos, las andesitas y tobas consolidadas, de la actividad volcánica actual de la Cordillera Apaneca-Lamatepec y el macizo montañoso de San Salvador, hace que se genera un moderado potencial de deslizamiento.
  11. El Graben o Fosa Central que cruza todo el país de oeste a este, tanto como los valles dispersos de la Fosa Interior, poseen un nivel de amenaza por deslizamientos muy bajo a moderado, debido a las bajas pendientes que caracterizan a los valles, aún cuando esto favorece la presencia de materiales volcano-sedimentarios que podrían proceder de las laderas de las estructuras volcánicas cercanas.

12. Por otro lado, la sismicidad en el Graben, caracterizada por ser bastante fuerte, sumada a las desfavorables características en litología, permite que el grado de amenaza alcance valores medianos en aquellas áreas donde las diferencias de elevación aumentan.
13. En los valles se concentran las ciudades más importantes, y si se consideran las cabeceras departamentales como las zonas más desarrolladas urbanísticamente; puede determinarse a partir de los mapas de susceptibilidad de licuefacción y amplificación, las zonas más desfavorables en el país:

<i>Cabecera Departamental.</i>	<i>Grados de Amenaza a los Fenómenos Sísmicos Secundarios.</i>		<i>Observaciones</i>
	<i>Licuefacción</i>	<i>Amplificación del Movimiento del Terreno.</i>	
<i>Santa Ana</i>	Bajo	Medio	Hacia el sur, parte de la ciudad está cimentada sobre roca dura (Hr), por lo que la amenaza de licuefacción y amplificación es baja y muy baja, respectivamente.
<i>Sonsonate</i>	Intermedio	Alto	Debido a que se asienta sobre depósitos aluviales del cuaternario (Qal).
<i>Ahuachapán</i>	Baja	Muy baja	Cimentada en su mayoría sobre Suelos volcánicos del cuaternario, Vc (tobas color café). Así mismo, las ciudades de Atiquizaya, Concepción de Ataco y Tacuba, por otro lado, presentan una baja susceptibilidad a la licuefacción y un potencial medio de amplificación del movimiento.
<i>Chalatenango</i>	Baja	Muy Baja	Ubicada sobre Rocas duras presenta los menores grados de amenaza a los fenómenos de licuefacción y amplificación. Sin embargo, es de las zonas con menor desarrollo de infraestructura.
<i>Nva San Salvador (Santa Tecla)</i>	Baja	Muy Baja	Se ubica sobre roca dura y no presenta mayor amenaza de licuefacción y amplificación, Pero las zonas circundantes se componen de Tierra blanca y Tobas color café (Volcánicos del cuaternario, Vc) que si presentan amenaza de amplificación del movimiento.
<i>Zapotitán</i>	Media	Alta	En los últimos años ha cobrado mayor importancia por el desarrollo de carácter industrial y urbanístico, este presenta la acumulación de materiales aluviales (Qal).

<b>Cabecera Departamental.</b>	<b>Grados de Amenaza a los Fenómenos Sísmicos Secundarios.</b>		<b>Observaciones</b>
	<b>Licuefacción</b>	<b>Amplificación del Movimiento del Terreno.</b>	
<i>San Salvador, y municipios aledaños (Soyapango, Mejicanos, etc)</i>	Baja	Media	Se caracterizan por la presencia de Suelos Volcánicos del Cuaternario (Vc), tierra blanca y tobas color café.
<i>Cojutepeque</i>	Baja	Muy baja	Se ubica al pie del Cerro de las Pavas y se asienta sobre roca firme (Hr).
<i>Zacatecoluca</i>	Baja	Media	Esta cimentada en suelos volcánicos del cuaternario y el terciario (Vc y Vt)
<i>Sensuntepeque</i>	Baja	Media	Asentado sobre suelos del terciario (Vt)
<i>San Vicente</i>	Baja	Media	Se asienta sobre Tierra Blanca (Vc).
<i>Usulután y municipios aledaños como Jucuapa, Chinameca, Santiago de María y Jiquilisco,</i>	Baja	Media	Asentados sobre Tobas color café (Vc). En Puerto El Triunfo ubicado sobre áreas sometidas a la acción de la marea (Qa) la amenaza es entonces, alta por Licuefacción y alta por Amplificación.
<i>San Miguel</i>	Media	Media	Se asienta sobre Tobas color café (Volcánicos del cuaternario, Vc). Al norte de la ciudad de San Miguel, se incrementa la amenaza por amplificación a alta y se genera un grado medio de amenaza por licuefacción.
<i>San Francisco (Gotera)</i>	Mínima	Mínima	La ciudad se sitúa sobre Roca dura (Hr).
<i>La Unión</i>	Baja	Media	Ciudad portuaria del departamento de La Unión, situada a los pies del volcán Conchagua, se asienta sobre suelos del Cuaternario.

14. En la Cordillera Norte, que define la frontera con la República de Honduras, se alcanzan desniveles de hasta 600 m, lo que hace consistente un mediano potencial de deslizamientos en las altas

montañas, además la presencia de roca dura hace mínima la naturaleza por licuefacción y amplificación.

15. La cadena volcánica formada por el macizo del Tecapa; la formación San Miguel y el volcán Conchagua, tienen un grado de amenaza al deslizamiento de tierras, principalmente moderado, aumentando a medio en algunas áreas, donde la diferencia de elevación se incrementa, principalmente en el volcán de Tecapa y el volcán de San Miguel, que tienen mayor altura.
16. Analizando los resultados, la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra, depende básicamente del factor litológico y el factor de relieve relativo; aún cuando no se descarta la importancia de la intensidad de lluvias, la actividad sísmica, y la humedad retenida en el suelo como un factor favorable para la ocurrencia del fenómeno.
17. Los puntos de mayor Intensidad Sísmica no coinciden en muchas ocasiones con los puntos de mayor potencial de deslizamientos. Por ejemplo el cuadrante de Nueva San Salvador posee un nivel generalizado de sismicidad bastante fuerte y de acuerdo a los porcentajes del grado de amenaza no presenta, como debería, un porcentaje significativo del mayor valor de amenaza en el país.
18. En el anexo 3 se presenta la tabulación, en porcentajes, del grado de amenaza de deslizamientos de tierra por kilómetro cuadrado, donde un 10.84% del territorio nacional alcanza los máximos valores de amenaza (IV) y predomina una clase de amenaza moderada (III) cubriendo un 52.41% del país.
19. Comparativamente hablando, la simplificación de las unidades litológicas fué muy poca, ya que las áreas no sufrieron cambios significativos en la simplificación del mapa geológico actual como se esperaba, aunque la nomenclatura utilizada por la propuesta para cada grupo simplificado, da un mayor calificativo del tipo de material litológico a que se refiere.

## **7.2 Recomendaciones**

1. Por ser este estudio, el primero que se relaciona con la presencia de fenómenos de peligrosidad sísmica secundaria en El Salvador, se recomienda sea complementado con estudios posteriores que puedan presentar datos geotécnicos cuantitativos que ayuden a determinar con mayor precisión los grados de amenaza en zonas proyectadas a urbanizar.
2. Se considera conveniente, sumar a la información proporcionada por el mapa, estudios complementarios que consideren el factor topográfico, ya que es muy importante en el desarrollo del fenómeno de amplificación de las ondas sísmicas.
3. Se recomienda que la información proporcionada en los mapas de peligrosidad sísmica secundaria, sea incorporada al código de diseño vigente en nuestro país de forma que se estandarizen los procedimientos de diseño.
4. Una vez especificadas las áreas con peligro sísmico secundario, se recomienda que deben determinarse en estudios posteriores, los factores que se deben aplicar en el diseño estructural, para lograr la seguridad óptima, exigencias específicas del diseño estructural y de la construcción, como características sobresalientes de los reglamentos de construcción que están en uso en las partes desarrolladas del mundo.
5. Si la geología local no fuese favorable, se recomienda tener en cuenta en el diseño de la cimentación las fuerzas insólitas que puedan ejercerse en la estructura durante un terremoto, realizar una evaluación geotécnica en el lugar e incorporar las medidas de mitigación apropiadas en los planes de desarrollo.
6. Será la tarea del ingeniero desarrollar diseños y métodos constructivos que proporcionen el grado máximo de seguridad a las estructuras, ya que la tarea del proyecto sólo fué delimitar las zonas donde la amenaza por efectos secundarios de acciones sísmicas es inminente.
7. Se recomienda, que en la toma de decisiones durante la planificación o ejecución de un proyecto, se considere el uso o importancia de la estructura, ya que en proyectos de construcción en áreas

descritas como de alta o intermedia susceptibilidad a determinado fenómeno podría recomendarse una investigación de campo específica, y aquellos localizados en áreas de baja susceptibilidad no.

8. Debido a la actividad sísmica de la región, se recomienda que se realicen exploraciones a nivel nacional, a fin de que el trabajo se reduzca a verificar si los grados de amenaza en el mapa, de los fenómenos secundarios en una zona determinada, corresponden con los datos obtenidos de ese ensayo y afinar así el método.
9. Se recomienda, ahondar en el conocimiento del subsuelo, como suma de la litología y rasgos tectónicos, con el fin de aportar todo dato necesario para un desarrollo urbano más seguro.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Agueda Villar, et al (1983), GEOLOGÍA, Editorial Rueda, Segunda Edición, Alarcón (Madrid).
2. Aguilar, Carlos E. (1975), APUNTES DE GEOLOGIA GENERAL. Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas Dpto de Suelos
3. Alfaro, C.S., et al "SEISMIC ZONING AND GROUND MOTION PARAMETERS FOR EL SALVADOR". Reporte No 93. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, University de Stanford. December 1990.
4. Alfaro, C.S., "CURSO ITINERANTE INTERNACIONAL DE INGENIERÍA SISMORRESISTENTE" ASIA, del 23/Sept/95 al 7/Oct/95. Zonificación Sísmica. El Salvador .
5. ASIA (1983), Revista No. 73, RIESGO SISMICO por S. T. Algermissen.
6. Baxter, Scott (1984), LEXICO ESTRATIGRAFICO DE EL SALVADOR, Comisión Ejecutiva Hidroelectrica del Río Lempa, El Salvador.
7. Bommer, Julian (1994), SISMOLOGÍA PARA INGENIEROS. Papeles Técnicos UCA.
8. Bommer, Julian (1996), TERREMOTOS, URBANIZACIÓN Y RIESGO SÍSMICO EN SAN SALVADOR. Revista PRISMA No. 18
9. Castillo, Douglas et al, "Evaluación de Espectros de Respuesta para el Diseño de Estructuras en El Salvador." Trabajo de Graduación. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Sept. 1994.
10. Castillo, Lidia y Napoleón Campos, DESASTRES POR ACTIVIDAD SÍSMICA Y VULCANOLÓGICA Serie: Los Desastres en El Salvador una Visión Histórica Social. Volumen 1. Centro de protección para desastres (CEPRODE) 1991.

11. Chuvieco, Emilio (1990), FUNDAMENTOS DE TELEDETECCION ESPACIAL, Ediciones Rialp S.A., Primera edición, España.
12. De la Parra, Puig, Juan B (1970), GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA CIVIL Y FOTOINTERPRETACION, México.
13. Departamento de Geología (sin año), CARTOGRAFIA DE LA AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS, Centro de Investigaciones Geotécnicas, Ministerio de Obras Públicas, República de El Salvador.
14. Dercourt, Jean y Jacques Paquet (1978), GEOLOGIA. Editorial Reverte, S.A. España.
15. Escuela Centroamericana de Geología (1994), TERREMOTO DE LIMON DEL 22 DE ABRIL DE 1991, Revista Geológica de América Central, volumen especial. Universidad de Costa Rica.
16. Espíndola, J. M. - Z. Jiménez, TERREMOTOS Y ONDAS SISMICAS. Instituto de Geofísica, UNAM. México D.F. 1990.
17. Gibson, John y David A. Gunn (1996). ASSESMENT METHODOLOGY FOR THE PRODUCTION OF SECONDARY SEISMIC HAZARD MAPS IN EL SALVADOR. British Geological Survey.
18. Gunn, David A. (1996), INFORME DE DESLIZAMIENTOS. British Geological Survey.
19. Gutierrez, C., et al (1993), "PELIGRO SÍSMICO EN EL SALVADOR", informe preparado para el código sísmico de El Salvador de 1994.
20. Harvey, J.C. (1995), GEOLOGIA PARA INGENIEROS GEOTECNICOS, Editorial Limusa, México D.F.
21. Hrafn Kiernan, Sigurdur y Olivier Ledru (1996), REMEDIAL MEASURES AGAINST LANDSLIDE HAZARDS AT THE SAN SALVADOR VOLCANO, EL SALVADOR, Master of

- Science Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm.
22. Instituto Geográfico Nacional "Ing. Pablo Arnoldo Gúzman", ATLAS ESCOLAR, Impreso en los Talleres Litográficos del IGN.
  23. Larson, Edwin E y Peter W. Birkeland (1982), PUTNAM'S GEOLOGY, Fourth Edition, Oxford University Press, New York, USA.
  24. Legget, Robert F. y Paul F Karrow (1986), GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL, Editorial McGraw-Hill, Primera Edición en español, México D.F.
  25. Ministerio de Cultura y Comunicaciones (1986), GEOGRAFIA DE EL SALVADOR, primer tomo, primera edición.
  26. Montero P, Walter; et al (1997). PROYECTO DE AMENAZA SISMICA DE AMERICA CENTRAL (Informe final), Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología.
  27. Mora Castro, Sergio y Wilhelm-Gunther Vahrson (1991), DETERMINACION A PRIORI DE LA AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS EN GRANDES AREAS Y UTILIZANDO INDICADORES MORFODINAMICOS, Universidad De Costa Rica, Esc. Centroamericana de Geología y Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
  28. Peña de Rosales, Gracia Morena (1996), GUIA DE USO DE MICROSTATION GEOGRAPHICS, Unidad de Desarrollo Sistema de Información de Registro y Catastro, KADASTER / DHV – CNR.
  29. Reiter, León (1990), EARTHQUAKE HAZARD ANALYSIS ISSUER AND INSIGHTS. Columbia University Press, New York, USA.
  30. Sauter, Franz (1989), FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA SÍSMICA I. INTRODUCCIÓN A LA SISMOLOGÍA. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Primera Edición, Costa Rica.
  31. Sistema Nacional de Protección Civil (1991), ATLAS NACIONAL DE RIESGOS, México.

32. THE SAN SALVADOR EARTHQUAKE OF 10 OCTOBER 1986 AND ITS HISTORICAL CONTEXT (Revista).
33. Thiel Jr., Charles C., EARTHQUAKE SPECTRA, THE PROFESSIONAL JOURNAL OF THE EARTHQUAKE ENGINEERING. Research Institute. The San Salvador Earthquake of October 10, 1986.
34. Trefethen, Joseph H. (1974), GEOLOGIA PARA INGENIEROS, Compañía Editorial Continental, S.A., sexta impresión, México.
35. Torres Cornejo, Rodolfo Elías (1996), VIGILANCIA SISMICA EN EL SALVADOR. Ministerio de Obras Públicas, Centro de Investigaciones Geotécnicas, Departamento de Investigaciones Sismológicas.
36. UNESCO (1980). TERREMOTOS, EVALUACIÓN Y MITIGACIÓN DE SU PELIGROSIDAD. Editorial Blume. Primera Edición, España.
37. UBICACIÓN GEOLÓGICA DEL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR Y EL TERREMOTO DEL 10 DE OCTUBRE. Documento de Trabajo Año 1 No.2, Enero 1987. Páginas 2-17.
38. Weller, J. Marvin (1960), GLOSSARY OF GEOLOGY, American Geological Institute, Segunda edición, Washington D. C.

## ANEXOS

- ANEXO N° 1** Assessment Methodology for the production of Secondary Seismic Hazard Maps in El Salvador
- ANEXO N° 2** Cartografía de Amenaza por Deslizamiento
- ANEXO N° 3** Porcentajes del Grado de Amenaza de Deslizamientos de Tierra

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY

Engineering Geology and Geophysics Group  
Project Note 96/16

Secondary Seismic Hazard Project Report 96/5

**ASSESSMENT METHODOLOGY FOR THE  
PRODUCTION OF SECONDARY SEISMIC  
HAZARD MAPS IN EL SALVADOR**

10th March to 23rd March, 1996

**John Gibson & David A. Gunn**

*Authors:*

Gibson, J. & Gunn, D. A.  
BGS, Keyworth.

This report refers to work that is  
funded by the Overseas  
Development Administration  
but the views expressed are not  
necessarily those of the  
Administration.

*Bibliographic Reference:*

Gibson, J. & Gunn, D. A., 1994.  
ASSESSMENT METHODOLOGY FOR THE PRODUCTION OF  
SECONDARY SEISMIC HAZARD MAPS IN EL SALVADOR  
10th March to 23rd March, 1996

## **1.0 Introduction: Development of Seismic Hazard Mitigation in Central America**

### **1.1 Preparedness Plans for Sustainable Development**

When devising a country's Disaster Preparedness Plan three issues are usually considered:

1. Prevention.
2. Mitigation.
3. Emergency Response.

History has shown that most expenditure related to disasters involves remediation during the Emergency Response, that is "Cleaning up the mess after the disaster has occurred".

This is **NOT** the most cost effective means of dealing with the hazards associated with a disaster. Remediation usually involves short term solutions to an immediate problem which often have little sustainable impact. More importantly, the cost of the remediation activities has usually been diverted from funds that were originally allocated for investment and development.

Quite simply, "Natural Disasters STOP Development" when dealing with them in this manner.

Many aid organisations have recognised that this cyclic pattern of responding to disasters with financial support has to be broken, and, that this can be achieved most efficiently by investing in the Prevention and Mitigation aspects of the Preparedness Plan.

This requires a full awareness of the disaster. That is, the mechanisms and impacts of the hazards that actually cause the disaster have to be fully understood and characterised. This allows for strategies to be developed that reduce the impact of the hazards. This usually involves forward planning and implementing solutions under the Prevention and Mitigation policies:

1. Prevention. Stop the hazard occurring.
2. Mitigation. Minimise the impact of the hazard.

Developing a Forward Plan and the implementation of (engineering / structural) solutions against hazards requires that Deterministic Methods be used.

A Probabilistic Method uses an analysis of historic seismicity to predict the initial structural parameters required to be used in the design of buildings that will resist future earthquakes. A Deterministic Method differs from the Probabilistic (Risk Assessment) Method in that it simply accepts that, "A damaging hazard WILL impact upon any Urban Development during its lifetime". That is, the hazard will occur so let's plan for it now. A large part of this methodology involves the provision of information on hazards in a form that can be applied to sustainable development.

#### **1.1.1 Forward Planning in Central America: Seismic Hazard Zonations**

Central America straddles the boundaries of the North American, Caribbean, Cocos and Nazca tectonic plates whose large relative movements (50 to 90mm/yr) are accompanied by active vulcanism and damaging seismicity. As a broad programme of natural disaster reduction six countries in Central America co-operate within a regional secretariat, "Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central", (CEPREDENAC), to co-ordinate research into seismic hazards. These countries are Guatemala, El Salvador, Honduras, Costa Rica, Nicaragua and Panama.

The CEPREDENAC initiative was inspired by the United Nations designation of the 1990's as an International Decade for Natural Disaster Reduction, (IDNDR). The existence and activities of CEPREDENAC have been supported by the Swedish International Development Agency (ASDI) and since 1991, studies of seismicity, vulcanism, landslides and floods have been conducted between different institutions in Denmark, Sweden and Norway with counter-parts within Central America.

CEPREDENAC has an initiative entitled, "Reduction of Natural Disasters in Central America: Earthquake Preparedness and Hazard Mitigation". This initiative recognises that the hazards associated with earthquakes, the "Seismic Hazards", are amongst the main causes of disasters within Central America. The initiative aims to provide (Deterministic) Methodologies that assess the susceptibility to and impact of Seismic Hazards to the participating countries within the Central American region.

Forward Planning involving Deterministic Methodologies aims to provide information on the Seismic Hazards in a form that can be utilised by physical and development planners, civil and structural engineers and architects. One way would be the provision of assessment methodologies and zonation maps demonstrating the regional susceptibility to the seismic hazards.

It is through the CEPREDENAC initiative that organisations like the Centro de Investigaciones Geotécnicas in El Salvador have obtained equipment to better monitor the seismicity of their country, and computerised cartographic equipment (Geographic Information Systems (GIS)) with which they provide national hazard zonations (eg the Landslide Atlas).

## **1.2 Project Proposal: Assessment of Secondary Seismic Hazards for Urban Planning**

### **1.2.1 ODA Funded Hazard Mitigation Projects**

The British Overseas Development Administration is currently funding (from Oct 92 to March 95) a project entitled, "Assessment of Secondary Seismic Hazards for Urban Planning". This project aims to provide a methodology that allows a planner to consider certain seismic hazards during the planning process. This methodology is concerned with the development of policies and procedures to integrate technical information on geological hazards which are triggered by earthquakes (hence the term Secondary) into national land use plans, urban and coastal zone planning, and local planning.

This project has been structured to provide methodologies and information at the three general levels of the planning process.

**1. National Level - Hazard Potential:** The first step of a hazard assessment methodology is to identify the national hazard potential. This requires a zonation showing regions of, for example, High, Medium and Low Susceptibility to hazards based on simple criteria which provides a first look map of hazards on the national scale.

**2. Regional Level - Hazard Conditions:** The second step is to identify the hazard conditions and subsequently the type of hazard, and requires more detailed assessments demonstrating how and why certain areas are susceptible to a hazard. This involves the consideration of a set of interacting factors, with decisions made in a specific order, ie, prioritised to form a systematic and consistent hazard evaluation. This provides the locality and type of hazard on the regional and metropolitan scales.

**3. Local Level - Analysis of Problems:** The final step is to incorporate the hazard assessment results into a plan. This requires an analysis of the extent of a hazard, and consequently, the problems it causes. This will be achieved by local investigations being undertaken by an engineering geologist.

Work on this project has recently been undertaken in Costa Rica and China. The collaborating institutes in each country are the Comision Nacional de Emergencia and the Comprehensive Institute for Geotechnical Investigation and Surveying in Costa Rica and China respectively. The policy of the project has been to concentrate the development of the methodology in Costa Rica and to verify its use in a different geological environment by applying it in a back analyses of the 1976 Tangshan earthquake in China.

### **1.2.2 National Secondary Seismic Hazard Maps in Costa Rica**

The methodologies developed at the National and Regional scales have been successfully applied in Costa Rica. The eventual aim is to publish these methodologies in the form of a reference manual for use by planners.

Application of the methodologies at the National scale has led to the production of a series of maps that can be utilised by Urban Planners when developing the National Land Use Plan. These are:

1. A Simplified Geological map re-classified into units which have (civil) engineering significance.
2. A Ground Motion Amplification Hazard zonation map.
3. A Landslide Hazard zonation map.
4. A Liquefaction Hazard zonation map.
5. A Ground Rupture Hazard zonation map.
6. A Tidal Wave (Tsunami) Hazard zonation map.

These maps have been produced using computerised mapping equipment which was supplied to the Comision Nacional de Emergencia by CEPREDENAC for work on their initiative for the Reduction of Natural Disasters in Central America. The success of the ODA funded project has been possible because the work on this and the CEPREDENAC projects are compatible and complimentary.

### **1.2.3 A Proposal for National Secondary Seismic Hazard Maps in El Salvador**

A work proposal for similar activities in El Salvador has been drafted by the Engineering Geology and Geophysics Group of the British Geological Survey. This was drafted in response to a visit to El Salvador at the request of two of the indigenous academic institutes, the Universidad de Centroamericana (UCA), and the Universidad Nacional (UNA).

The proposal (enclosed) provides the necessary instructions (and methodologies) for a physical scientist (either a geologist or civil engineer) to compile the same suite of maps listed in section 1.2.2 above.

In essence, because of the success of the methodologies in Costa Rica it is proposed that this work be extended throughout the region starting with El Salvador.

## **2.0 Assessment Procedure - Setting up a Survey**

This section comprises a series of procedural notes which give detailed instructions on how to undertake a national secondary seismic hazard survey within a small country. This set of instructions was written specifically for activity in El Salvador which includes the following work programme.

1. A Simplified Geological map re-classified into units which have (civil) engineering significance.
2. A Ground Motion Amplification Hazard zonation map.
3. A Liquefaction Hazard zonation map.
4. A Ground Rupture Hazard zonation map.
5. A Tidal Wave (Tsunami) Hazard zonation map.

The Landslide Hazard Susceptibility Map has previously been undertaken as part of the Landslide Atlas Project which was endorsed by CEPREDENAC.

**METHODOLOGY FOR THE ASSESSMENT OF SECONDARY SEISMIC HAZARDS FOR EL SALVADOR**

- STEP 1**
- Digitize the 1:100, 000 Geological Maps.
- STEP 2**
- Simplify the 1:100, 000 Geological Map into an Engineering Geology Map.
    - Reclassify and re-group the key of the 1:100, 000 Geological Map into 6 simpler units.
      - Quaternary Alluvium
      - Quaternary Mangroves and Seasonally Flooded Areas
      - Quaternary Volcanic Soils (Engineering Soils)
      - Tertiary Volcanic Soils (Engineering Soils)
      - Soft Rocks
      - Hard Rocks
- STEP 3**
- Hazard Assessments.
    - Build a set of Hazard Susceptibility Maps by combining the simplified geological map with other criteria which control the occurrence of certain hazards. Use the GIS to produce a set of Hazard Susceptibility Maps.
    - Some of the Hazard Susceptibility Maps are directly related to the Engineering Geology Map.
      - Landslide Hazard Susceptibility Map
      - Liquefaction Hazard Susceptibility Map
      - Ground Motion Amplification Hazard Susceptibility Map
    - Some of the Hazard Susceptibility Maps are not directly related to the Engineering Geology Map.
      - Ground Rupture Hazard Susceptibility Map
      - Tsunami Hazard Susceptibility Map

The operations which will be undertaken to produce the hazard map data for the project are shown above in underlined red type.

The maps which represent the output from the project are shown above in blue type.

## SIMPLIFIED GEOLOGICAL MAP OF EL SALVADOR

### STEP 1

- Digitize major features of El Salvador.
  - Outline of the country
  - Major Towns
  - Major Roads
  - Important lakes and rivers
  - General zones of elevation (if required)

### STEP 2

- Digitize the units from the 1:100, 000 Geological Map.
  - Eg. Digitize Q'f (Fluvial and Lacustrine deposits of c1) and group all polygons together on a single layer.

### STEP 3

- Re-classify the geological units into 6 simplified units with engineering geological significance.
  - Using the tables on pages 9/10 of the methodology, group together all rocks/sediments in the new classes. Make new layers which are derived from combinations of the geological layers in the new simplified Engineering Geology Map.
  - See also notes on the simplified geological map of Costa Rica for guidance.

### STEP 4

- Display the six new units of the Engineering Geology Map.
  - Qal Aluvion Cuaternario
  - Qa Manglares y Sectores Inundables
  - Vc Suelos Volcanicos Cuaternarios
  - Vt Suelos Volcanicos Tertiarios
  - Sr Rocas Blandas
  - Hr Rocas Duras

## LIQUEFACTION HAZARD SUSCEPTIBILITY MAP

- STEP 1**
- The liquefaction map will be very simple at this scale. At the simplest level it will be a derivative of the simplified geological map.
  - Reclassify the Engineering Geology Map.
    - Re-group the six simplified geological units into three units which represent the ground's liquefaction susceptibility.
    - Group I: Alluvial areas or sandy beaches with high water tables. This unit corresponds to Qa of the simplified geological map.
    - Group II: Quaternary Alluvial areas with deeper water tables.
    - Group III: Other rock and soil classes.
- STEP 2**
- Display the three new units of the Liquefaction Hazard Susceptibility Map.
    - Group I            High Susceptibility
    - Group II          Intermediate Susceptibility
    - Group III         Low and Very Low Susceptibility
  - See also notes on the liquefaction potential of the ground by E. Malavassi and D. Salgado.
- 
- STEP 3  
OPTIONAL**
- Quantifying Liquefaction Potential.

Once the units have been grouped into Group I, II or III above, further information on the ground water levels can be investigated.
  - Groundwater level information can be evaluated to derive a Moisture Factor,  $Sh$  (see Mora & Vahrson) for the Group I and Group II units.
  - A liquefaction potential based on the moisture factor can be included in Group I and Group II.
    - High Potential             $Sh \geq 20$
    - Medium Potential          $10 < Sh \leq 19$
    - Low Potential              $Sh \geq 10$

## GROUND MOTION AMPLIFICATION SUSCEPTIBILITY MAP

### STEP 1

- Re-classify the simplified geological map into four units which represent the ground response to seismic wave amplification.
  - Eg. Amplification will be greatest on the Qal, Aluvion Cuaternario and the Qa, Manglares y Sectores Inundables classes.
  - Use the table on page 11 of the methodology to group together the simplified geological units into the ground motion amplification groups.
  - See also notes on the amplification potential by R. Mora Chinchilla.

### STEP 2

- Display the four new units of the Ground Motion Amplification Hazard Susceptibility Map.
  - Group I Alto Amplificaciones.
  - Group II Medio Amplificaciones
  - Group III Bajo Amplificaciones
  - Group IV Muy Bajo Amplificaciones

### 3.0 Hazard Assessment Methodology

#### Modifications to the Methodology for the Assessment of Secondary Seismic Hazards in El Salvador

##### 1.0 PREVIOUS METHODOLOGY

The previous methodology is detailed in Appendix 9 of the Secondary Seismic Hazard Project Report No. 94/45, "Report on a Visit to El Salvador, 19/3/94 to 23/3/94".

The changes detailed here include:

- i. Modified simplified geological map classes.
- ii. Simplified liquefaction methodology (in Spanish).
- iii. Simplified ground motion amplification methodology (in Spanish).

##### 2.0 SIMPLIFIED GEOLOGICAL MAP CLASSES

Reclassification into new Groups A- F from the current 1:200,000 geological map of El Salvador.

###### Group A Quaternary Alluvium

Q'f Fluvial & Lacustrine Deposits of c1 Playa, Barra Costera (//// shading on 1:200,000 geology map).

###### Group B Quaternary Mangroves and Seasonally Flooded Areas

Depositos de Esturano con/sin mangroves class of Q'f Suelo Anmoor class of Q'f

###### Group C Quaternary Volcanic Soils (Engineering Soils)

s5'c	s5'b	s5'a	s4	s3'b (if weathered)	s3'a	s2 (if weathered)	c3 (if weathered)
c2 (if weathered)			c1	Ignimbritas	Escorias y Cinder		S1
Epiclastitas Volcanicas				Limo Rojo	Alteracion Hidrotermal causing weathering		

###### Group D Tertiary Volcanic Soils (Engineering Soils)

b3 (if weathered)	b2 (if weathered)	b1	ch2 (if weathered)	ch1
m2'b	m2'a (if weathered)	m1'b		m1'a
Ignimbritas	Escorias y Cinder	Epiclastitas Volcanicas		Limo Rojo
Alteracion Hidrotermal causing weathering				

###### Group E Soft Rocks (pre-Holocene clays, weak sandstones, weak mudstones, Chalk and weak limestones etc)

va (if weak) yo (if weak) Alteracion Hidrotermal causing deposition

###### Group F Hard Rocks (Extrusive, intrusive, most metamorphics and strong sedimentary rocks)

s3b (when hard)	s2 (when hard)	c3 (when hard)	c2 (when hard)	yo
s5'a (when hard)	b3 (when hard)	b2 (when hard)	I	
m2'a (when hard)	va (when hard)	ts	ts'm	
Alteracion Hidrotermal causing deposition		Rocas Efusivas Intermedias Intercaladas.		
Metamorfismo de Contacto		Silificacion		

**PROPOSAL FOR COLLABORATIVE WORK IN EL SALVADOR ON THE PROJECT:  
"ASSESSMENT OF SECONDARY SEISMIC HAZARD FOR URBAN PLANNING"**

**Appendix C - Simplified Methodology for Ground Motion Amplification (GMA)**

**C.1 The Units from the Simplified Geology Map of Costa Rica and the GMA Groups**

	<b>Group Definition</b>	<b>Example from Simplified Geology Map</b>
<b>Group I</b>	Alluvium Colluvium Non-cohesive Volcanic Deposits	(Qal) (Qal) (Vc + Vt under certain conditions)
<b>Group II</b>	Cohesive Volcanic Soils Lacustrine Deposits of Low to Medium Consolidation	((Vc + Vt) both under certain conditions) (Qal under certain conditions)
<b>Group III</b>	Pre-Tertiary Sedimentary Rocks Problems where rock is severely weathered or highly altered by processes like hydro- thermal activity.	(SR) (SR + HR)
<b>Group IV</b>	Crystalline Rock	(HR)

## MAPA GEOLOGICO SIMPLIFICADO DE COSTA RICA

M.Sc. Rolando Mora <sup>1</sup>  
M.Sc. Marlene Salazar <sup>2</sup>

El presente trabajo forma parte del PROYECTO DE ESTIMACIÓN DE AMENAZAS SÍSMICAS SECUNDARIAS, PARA EL PLANEAMIENTO URBANO EN COSTA RICA, proyecto conjunto de la Comisión Nacional de Emergencias, de la Universidad Nacional, Universidad de Costa Rica, Dirección de Geología y Minas y de la Refinadora Costarricense de Petróleo, bajo el auspicio de el Servicio "Geológico de la Gran Bretaña".

Dentro del marco de este Proyecto se propuso la simplificación del mapa geológico de Costa Rica 1:200.000, el cual servirá de base a profesionales de otros campos para la toma de decisiones respecto al planeamiento tanto rural como urbano de Costa Rica.

### Metodología

El presente mapa se realizó tomando como base el mapa geológico de Costa Rica 1:200.000, edición preliminar de 1982 y siguiendo los lineamientos del Servicio Geológico de la Gran Bretaña indicados en la propuesta de trabajo, en donde se establece que la más apropiada simplificación del mapa será basándose en la clasificación geológica ingenieril siguiente:

- Q al: Aluvión cuaternario
- Q a : Areas de manglares y pantanos, permanentemente inundados o sometidos a la acción de las mareas.
- VC : Volcánico Cuaternario
- VT : Volcánico Terciario
- SR : Lutitas, limolitas, areniscas y calizas, poco compactas.
- HR : Rocas duras: lavas, intrusivos, areniscas y calizas endurecidas.

---

1. Escuela Centroamericana de Geología, UCR

2. Dirección de Geología y Minas, MIRENEM

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE LICUEFACCION  
(LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY MAP)

Proyecto Conjunto Gran Bretaña-Costa Rica

Eduardo Malavassi (OVSICORI-UNA) y Douglas Salgado (CNE)

SUSCEPTIBILIDAD  
(SUSCEPTIBILITY)

**ALTA**  
(HIGH) Areas aluvionales o de playas arenosas con un nivel freático muy cercano a la superficie. Corresponde en general al Qa del mapa geológico 1:200.000 o sea zonas pantanosas, anegadas y manglares.

Alluvial areas or sandy beaches with a high water table. This unit corresponds in general to Qa in the 1:200.000 geologic map, that is swamps, partially flooded areas and mangrove marshes.

**INTERMEDIA**  
(Intermediate) Areas aluvionales con un nivel freático menos cercano a la superficie que en el caso de la Alta susceptibilidad. Corresponde en general al Qal del mapa geológico 1:200.000 o sea a aluviones Cuaternario.

Alluvial areas with a deeper water table than in the case of high susceptibility. This category corresponds in general to Qal in the geologic map 1:200.000, that is Quaternary alluvion.

**BAJA**  
(Low) Areas de baja o muy baja susceptibilidad de licuefacción. Se trata de rocas duras, rocas suaves, rocas volcánicas, así como los suelos desarrollados sobre estas últimas durante el Terciario y el Cuaternario.

Low and very low liquefaction susceptibility. They are hard and soft rocks, volcanic rocks, as well as soils developed on the later during the Tertiary and Quaternary.

Para aquellas áreas ubicadas a menos de 50 Km de fuentes sísmicas regionales con potencial para generar un sismo  $M_s \geq 7.0$ , la susceptibilidad es mayor que lo indicado por la tipología. Esto podría ser de gran relevancia en áreas cercanas a la fuente.

For those areas located at less than 50 Km from local seismic sources with the potential of generation of earthquakes  $M_s \geq 7.0$ , susceptibility is larger than indicated in the proposed types of susceptibility. This could be of great relevance in areas closer to the local sources.

**PROPOSAL FOR COLLABORATIVE WORK IN EL SALVADOR ON THE PROJECT:  
"ASSESSMENT OF SECONDARY SEISMIC HAZARD FOR URBAN PLANNING"**

**MAPA GEOLOGICO SIMPLIFICADO,  
VALLE CENTRAL, COSTA RICA.**

Rolando Mora Chinchilla.

Este mapa cubre la región comprendida entre las coordenadas (190-238)N y (400-560)E, según la cuadrícula Lambert Costa Rica Norte. En él se intenta recopilar la información existente en lo que respecta a la geología del Valle central y sus posibles respuestas en caso de sollicitaciones dinámicas. Se han diferenciado cuatro grandes grupos, dentro de los cuales se espera un comportamiento dinámico similar de los materiales que los componen.

A continuación se describen cada uno de los grupos:

**GRUPO I:** aluviones, coluvios y depósitos volcánicos no cohesivos. Este grupo se presenta como el de comportamiento dinámico potencialmente más deficiente. Podrían generarse fenómenos de licuefacción y amplificación de señales sísmicas, en función de las condiciones particulares de cada sitio.

**GRUPO II:** suelos volcánicos cohesivos y depósitos lacustres de consolidación baja a media. Este grupo de materiales podría ocasionalmente presentar fenómenos de amplificación de señales sísmicas, en función de la presencia de suelos cohesivos de consolidación baja. Aquí se incluyen las siguientes formaciones y unidades geológicas (Denyer y Arias, 1991):

Lahares y Cenizas,  
Formación Grifo Alto,  
Formación La Cruz,  
Depósitos Lacustres,  
Formación Barva,  
Tobitas Ocoa.

**GRUPO III:** Rocas sedimentarias. En general este grupo no presenta características dinámicas desfavorables, sin embargo, algunos efectos de amplificación se pueden esperar donde los materiales constituyentes se encuentren en un estado de meteorización muy avanzado o hayan sido afectados significativamente por alteración hidrotermal. En él se incluyen las siguientes formaciones y unidades geológicas:

Formación Pacacua,  
Formación Peña Negra,  
Formación Turrúcares,  
Formación Coris,  
Formación San Miguel,  
Brechas Verdes,

**PROPOSAL FOR COLLABORATIVE WORK IN EL SALVADOR ON THE PROJECT:  
"ASSESSMENT OF SECONDARY SEISMIC HAZARD FOR URBAN PLANNING"**

Formación Calizas de Parritilla,  
Miembro Tranquerillas,  
Formación Caraigres.

**GRUPO IV:** Rocas cristalinas. Al igual que el grupo anterior no ofrece características dinámicas desfavorables, se incluyen en él las siguientes formaciones geológicas:

Complejo de Nicoya,  
Formación Intrusivo de Escazú,  
Formación Cornubianitas de Escazú,  
Formación Lavas Intracañón,  
Formación Avalancha Ardiente,  
Formación Orotina.

En términos generales, podemos establecer el potencial relativo de amplificación de señales sísmicas para la región del Valle Central de la siguiente forma:

**GRUPO. POTENCIAL DE AMPLIFICACION.**

I	Alto.
II	Medio.
III	Bajo.
IV	Muy bajo.

**BIBLIOGRAFIA.**

Denyer, P. y Arias, O., 1991: Estratigrafía de la región central de Costa Rica. Revista Geológica de América Central, (12): 1-59.

Denyer, P. y Montero, W., 1988: Mapa Geológico Estructural y de Sismos del Valle Central. Escala 1:50 000. Instituto Geográfico Nacional, San José.

Krushensky, R., 1972: Geology of the Istarú Quadrangle, Costa Rica. Geological Survey Bulletin 1358.

### Simple Methodology to Assess the Susceptibility of Regions in Costa Rica to Ground Motion Amplification

Costa Rica experiences much seismicity which occurs within a grid of structural depressions which strike in both longitudinal and transverse directions to the volcanic arc. This is shallow focus intra-plate seismicity is due to the response of many minor faults to the regional tensional stresses oriented east-southeast and compressional stresses oriented north-northeast. These structural depressions form basins in which geologically young (geotechnically weak) sediments accumulate and which provide a topographically favourable urban site. However, the geotechnical weakness of these sediments and the structure of the basin focuses very strong ground motion within the region due to amplification of seismicity as it travels through the sediment column.

This map presents the results of a simple assessment methodology which is intended for use in urban planning to provide an awareness of the ground motion amplification hazard on a national scale. This map should be used in conjunction with a decision flow chart which will help to consider the ground motion amplification hazard in the proper perspective throughout the planning process and can provide a basis for the development of further policies to integrate geoscience information into land use planning. The methodology reveals many regions within Costa Rica coinciding with sedimentary basin structures where consultation with a geological expert is required such that a detailed analysis of the impact of ground motion amplification can be modelled.

### Definitions of Zones

The 1:200, 000 geological map of Costa Rica was recast into six simplified geological units with similar engineering geological and geotechnical properties. The geotechnical properties of these six simplified classes determines the ground response to seismic disturbances, where increased ground motion amplification will occur in the geotechnically weaker geological classes. This increase in ground motion amplification is reflected in four classes of susceptibility to the hazard: Very Low, Low, Medium and High which are grouped as follows.

Very Low:	Crystalline Rocks and Strong Sedimentary Rocks	- HR
Low:	Soft Rocks (Pre-Tertiary weak sedimentary and highly weathered rocks)	- SR
Medium:	Quaternary and Tertiary Cohesive Volcanic Soils (Engineering Soils)	- Vc, Vt
High:	Alluvium, Colluvium, Lacustrine Deposits, Mangroves and Water Logged Areas	- Qa, Qal

CARTOGRAFIA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO

Cuadrante: SANTA ROSA DE LIMA

Hoja: 2656-IV

Factor de Susceptibilidad: RELIEVE RELATIVO

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
1	80	80	120	20	40	120	120	100	120	140	100	60	60	40	20	80	40	120	140	60	60	100	60	120	120	40	60							
2	80	60	120	160	140	120	200	220	160	200	100	60	60	60	20	60	60	100	120	80	140	60	60	80	120	120	80							
3	120	160	140	140	140	120	160	300	320	200	60	60	40	60	40	40	40	60	100	140	80	20	20	40	120	100	80							
4	40	100	140	180	60	100	80	100	100	100	60	80	20	60	40	40	40	40	40	40	60	80	60	160	100	100	20							
5	100	60	100	80	80	80	80	80	100	100	80	60	100	20	0	20	40	40	20	0	20	200	180	140	120	100	20							
6	140	60	40	60	80	0	60	60	160	180	80	60	120	60	40	60	80	80	0	20	100	180	160	260	200	240	40							
7	260	160	180	160	80	160	100	140	140	120	100	160	140	40	20	60	100	60	40	80	140	140	260	220	180	260	80							
8	120	180	160	220	220	180	200	180	260	160	240	200	160	80	80	160	80	80	20	80	120	40	160	240	160	160	100							
9	200	160	140	160	220	120	220	240	180	180	280	200	160	260	240	200	140	60	20	40	60	40	120	160	20	0								
10	120	80	140	120	160	160	300	300	180	180	320	280	220	220	180	180	140	0	20	20	20	0	0	0	0									
11	140	80	140	140	120	80	240	240	120	140	260	340	280	200	100	140	120	20	20	20	0	0	60	40	0									
12	140	200	120	100	360	140	20	60	40	80	60	180	160	160	120	140	100	0	0	0	0	0	0	0	0	20								
13	220	160	140	20	200	140	60	60	40	60	80	100	120	100	120	120	60	0	0	0	0	0	0	0	0									
14	200	180	80	60	120	60	40	140	180	100	160	260	220	180	100	60	0	0	0	40	0	0	40	20										
15	200	220	100	160	120	200	100	180	220	120	140	240	220	180	80	60	80	60	0	40	80	100	120	20										
16	140	160	120	180	100	140	100	160	200	140	140	180	80	140	40	100	60	120	60	40	100	80	40	0										
17	100	120	80	40	60	80	100	120	160	140	140	140	20	40	20	20	180	180	80	60	80	140	100	60	0			60	0					
18	120	140	180	80	20	20	20	60	40	60	80	100	80	60	0	20	20	20	80	60	60	60	60	40	60	80	100	60	0	0	0	0	0	0
T	20	40	80	80	40	40	0	60	60	60	80	60	20	40	20	60	20	60	120	60	80	80	60	140	100	180	100	60	100	80	0	0	0	0

Parámetro de Susceptibilidad: RELIEVE RELATIVO

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0							
2	1	0	1	1	1	1	2	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1							
3	1	1	1	1	1	1	1	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1							
4	0	1	1	2	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0							
5	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	1	1	0							
6	1	0	0	0	1	0	0	0	1	2	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	2	1	2	2	2	0							
7	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	2	2	2	2	1							
8	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	2	1	1	1							
9	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0								
10	1	1	1	1	1	1	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
11	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	3	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
12	1	2	1	1	3	1	0	0	0	1	0	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
13	2	1	1	0	2	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
14	2	2	1	0	1	0	0	1	2	1	1	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
15	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0										
16	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0										
17	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	2	2	1	0	1	1	1	0	0			0	0					
18	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
T	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	2	1	0	1	1	0	0	0	0

CARTOGRAFIA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO

Cuadrante: SANTA ROSA DE LIMA

Hoja: 2656-IV

Factor de Susceptibilidad: LITOLOGIA

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	CH1	M2A	CH1	CH1	CH1	CH1	CH1	CH1	QF	CH1																						
2	CH1	CH1	CH1	M2A	CH1	CH1	CH1	M2A	CH1																							
3	CH1	CH1	CH1	M2A	CH1	M2A	QF	CH1	CH1	QF	C2	CH1	CH1																			
4	CH1	M2A	C3	C3	QF	QF	CH1	CH1	CH1																							
5	CH1	M2A	QF	QF	QF	M2A	M2A	C3	C3	CH1	CH1	CH1																				
6	M2A	M2A	CH1	M2A	QF	M2A																										
7	B2	M2A	QF	M2A																												
8	B2	M2A	M2A	B2	B2	B2	B2	QF	QF	M2A																						
9	B2	B2	B2	B2	B3	B2	B2	B2	B2	B2	B3	B2	B2	B2	B2	QF	C1	M2A	QF													
10	B2	B3	B3	B3	B3	B2	B2	B2	B2	QF	C3	M2A																				
11	C2	M2A	B2	B2	B2	M2A	B2	M2A	B2	B2	B2	B3	B3	B2	B2	B2	B2	C1	QF	QF	QF	QF	M2A	M2A	M2A	QF						
12	C3	C3	B2	M2A	B2	M2A	M2A	M2A	M2A	M2A	M2A	B2	B2	B2	B2	B2	C1	C1	QF	M2A	QF											
13	C3	C3	M2A	M2A	B2	M2A	B2	B2	B2	C1	QF																					
14	C3	C3	M2A	M2A	M2A	M2A	M2A	M2A	C3	C3	C3	C3	C3	C3	QF																	
15	C3	C3	C3	C3	C3	M2A	C3	QF	C3	QF	QF																					
16	C3	QF	C2	C2	C2	QF	QF	QF	C3	C2	QF	QF	QF																			
17	C3	QF	QF	QF	C2	QF	QF	QF	C3	C3	QF	C1	QF																			
18	C1	C1	C3	QF	QF	QF	QF	QF	QF	C3	C3	QF	QF	QF	QF	C3	C3	QF	QF	QF												
19	C1	C1	C1	C3	C3	C3	QF	C3	C3	C3	C3	C1	C1	C1	QF	QF	QF	QF	C3	C2	C2	C3	C3	C3	C3	C3	C3	QF	QF	QF	QF	

Parámetro de Susceptibilidad: LITOLOGIA

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	5	3				
2	3	3	3	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3				
3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	3	3	5	2	3	3				
4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	3	3	3				
5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	2	2	2	2	2	3	3	3				
6	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2				
7	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2				
8	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2				
9	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	5	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5				
10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2					
11	2	2	3	3	3	2	3	2	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	5	5	5	5	2	2	2	5						
12	2	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	2	5					
13	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5						
14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5						
15	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	2	5	5					
16	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	2	2	2	5	5	2	2	5	5	5							
17	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	2	5	5	2	2	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5
18	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	5	5	5	2	2	5	5	5	5	2	2	5	5	5	5
19	3	3	3	2	2	2	5	2	2	2	2	3	3	3	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	5	5





CARTOGRAFIA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO

Cuadrante: SANTA ROSA DE LIMA

Hoja: 2656-IV

POTENCIAL DE AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	90	90	90	0	0	54	54	54	54	36	36	0	0	0	0	36	0	36	36	0	0	54	0	54	54	0	0				
2	90	0	90	60	60	54	108	72	36	72	36	0	0	0	0	0	0	36	36	36	54	0	0	54	54	54	54				
3	90	90	90	40	60	60	60	180	162	108	0	0	0	0	0	0	0	0	36	36	90	0	0	0	36	54	54				
4	0	90	90	120	0	60	60	60	60	60	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	90	54	54	0				
5	90	0	90	90	60	60	60	60	60	60	40	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	72	72	36	54	54	0				
6	60	0	0	0	60	0	0	0	60	80	100	0	40	0	0	0	36	36	0	0	36	72	36	72	72	72	0				
7	180	60	120	60	60	40	40	40	40	40	40	40	40	0	0	0	40	0	0	36	36	36	72	72	72	72	36				
8	90	180	90	180	180	180	120	120	80	40	120	120	60	60	100	100	40	40	0	40	40	0	36	72	36	36	36				
9	180	90	90	90	120	90	180	120	120	120	80	120	60	120	120	120	100	0	0	0	0	0	40	36	0	0					
10	90	90	90	90	90	90	270	270	120	80	120	80	80	120	120	120	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
11	60	60	90	90	90	60	180	120	90	60	120	120	80	120	60	60	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
12	60	120	90	60	270	60	0	0	0	40	0	120	60	60	60	60	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
13	120	60	60	0	180	60	0	0	0	0	40	40	40	60	60	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
14	120	120	60	0	60	0	0	60	120	40	40	80	80	80	80	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
15	120	120	60	60	60	120	60	120	120	40	40	80	80	80	100	0	100	0	0	0	0	100	40	100	0						
16	60	60	60	120	60	60	60	60	80	40	40	80	40	100	0	40	0	100	0	0	40	100	0	0	0						
17	60	60	60	0	0	60	60	40	40	40	40	40	0	0	0	0	80	200	100	0	40	100	60	0	0	0	0	0	0	0	0
18	90	90	120	60	0	0	0	0	0	0	40	40	40	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	40	40	0	0	0
T	0	0	90	40	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	40	0	40	40	0	40	40	80	100	0	100	100	0

CLASE DE AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	III	III	III	I	I	III	III	III	III	III	III	I	I	I	I	III	I	III	III	I	I	III	I	III	III	I	I					
2	III	I	III	I	I	I	I	I	III	III	III	III	I	I	III	III	III	III	III													
3	III	IV	III	III	I	I	I	I	I	I	I	I	III	III	III	I	I	I	III	III	III											
4	I	III	III	III	I	III	III	III	III	III	I	III	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	III	III	III					
5	III	I	III	I	III	I	I	I	I	I	I	I	I	III	III	III	III	III	III													
6	III	I	I	I	III	I	I	I	III	III	III	I	III	I	I	I	III	III	I	I	III											
7	IV	III	I	I	I	III	I	I	III																							
8	III	IV	III	IV	IV	IV	III	I	III	III	I	III	III	III	III	III																
9	IV	III	III	III	III	III	IV	III	I	I	I	I	I	III	III	I	I															
10	III	III	III	III	III	III	IV	IV	III	I	I	I	I	I	I	I	I															
11	III	III	III	III	III	III	IV	III	I	I	I	I	I	I	I	I																
12	III	III	III	III	IV	III	I	I	I	III	I	III	I	I	I	I	I	I	I	I												
13	III	III	III	I	IV	III	I	I	I	III	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I												
14	III	III	III	I	III	I	I	III	I	III	I	I	I	I	I	I	I	I														
15	III	I	III	I	I	I	III	III	III	I																						
16	III	I	III	I	III	I	I	III	III	I	I																					
17	III	III	III	I	I	III	I	I	I	I	III	IV	III	I	III	III	III	I	I													
18	III	III	III	III	I	I	I	I	I	III	III	III	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	III	I	I	I	
T	I	I	III	III	I	I	I	I	I	III	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	III	I	III	III	III	III	III	I	III	III	I

## Porcentajes del Grado de Amenaza de Deslizamientos de Tierra

Zona	Nombre	kms <sup>2</sup> de amenaza				Total Kms <sup>2</sup>	Porcentaje Relativo de amenaza			
		I	II	III	IV		I (%)	II (%)	III (%)	IV (%)
Occidental	Sn Fco. Menéndez	20	0	73	7	100	20.00	0.00	73.00	7.00
	D. Río Paz	148	0	26	0	174	85.06	0.00	14.94	0.00
	Paso el Jobo	39	0	64	0	103	37.86	0.00	62.14	0.00
	Ahuachapan	123	3	205	164	495	24.85	0.61	41.41	33.13
	Jujutla	167	0	214	103	484	34.50	0.00	44.21	21.28
	Acajutla	208	0	0	0	208	100.00	0.00	0.00	0.00
	El Shiste	29	11	48	0	88	32.95	12.50	54.55	0.00
	Sn Antonio Pajonal	53	1	99	0	153	34.64	0.65	64.71	0.00
	Cand. De la Frontera	117	16	283	45	461	25.38	3.47	61.39	9.76
	Sta. Ana	178	28	232	61	499	35.67	5.61	46.49	12.22
	Sonsonate	178	40	164	104	486	36.63	8.23	33.74	21.40
	Cuisnauat	126	0	212	129	467	26.98	0.00	45.40	27.62
	Metapan	16	2	165	118	301	5.32	0.66	54.82	39.20
	Masahuat	71	63	313	38	485	14.64	12.99	64.54	7.84
	Nva. Concepción	141	24	295	26	486	29.01	4.94	60.70	5.35
	Opico	167	4	315	27	513	32.55	0.78	61.40	5.26
	Nva. San Salvador	211	30	151	94	486	43.42	6.17	31.07	19.34
	La Libertad	31	0	357	167	555	5.59	0.00	64.32	30.09
	<b>Subtotal Occidente</b>	<b>2,023</b>	<b>222</b>	<b>3,216</b>	<b>1,083</b>	<b>6,544</b>	<b>30.91</b>	<b>3.39</b>	<b>49.14</b>	<b>16.55</b>
Central	San Ignacio	3	10	78	14	105	2.86	9.52	74.29	13.33
	Tejutla	17	1	408	47	473	3.59	0.21	86.26	9.94
	El Paraiso	294	3	152	0	449	65.48	0.67	33.85	0.00
	Suchitoto	235	0	272	1	508	46.26	0.00	53.54	0.20
	San Salvador	183	5	239	35	462	39.61	1.08	51.73	7.58
	Olocuilta	44	0	282	167	493	8.92	0.00	57.20	33.87
	Río Jiboa	299	0	7	0	306	97.71	0.00	2.29	0.00
	Río Sumpul	0	0	68	18	86	0.00	0.00	79.07	20.93
	Chaltenango	38	2	302	94	436	8.72	0.46	69.27	21.56
	Ilobasco	65	0	402	38	505	12.87	0.00	79.60	7.52
	Cojutepeque	105	0	370	11	486	21.60	0.00	76.13	2.26
	San Vicente	166	0	273	74	513	32.36	0.00	53.22	14.42
	Herradura	486	0	0	0	486	100.00	0.00	0.00	0.00
	D. Río Jiboa	176	0	0	0	176	100.00	0.00	0.00	0.00
	Arcatao	2	0	67	20	89	2.25	0.00	75.28	22.47
	Sensuntepeque	32	0	383	85	500	6.40	0.00	76.60	17.00
	Titihuapa	161	1	290	31	483	33.33	0.21	60.04	6.42
	Pte. Cuscatlán	135	8	351	19	513	26.32	1.56	68.42	3.70
	Berlín	335	0	144	7	486	68.93	0.00	29.63	1.44
	Jiquilisco	381	0	0	0	381	100.00	0.00	0.00	0.00
<b>Subtotal Centro</b>	<b>3,157</b>	<b>30</b>	<b>4,088</b>	<b>661</b>	<b>7,936</b>	<b>39.78</b>	<b>0.38</b>	<b>51.51</b>	<b>8.33</b>	

## Porcentajes del Grado de Amenaza de Deslizamientos de Tierra

Zona	Nombre	kms <sup>2</sup> de amenaza				Total Kms <sup>2</sup>	Porcentaje Relativo de amenaza			
		I	II	III	IV		I (%)	II (%)	III (%)	IV (%)
Oriental	Carolina	3	1	181	8	193	1.55	0.52	93.78	4.15
	Sesori	78	0	388	17	483	16.15	0.00	80.33	3.52
	Valle La Esperanza	224	0	263	26	513	43.66	0.00	51.27	5.07
	Usulután	187	21	219	59	486	38.48	4.32	45.06	12.14
	Jucuarán	368	0	111	8	487	75.56	0.00	22.79	1.64
	Sabanetas	5	0	82	39	126	3.97	0.00	65.08	30.95
	Jocoatique	4	4	400	51	459	0.87	0.87	87.15	11.11
	San Fco. Gotera	27	0	387	72	486	5.56	0.00	79.63	14.81
	Jocoro	268	0	226	19	513	52.24	0.00	44.05	3.70
	San Miguel	337	9	140	0	486	69.34	1.85	28.81	0.00
	Olomega	140	0	300	60	500	28.00	0.00	60.00	12.00
	Monteca	7	0	212	51	270	2.59	0.00	78.52	18.89
	Nueva Esparta	64	0	297	125	486	13.17	0.00	61.11	25.72
	Santa Rosa de Lima	199	0	289	14	502	39.64	0.00	57.57	2.79
	La Unión	307	0	180	1	488	62.91	0.00	36.89	0.20
	Conchagua	151	2	238	28	419	36.04	0.48	56.80	6.68
	Concepción de Oriente	38	0	15	0	53	71.70	0.00	28.30	0.00
	<b>Subtotal Oriente</b>	<b>2,407</b>	<b>37</b>	<b>3,928</b>	<b>578</b>	<b>6,950</b>	<b>34.63</b>	<b>0.53</b>	<b>56.52</b>	<b>8.32</b>

<b>Total en todo el País</b>	<b>7,587</b>	<b>289</b>	<b>11,232</b>	<b>2,322</b>	<b>21,430</b>	<b>35.40</b>	<b>1.35</b>	<b>52.41</b>	<b>10.84</b>
------------------------------	--------------	------------	---------------	--------------	---------------	--------------	-------------	--------------	--------------