



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN LA
PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO DE GUATEMALA**

Alejandra Margarita Chupina de León

Asesorado por el Msc. Julio Roberto Luna Aroche

Guatemala, marzo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN LA
PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ALEJANDRA MARGARITA CHUPINA DE LEÓN
ASESORADO POR EL MSC. JULIO ROBERTO LUNA AROCHE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Amílcar Boiton Velásquez
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Wuilliam Ricardo Yon Chavarría
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a la consideración mi trabajo de graduación titulado:

SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN LA PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha abril de 2012.



Alejandra Margarita Chupina de León



CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE ENERGÍA Y MINAS
- CESEM -
Tel.: 24 18 91 39

Guatemala, 3 de Junio de 2014.

Ingeniero
Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del área de Materiales
y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería/USAC

Ingeniero Melini:

Por este medio me dirijo a usted para saludarlo, deseándole éxitos en sus actividades.

El motivo de la presente es para hacer de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación de la estudiante **Alejandra Margarita Chupina de León**, con número de carne 96-16783, titulado **SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN LA PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO DE GUATEMALA**; después de terminada la revisión se da por aprobada dicha tesis.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Cordialmente

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Julio Roberto Luna Aroche
DIRECTOR
CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
ENERGÍA Y MINAS -CESEM-



cc. Archivo

/zv



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>



Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala,
1 de septiembre de 2014

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN LA PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO DE GUATEMALA**, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Alejandra Margarita Chupina de León, quien contó con la asesoría del Ing. Julio Roberto Luna Aroche.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Julio Roberto Luna Aroche y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación de la estudiante Alejandra Margarita Chupina de León, titulado SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN LA PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO DE GUATEMALA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, marzo 2015

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN LA PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO DE GUATEMALA**, presentado por la estudiante universitaria: **Alejandra Margarita Chupina de León**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 26 de marzo de 2015

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

**Nicole y Francisca
Gutiérrez Chupina**

Por ser mi impulso diario y mi motivación para
empezar y terminar nuevos proyectos.

AGRADECIMIENTOS A:

Ing. Julio Luna

Por ser nuevamente mi asesor, por todo su apoyo y presencia durante mi formación profesional.

Osman Rodríguez

Por la colaboración en la elaboración de todos los mapas presentados en este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO	1
1.1. Localización geográfica	1
1.2. Caracterización geomorfológica	3
1.2.1. Geomorfología y procesos.....	3
1.2.2. Dinámica costera	5
1.2.3. Textura de los sedimentos.....	5
1.2.4. Composición de los sedimentos	8
1.3. Geología regional y tectónica	10
1.3.1. Geología del subsuelo	14
1.3.2. Estratigrafía	15
1.4. Hidrología	17
1.4.1. Vertiente del océano Pacífico	19
1.4.2. Aguas subterráneas.....	20
1.5. Topografía	27
1.6. Clima	27
1.7. Clasificación de los suelos	30
1.7.1. Suelos del departamento de San Marcos	30

1.7.2.	Suelos del departamento de Quetzaltenango	32
1.7.3.	Suelos del departamento de Suchitepéquez	33
1.7.4.	Suelos del departamento de Retalhuleu.....	35
1.7.5.	Suelos del departamento de Escuintla	37
1.7.6.	Suelos del departamento de Santa Rosa	39
1.7.7.	Suelos del departamento de Jutiapa	42
2.	CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS EN LA ZONA DE LA PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO DE GUATEMALA	51
2.1.	División política	51
2.2.	Aspectos demográficos.....	51
2.3.	Aspectos económicos	55
2.4.	Sector agropecuario.....	55
2.5.	Producción pecuaria	56
2.6.	Desastres naturales	57
2.7.	Vivienda	59
3.	LICUEFACCIÓN	63
3.1.	Definición del fenómeno de licuefacción	64
3.2.	Descripción del fenómeno de licuefacción	64
3.3.	Historia de la licuefacción	73
3.3.1.	Registro histórico de Guatemala	77
3.3.2.	Registro histórico de América.....	83
3.3.3.	Otros países del mundo	87
3.4.	Determinación del potencial de licuefacción	90
3.5.	Evaluación de riesgo a la licuefacción	94
4.	SISMOS	97
4.3.	Magnitud e intensidad de los sismos	97

4.4.	Energía de un sismo.....	102
4.5.	Sismicidad y amenaza sísmica	106
4.5.1.	Zonas corticales o superficiales (0 a 25 km).....	107
4.5.2.	Zonas sísmicas de la región interplaca (subducción)	111
4.5.3.	Zonas sísmicas de la región intraplaca (subducción)	111
4.6.	Factores de riesgo.....	111
4.7.	Localización de un sismo	112
4.8.	Evento del 7 de noviembre de 2012	116
5.	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO	119
5.1.	Metodología.....	120
	CONCLUSIONES	125
	RECOMENDACIONES.....	127
	BIBLIOGRAFÍA.....	129
	APÉNDICES	133
	ANEXOS.....	143

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Zonas fisiográficas de la República de Guatemala	2
2.	Planicie costera del Pacífico de Guatemala	4
3.	Tamaño de los sedimentos de la planicie costera del Pacífico de Guatemala.....	6
4.	Tipo de constituyentes de la planicie costera del Pacífico de Guatemala.....	9
5.	Tectónica general de la región centroamericana	12
6.	Mapa geológico de la planicie costera del Pacífico de Guatemala	13
7.	Columna estratigráfica simplificada de la planicie costera del Pacífico de Guatemala, frente a San José.....	15
8.	Cuencas hidrográficas de la planicie costera del Pacífico de Guatemala.....	18
9.	Regiones hidrogeológicas de la República de Guatemala	23
10.	Mapa topográfico de la planicie costera del Pacífico de Guatemala	28
11.	Mapa climatológico de la planicie costera del Pacífico de Guatemala .	29
12.	Distribución de las unidades de suelo, departamento de San Marcos .	43
13.	Distribución de las unidades de suelo, departamento de Quetzaltenango.....	44
14.	Distribución de las unidades de suelo, departamento de Suchitepéquez.....	45
15.	Distribución de las unidades de suelo, departamento de Retalhuleu ...	46
16.	Distribución de las unidades de suelo, departamento de Escuintla	47
17.	Distribución de las unidades de suelo, departamento de Santa Rosa .	48

18.	Distribución de las unidades de suelo, departamento de Jutiapa	49
19.	División política dentro de la franja de la planicie costera del Pacífico de Guatemala.....	52
20.	Sismicidad registrada en la planicie costera de enero a diciembre 2012	58
21.	Centros poblados a lo largo de la planicie costera del Pacífico de Guatemala.....	61
22.	Representación de partículas en un depósito de suelo.	66
23.	Representación de partículas en un depósito de suelo sometidas a un aumento en la presión del agua.	67
24.	Mecanismo de la licuefacción	68
25.	Deslizamiento en la presa Pacoima de San Fernando, terremoto de 1971.....	69
26.	Desprendimiento de tierra y licuación, Turnagain Heights, terremoto de Alaska, 1964.....	71
27.	Volcanes de arena como evidencia de la ocurrencia de licuefacción ...	72
28.	Generación de volcanes de arena producto de la licuefacción	73
29.	Evidencia de licuefacción en la comunidad Mojanales, Puerto Barrios, Guatemala a raíz del sismo del 28 de mayo de 2009. .	82
30.	Efectos de licuefacción de suelos en Chimbote, Perú, sismo del 31 de mayo de 1970	86
31.	Asentamientos y fisuramientos, terremoto de Chimbote, Perú, 1970 ...	87
32.	Apartamentos de Kawagishi-cho, fallas en la capacidad de soporte, terremoto de Nigata de 1964	88
33.	Destrucción ocasionada por el terremoto de Kobe, Japón, 1995	89
34.	Mapa de zonificación de la amenaza sísmica en la planicie costera del Pacífico de Guatemala	109
35.	Mapa base de microzonificación sísmica de la República de Guatemala	110

36.	Esquema de un registro sísmico	113
37.	Curva de velocidades generada de la información obtenida del esquema del registro sísmico	114
38.	Posición del epicentro de un terremoto, localizado a través del sistema de circunferencias	115
39.	Ubicación del sismo M_C 7,2, latitud 14,05800°N, longitud 92,31200°W y profundidad 33,2 km.....	117
40.	Sismicidad a partir del evento del 7 de noviembre de 2012 y energía sísmica liberada por las réplicas	118

TABLAS

I.	Composición de las arenas en porcentaje	10
II.	Columna cronoestratigráfica de Guatemala	16
III.	Descripción de las regiones hidrogeológicas de Guatemala.....	22
IV.	Descripción de las unidades hidrogeológicas identificadas para Guatemala, con base en el mapa geológico 1:500 000.	24
V.	Resumen de la evaluación de aguas subterráneas de Guatemala para la planicie costera del Pacífico.....	26
VI.	Centros poblados de mayor importancia dentro de la zona en estudio.....	53
VII.	Grandes eventos sísmicos a nivel mundial	74
VIII.	Efectos de sismos de diversas magnitudes.	101
IX.	Escala de Mercalli modificada (MM).....	103
X.	Magnitudes de la escala y la equivalente en energía liberada.....	104
XI.	Entidades gubernamentales y no gubernamentales con información pública.....	121
XII.	Tabla para la determinación de la susceptibilidad a la licuefacción de una zona dada	123

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm/año	Centímetros por año
gpm	Galones por minuto
Ha	Hectáreas
Hz	Hertz
Km	Kilómetro
Km²	Kilómetros cuadrados
M_w	Magnitud de momento
M_b	Magnitud ondas de cuerpo
M_s	Magnitud ondas superficiales
M_L	Magnitud original
m³	Metros cúbicos
m³/año	Metros cúbicos por año
m/Km	Metros por kilómetro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
milímetros	Milímetros
milímetros/año	Milímetros por año
pH	Potencial de hidrógeno
p.m.	Pasado meridiano
%	Porcentaje
PIB	Producto interno bruto
ton/año	Toneladas por año

GLOSARIO

Abanicos aluviales	Formación de terreno que presenta una moderada inclinación en forma de abanico que se origina mediante el paso de miles y millones de años mediante el depósito de materiales sedimentarios que son el producto de la erosión originada en las zonas de la base de cordilleras montañosas.
Cuencas hidrográficas	Territorio drenado por un único sistema de drenaje natural es decir, que drena las aguas al mar a través de un único río, o que las vierte a un único lago y se refiere tanto a aguas superficiales como subterráneas.
Deltas	Es una forma de relieve que se forma en la desembocadura de un río, donde el río desemboca en el océano, estuario, lago o embalse. Se forman a partir de la deposición de sedimentos transportados por un río.
Minerales máficos	Aquellos ricos en magnesio y hierro ferroso, y la presencia le confiere a la roca máfica el color oscuro característico.

Potencial de hidrógeno	Es un indicador del balance existente entre los iones H^+ y OH^- de una solución.
Sistema de clasificación de Thornthwaite	Alternativa más popular con respecto a los sistemas de clasificación climática más difundidos y que está basado en los conceptos de evapotranspiración potencial y balance de vapor de agua en una región determinada.
Tierras agrícolas de primera categoría	Tierras apropiadas para cultivos intensivos y otros usos y que carecen de limitaciones para ser explotadas.
Trasplaya	Parte alta de una playa, normalmente seca y que solo se cubre de agua durante las tormentas o mareas excepcionalmente altas.
Tubificación	La tubificación es un problema de erosión retrograda que empieza erosionando los primeros granitos de suelo que no están confinados. Cuando el agua se lleva esos granos, le es más fácil llevarse los siguientes y de esa manera se va generando un tubo en el suelo desde la superficie hacia el interior.

RESUMEN

La información limitada respecto a la zonificación de áreas susceptibles a la licuefacción en Guatemala, representa actualmente un vacío referencial para la aplicabilidad de los métodos existentes para la determinación del grado o potencial de licuefacción de una zona específica, incrementando los costos en estudios previos y aumentando el riesgo de daños estructurales y personales en caso de evento natural en una zona susceptible.

Este trabajo tiene como objetivo investigar y unificar todas las características geológicas, geográficas, hidrológicas, topográficas y sísmicas de la planicie costera del Pacífico de Guatemala, para formalizar un procedimiento razonable y establecer la susceptibilidad de la zona a sufrir licuefacción. De esta manera dar recomendaciones acerca de cómo y por qué incluir el estudio de la susceptibilidad, y posteriormente el cálculo del potencial de licuefacción que debe de ser tomado en cuenta en el proceso constructivo, desde la fase de diseño, de cualquier proyecto urbano.

La mayoría de la información disponible se obtuvo del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), Instituto Nacional de Estadística (INE), Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas de la Universidad de San Carlos de Guatemala (CESEM), Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGA). La información no disponible fue generada a partir de las bases de datos e información recopilada.

No es del alcance de este trabajo establecer o presentar la metodología de campo completa para evaluar la susceptibilidad de un suelo a presentar licuefacción pero si, basados en toda la información recopilada y en los criterios básicos de la determinación de susceptibilidad, establecer si la zona en estudio, la planicie costera del Pacífico de Guatemala es un área susceptible o no a presentar el fenómeno de licuefacción.

Luego del análisis de la información tanto teórica como técnica, se concluye que la planicie costera del Pacífico de Guatemala es una zona con una tendencia alta a presentar el fenómeno de licuefacción, por lo que la recomendación principal es tomarlo en cuenta dentro de los cálculos ingenieriles de cualquier proyecto constructivo.

OBJETIVOS

General

Evaluar la susceptibilidad a la licuefacción de la planicie costera del Pacífico de Guatemala, tomando en cuenta las características geográficas, geológicas, hidrológicas, sísmicas y topográficas.

Específicos

1. Describir las propiedades geológico-geotécnicas del suelo en la planicie costera del Pacífico de Guatemala.
2. Describir las características geográficas, geológicas, hidrológicas, topográficas y sísmicas del área de estudio.
3. Identificar áreas en donde no exista información específica de las características en estudio.
4. Dirigir la investigación hacia los centros poblados más importantes con categoría de municipio y ciudad que se encuentren dentro del área en estudio.
5. Elaborar una metodología básica para la evaluación local de la susceptibilidad a la licuefacción.

INTRODUCCIÓN

Los casos históricos de licuefacción comenzaron a hacerse cada vez más notables a partir del terremoto de Nigata, Japón en 1964. Desde entonces innumerables metodologías han sido desarrolladas para tratar de definir el riesgo de licuefacción de un depósito de arenas saturadas. Una vez que se determina que existe riesgo de licuefacción en un depósito arenoso, hay dos aspectos fundamentales que deben tratar de controlarse: la pérdida de resistencia al corte y las grandes deformaciones debido a fallas de flujo.

La elección del área, la planicie costera del Pacífico de Guatemala, se debe principalmente a la formación del suelo y la procedencia, tomando en cuenta la tectónica del país, la geología de la zona y la cercanía al mar. Tiene unos cincuenta kilómetros de ancho y ha sido formada por los productos de erosión de las tierras altas volcánicas. Arenas, gravas, pómez y depósitos de variado espesor se han depositado gradualmente hacia las tierras de la llanura aluvial. Debido al tremendo volumen de detritus en abanicos fluviales y por un significativo grado de subsidencia, el drenaje de las áreas costeras es deficiente.

El drenaje es de tipo meándrico y la presencia de terrenos pantanosos es frecuente cerca de la costa debido a la topografía plana. A lo largo de la playa se han concentrado arenas negras de origen volcánico. También, las llanuras aluviales cuaternarias de la costa sur, son consideradas las formaciones con mayor potencial de aguas subterráneas. Todo lo anterior, resulta en una combinación perfecta para que ocurra el fenómeno de licuefacción.

En Guatemala se cuenta con información muy limitada respecto a este tema y dadas las condiciones geográficas y tectónicas del país, tiende a ser un tópico que cobra importancia por la aplicabilidad en el cuidado de las estructuras y la construcción en general.

De esto, deriva la importancia de estudiar este tema y desarrollar herramientas que permitan a los ingenieros predecir los riesgos de construir sobre un terreno potencialmente licuable, iniciando por la evaluación de la susceptibilidad de las diferentes zonas fisiográficas en que está dividida la República de Guatemala.

Todo lo anterior debido principalmente a que la licuefacción de los suelos de fundación granulares saturados, ha representado una importante causa de falla de los puentes y otras obras de ingeniería. Afecta en gran medida las zonas pobladas con edificaciones formales, por lo que también se tomaron los centros poblados con categoría de municipio y ciudad como base para la entrega de conclusiones y elaboración de descripciones geológicas y del fenómeno como tal. La información generada podrá ser compartida con las municipalidades y las oficinas técnicas para tenerla en cuenta en la toma de decisión de aprobación de proyectos de desarrollo urbano.

Muchos países que poseen regiones sísmicas tienen mapas de licuefacción para que así, al momento de proyectar una estructura se esté consciente del posible riesgo. En el caso de Guatemala, este tipo de información es limitada o no existe, considerando la ubicación geográfica del país y alta sismicidad, evaluar la susceptibilidad a la licuefacción resulta un aporte interesante y de gran valor agregado para distintas actividades en general, principalmente para la construcción.

Los capítulos 1 y 2 presentan la localización y las características: geológicas, topográficas, hidrológicas, sísmicas, geográficas y socioeconómicas; correspondientes a la zona de estudio. El capítulo 3 detalla el fenómeno de licuefacción y presenta un historial de eventos documentados, tanto en Guatemala como alrededor del mundo. El capítulo 4 explica los sismos, las principales características y efectos sobre las zonas donde ocurren y presenta un detalle del historial sísmico del país y el caso específico del evento ocurrido el 7 de noviembre de 2012. El capítulo 5 es el análisis de toda la información recopilada en los capítulos anteriores y la presentación de la metodología para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción en la zona de estudio y un ejemplo específico para el departamento de Escuintla es incluido en el apéndice 1 y los anexos contienen información complementaria para todo el trabajo de investigación.

1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO

En el territorio de Guatemala se distinguen cuatro zonas fisiográficas, que son, de sur a norte las siguientes: (ver figura 1).

- Planicie costera del Pacífico
- Provincia volcánica o cinturón volcánico
- Cordillera central de Guatemala
- Tierras bajas de El Petén

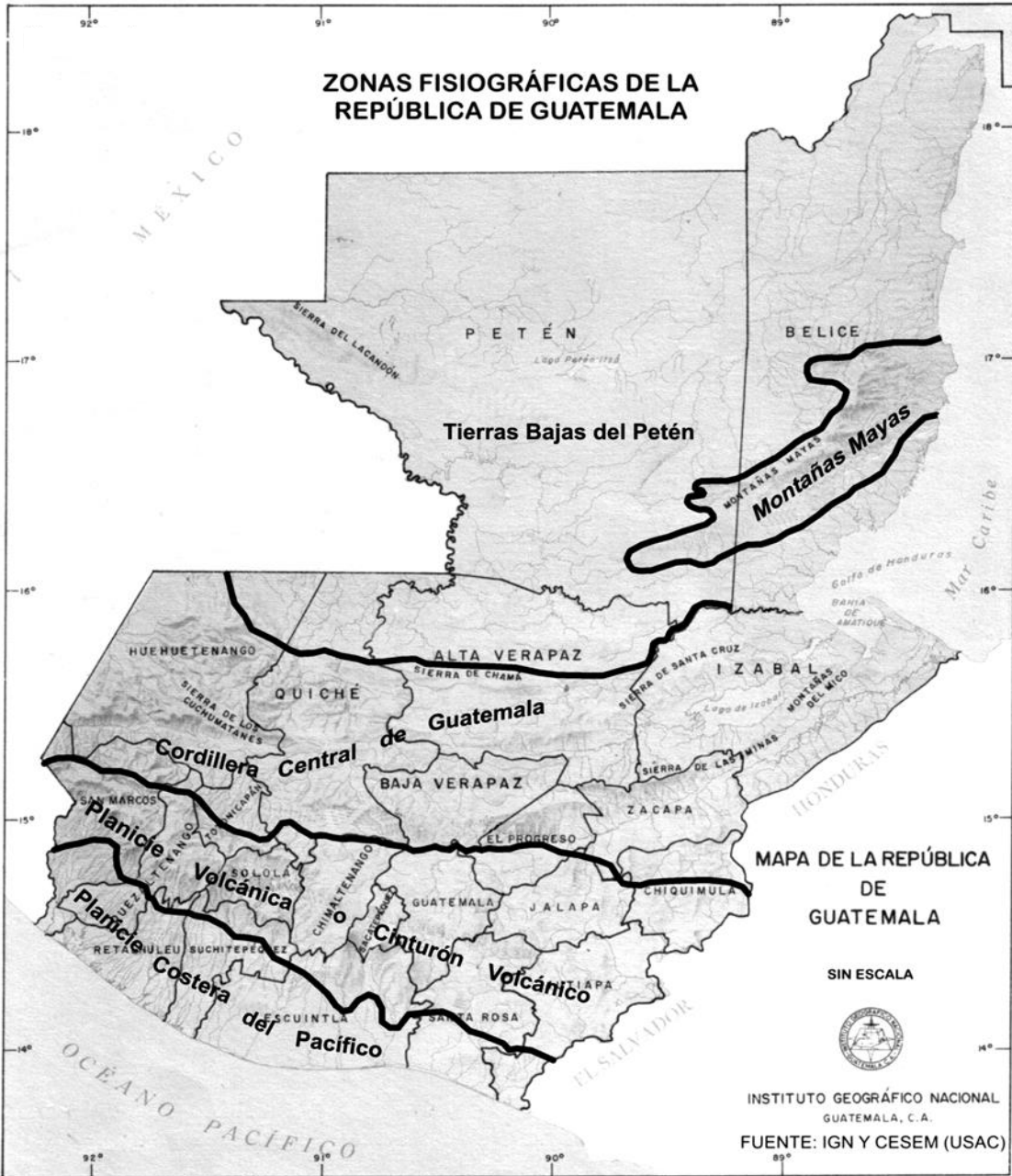
El área de estudio lo constituye la planicie costera del Pacífico.

1.1. Localización geográfica

La República de Guatemala tiene una extensión superficial aproximada de 108 000 km², se encuentra localizada entre los paralelos 13°44 y 18°30 de latitud norte y los meridianos 87°30 y 92°13 de longitud oeste.

A lo largo del litoral Pacífico, los productos de la erosión que han sido depositados en grandes cantidades por los ríos que bajan de las tierras altas volcánicas, han creado una planicie costera con un ancho promedio de 50 km, zona fisiográfica denominada planicie costera del Pacífico, la cual está compuesta por material aluvial del periodo cuaternario y que se distingue por tener elevaciones menores de los 300 m sobre el nivel del mar.

Figura 1. Zonas fisiográficas de la República de Guatemala



Fuente: HERRERA VILLATORO, Ludwyg Cristóbal Estuardo. *Caracterización e investigación geológica de los materiales utilizados en la construcción civil en Guatemala*. p. 22.

Para facilitar el procesamiento de la información, la figura 2 estiliza y delimita la zona de la planicie costera del Pacífico en estudio.

1.2. Caracterización geomorfológica

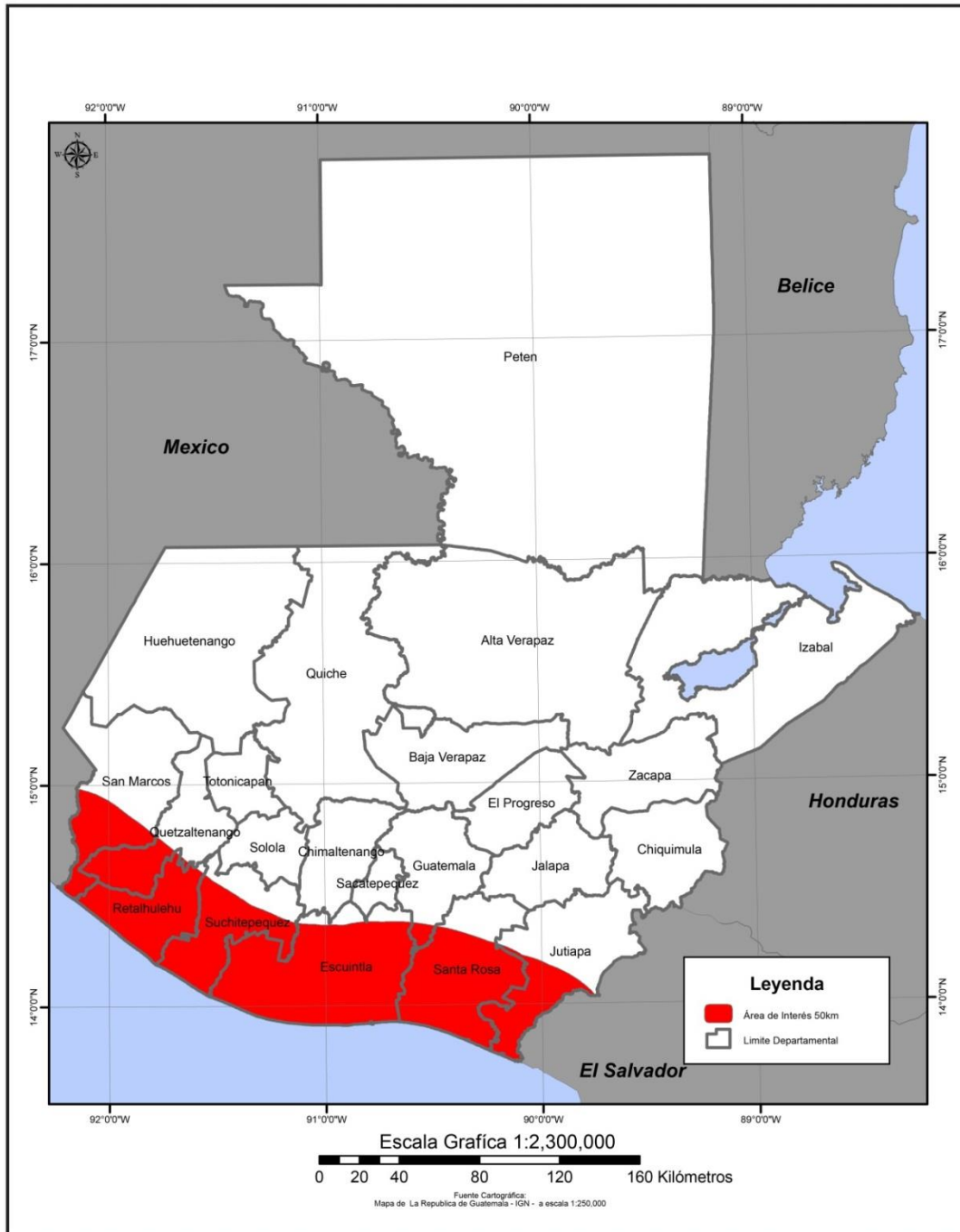
La costa del Pacífico de Guatemala se extiende desde la frontera con México hasta un promontorio rocoso en Acajutla en El Salvador, desarrollando una forma de S suave y alargada (ver figura 2). Detrás de la línea de la costa se encuentra una planicie llana, formada de barras de arena, lagunas, ríos y pantanos. El canal de Chiquimulilla, de aproximadamente 120 km de largo, ha sido creado mediante la interconexión y control de las lagunas y ríos a lo largo de este tramo costero. Las barras de arena se hallan interrumpidas por bocabarras sometidas a la influencia de las mareas, las cuales tienden a cerrarse. El cierre y más tarde la reapertura de estas, provocan cambios drásticos en la hidrología y ecología del sistema costero.

1.2.1. Geomorfología y procesos

Los ríos que bajan de las tierras altas volcánicas encuentran el camino hacia el mar a través de algunos valles existentes, las tierras bajas se encuentran ocupadas por lagunas, canales y pantano, formando una zona húmeda muy extensa. Los procesos geológicos se continúan, los ríos suministran sedimentos como arena, limo y arcilla a la planicie húmeda.

La arena que alcanza la línea de costa se adiciona a la playa y el limo y arcilla que abandonan las bocabarras, se transporta en suspensión y se disipa en aguas más profundas, depositándose finalmente en la plataforma continental e incluso en el talud.

Figura 2. Planicie costera del Pacífico de Guatemala



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

1.2.2. Dinámica costera

Los factores principales que gobiernan la dinámica morfológica general de la planicie costera del Pacífico son: el suministro de arena a la costa por medio de los ríos y los transportes litorales ocasionados por el oleaje y las corrientes marinas. Se ha estimado que el suministro total promedio de arena al sistema costero ha sido de 3×10^6 ton/año o alrededor de 2×10^6 m³/año. Esto es equivalente a la acreción anual promedio de 1 m. Probablemente, 400 000 a 1 000 000 ton (300 000 a 600 000 m³) de arena y material fino se depositan en el sistema lagunar, a lo largo de la costa y durante un periodo largo o sea, una capa de 2 a 5 mm/año (según información del estudio de vulnerabilidad de la costa del Pacífico de Guatemala ante un posible ascenso del nivel del mar).

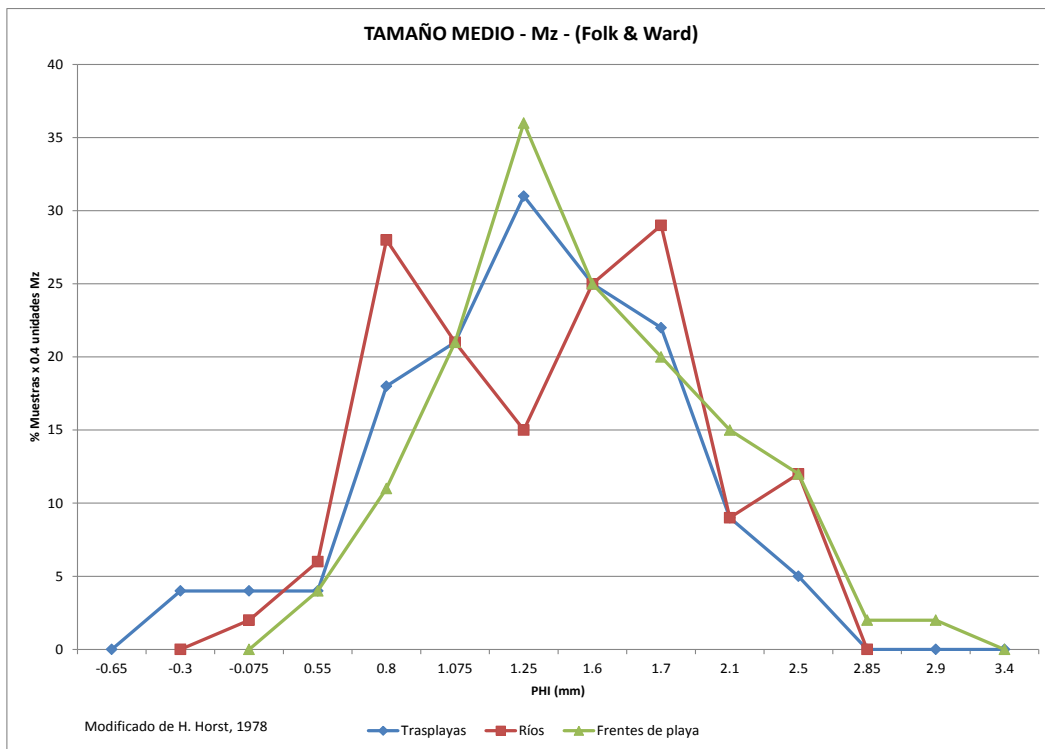
1.2.3. Textura de los sedimentos

Las curvas de frecuencia del tamaño medio basadas en los métodos estadísticos, la sedimentación reciente en la planicie costera del suroeste de Guatemala, muestran una distribución semejante para las arenas de los ríos, de los frentes de las playas y de las trasplayas (ver figura 3).

Los tamaños medios varían entre arena fina y arena muy gruesa (el tamaño más común es de la arena media). Estas curvas indican también que las arenas de los frentes de playa tienen mejor clasificación que las de las trasplaya y estas a la vez mejor que las de los ríos. La mayoría de las arenas de playa son bien o muy bien clasificadas.

Las arenas de playa y de río se pueden identificar por la curva de frecuencia de tamaño de grano. Las curvas para las arenas de río, además de señalar mala clasificación que las de las playas, exhiben colas en el extremo de grano grueso.

Figura 3. **Tamaño de los sedimentos de la planicie costera del Pacífico de Guatemala**



Fuente: *Estudio de vulnerabilidad de la costa del Pacífico de Guatemala ante un posible ascenso del nivel del mar.* p. 24.

Algunas curvas de frecuencia, sobre todo las de las arenas de río, muestran modas múltiples (ver figura 4). En otros estudios se han interpretado las modas múltiples como resultado de:

- Mezclas de constituyentes provenientes de distintas fuentes.
- Mezclas de poblaciones de granos representando distintos mecanismos de movimiento.
- Mezclas de los sedimentos de más de un ambiente de deposición.

Sin embargo, los sedimentos de la planicie costera de Guatemala provienen de una sola fuente y cada muestra representa un solo mecanismo de transporte y un solo ambiente de depositación. La explicación de ser polimodal, es la complejidad mineralógica de las rocas generadoras de los sedimentos y la rapidez de la erosión, del transporte y de la depositación.

Cada moda está constituida por fragmentos de rocas o por un mineral o grupo de minerales, con propiedades (tamaño, forma, gravedad específica) distintas a los demás. Por ejemplo: en una curva de tres modas, la de grano más grueso suele corresponder a los fragmentos de rocas volcánicas, la siguiente a plagioclasa y la de grano más fino a los minerales máficos (olivino, piroxeno, anfíboles, magnetita).

La figura 3 muestra la distribución del tamaño de los constituyentes de las arenas, para que se compare con las modas o moda que se pueda generar en cada subambiente de depositación y se pueda identificar de manera general el constituyente mineral respectivo.

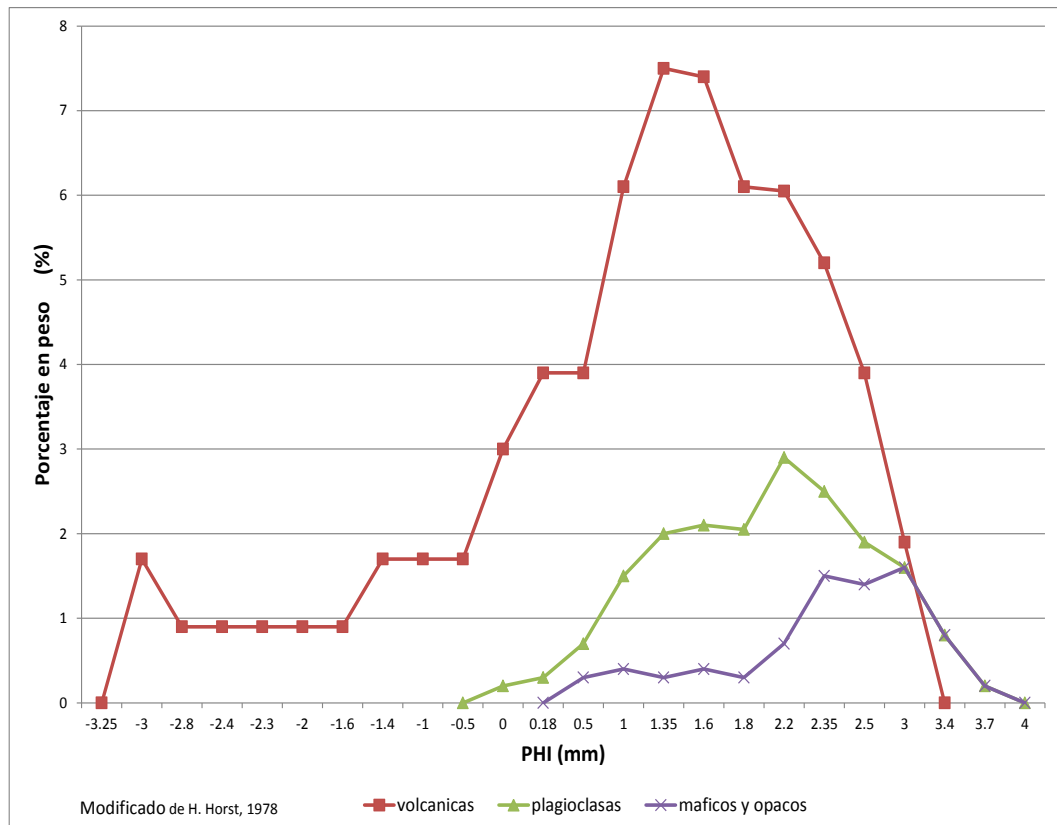
Si sobre la gráfica de la línea divisoria de Moiola y Weiser, 1968 (obtenida de los análisis de las arenas de río y playa en el sureste de los Estados Unidos de América, en ambiente geológico muy diferente que al suroeste de Guatemala) se quisieran comparar las curvas obtenidas de los análisis para los sedimentos de los distintos ambientes de depositación de la planicie costera del Pacífico de Guatemala se observaría que casi todas las arenas de las playas guatemaltecas se interpretarían como arenas de río.

Esto se debe a la clasificación menos perfecta de las playas de Guatemala, que resalta de la complejidad mineralógica de las rocas generadoras de los sedimentos y del ambiente superdinámico del transporte y de la depositación. Las posiciones de las líneas divisorias no son universales y debe tomarse en cuenta las condiciones geológicas particulares de la zona de estudio. Es decir que para el caso de la planicie costera del Pacífico de Guatemala se tendrían que elaborar curvas características de cada subambiente para realizar comparaciones futuras.

1.2.4. Composición de los sedimentos

El orden de abundancia de los constituyentes de las arenas, en las fracciones separadas de granos del tamaño de 2 mm es el mostrado en la tabla I. Las fracciones separadas de grano más grueso contienen más fragmentos de roca, plagioclasa y menos minerales máficos (ver figura 4).

Figura 4. Tipo de constituyentes de la planicie costera del Pacífico de Guatemala



Fuente: *Estudio de vulnerabilidad de la costa del Pacífico de Guatemala ante un posible ascenso del nivel del mar.* p. 26.

La arena muy fina contiene más minerales máficos y muy pocos fragmentos de roca (lavas andesíticas, basálticas y ácidas, en orden de abundancia). No se ha identificado algún fragmento de toba soldada, probablemente porque este tipo de rocas es altamente sensible al medio ambiente.

Tabla I. **Composición de las arenas en porcentaje**

Composición	Porcentaje (%)
Fragmentos de rocas volcánicas	56
Plagioclasa	25,4
Augita	4,7
Hiperstena	3,6
Feldespatos alcalinos	2,8
Olivino	2,6
Magnetita	2,6
Oxihornblenda	1,0
Otros	0,8

Fuente: elaboración propia.

1.3. Geología regional y tectónica

La zona costera del Pacífico de Guatemala es considerada en términos de tectónica de placas, como un margen continental activo. Las rocas y sedimentos que constituyen dicha zona están relacionados directamente con la convergencia de placas que ocurre en la fosa mesoamericana, en el océano Pacífico, en la que la placa de Cocos se subduce bajo la placa caribeña.

La figura 5 muestra los rasgos tectónicos generales de la región centroamericana, en donde Guatemala se ubica en la convergencia de tres placas tectónicas: la placa de Norteamérica, la placa del Caribe (el límite entre estas placas lo constituye el sistema de fallas transcurrentes Polochic-Motagua) y la placa de Cocos.

En el perfil geotectónico de la planicie costera del Pacífico de Guatemala se ha identificado una zona de cuenca ante-arco que es la de mayor interés en la zona en estudio. La fuente de sedimentos de la planicie costera es la cadena volcánica y los afloramientos que cortan los ríos en la paso hacia el mar. El mayor o menor aporte de sedimentos por parte de los ríos se ve fuertemente influenciado por la actividad volcánica y la alternancia de las estaciones secas y lluviosas.

Los ríos de la vertiente pacífica arrastran fragmentos de roca volcánica (lavas andesíticas, principalmente) hasta la zona litoral generando sistemas de deltas y barras de arena.

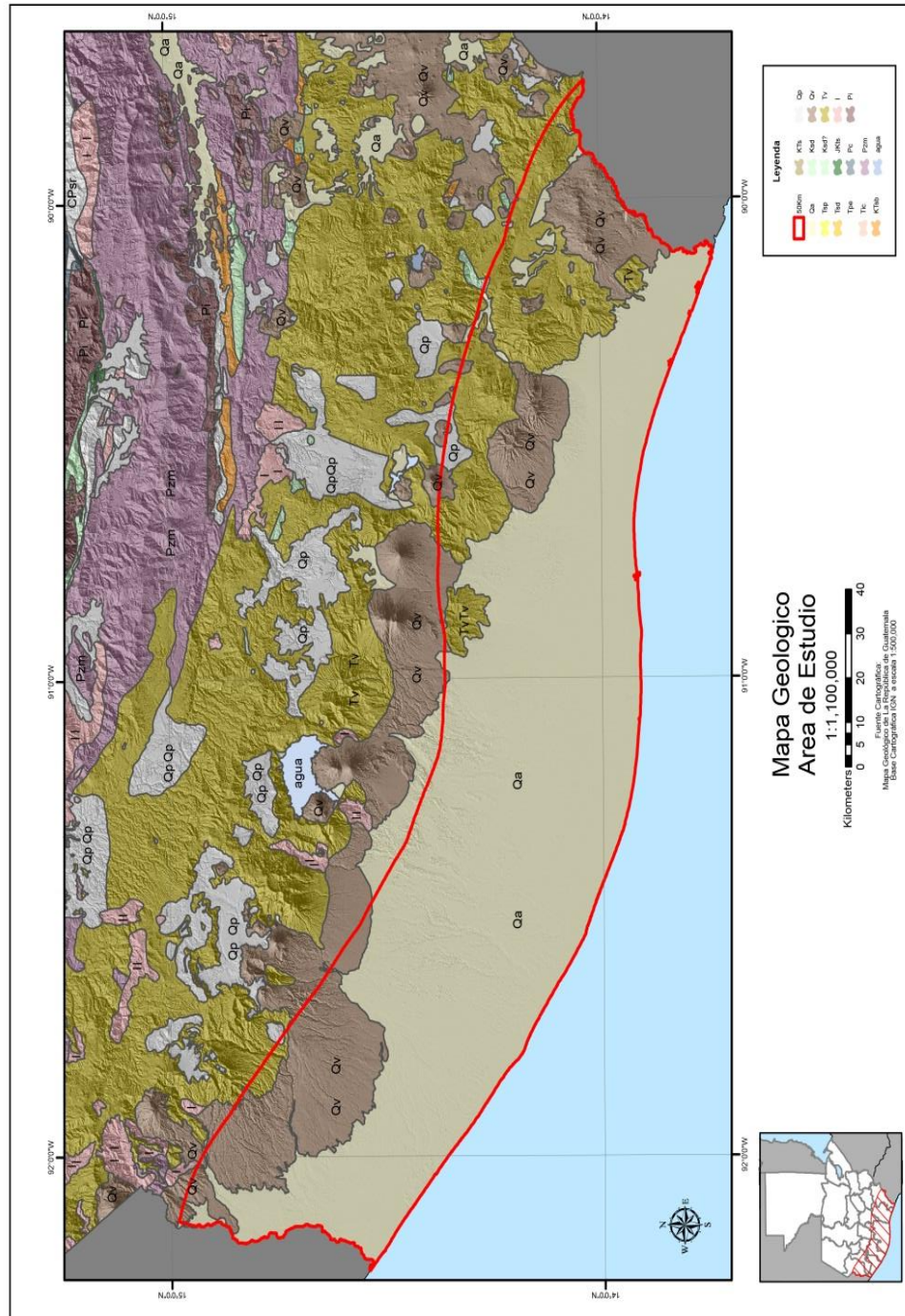
El mapa geológico de la figura 6 muestra la planicie costera donde se pueden observar claramente las relaciones de roca fuente de sedimentos, drenaje y zonas de deposición con algunos rasgos geológicos característicos tales como deltas y deltas incipientes.

Figura 5. Tectónica general de la región centroamericana



Fuente: elaboración propia a partir de la información contenida en: *Proyecto RESIS II Evaluación de la amenaza sísmica en Centro América*. p.18.

Figura 6. Mapa geológico de la planicie costera del Pacífico de Guatemala



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

1.3.1. Geología del subsuelo

El territorio de Guatemala está comprendido por la geografía física, dentro de una plataforma continental que se extiende desde el Istmo de Tehuán-tepec en México hasta las tierras bajas de Otrato en Colombia.

Perteneciendo Guatemala junto con El Salvador, Honduras y parte de Nicaragua, a la América Central Septentrional, siendo la estructura e historia geológica de esta zona parte del continente norteamericano.

Los datos geológicos del subsuelo de la planicie costera del Pacífico se obtuvieron revisando los datos del Proyecto de Perforación Profunda del Mar (DSDP por sus siglas en inglés). El pozo Costa Afuera Núm. 496, perforado aproximadamente a 22 km de la costa, en el Cañón de San José, al sur del puerto del mismo nombre (situado en la parte central de la costa pacífica de Guatemala) muestra esencialmente dos tipos de sedimentos:

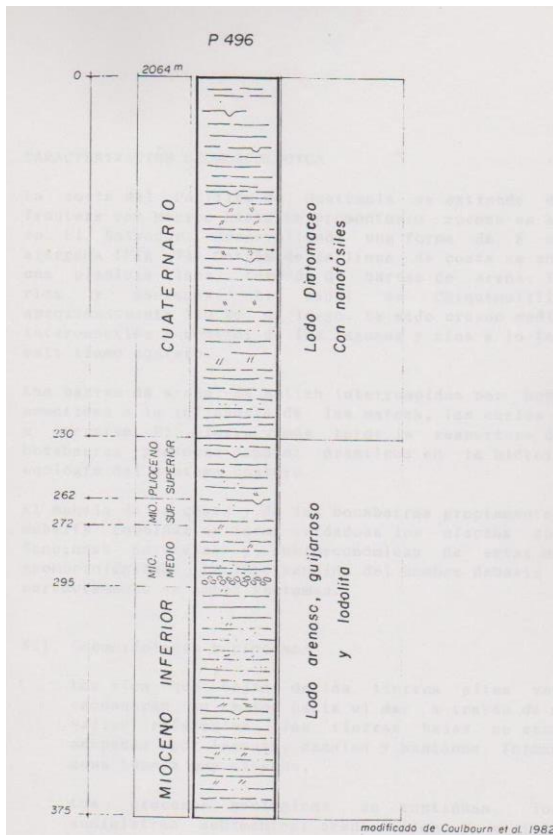
- Lodo arenoso, guijarroso y lodolita
- Lodo diatomáceo

La deposición de los sedimentos del tipo a se llevó a cabo desde el Mioceno Inferior hasta el Plioceno Superior. Durante el Cuaternario el tipo de sedimentos depositados cambió a diatomáceo.

1.3.2. Estratigrafía

En el territorio pueden distinguirse diez y siete grandes litologías diferenciables a gran escala. En el área de la planicie costera del Pacífico de Guatemala se encuentra la mayor concentración de aluviones cuaternarios, en los departamentos de San Marcos, Retalhuleu, Escuintla, Santa Rosa y Jutiapa.

Figura 7. **Columna estratigráfica simplificada de la planicie costera del Pacífico de Guatemala, frente a San José**



Fuente: *Estudio de vulnerabilidad de la costa del Pacífico de Guatemala ante un posible ascenso del nivel del mar.* p. 9.

Tabla II. **Columna cronoestratigráfica de Guatemala**

Columna	Tipo de roca	ERA	Periodo	EDAD (Serie)	Edad absoluta (millones de años)
Qa Qp Qv Tv Tsp Tsd I Tic Tpe KTsb	Aluviones Cenizas volcánicas Rocas volcánicas Rocas volcánicas sin dividir Depósitos continentales Calizas, areniscas y conglomerados Rocas plutónicas Yeso y Marga Sedimentos marinos Areniscas Labinal	CENOZOICO	Cuaternario Terciario	Plioceno Oligoceno Oligoceno Mioceno Eoceno Eoceno Paleoceno	3,5 3,5 3,5 64 3,5 a 37 7 a 37 64 53 37 a 64 64
KTs I Ksd JKts	Sedimentos Clásicos Marinos Rocas Plutónicas Carbonatos de cretácico Rocas ultrabásicas Formación Todos Santos	MESOZOICO	Cretácico Cretácico Cretácico Jurásico Cretácico Jurásico	Campaniano Pre-Maestrichtiano	136 136 500 64 a 136 64 a 136
Pc CPsr I Pzm	Carbonatos del Pérmico Rocas Sedimentarias del Carbonífero y Pérmico Rocas Plutónicas Rocas Metamórficas	PALEOZOICO	Pérmico Pérmico Carbonífero Pre-Pérmico		280

Fuente: CESEM, *Síntesis Geológica de Guatemala*.

1.4. Hidrología

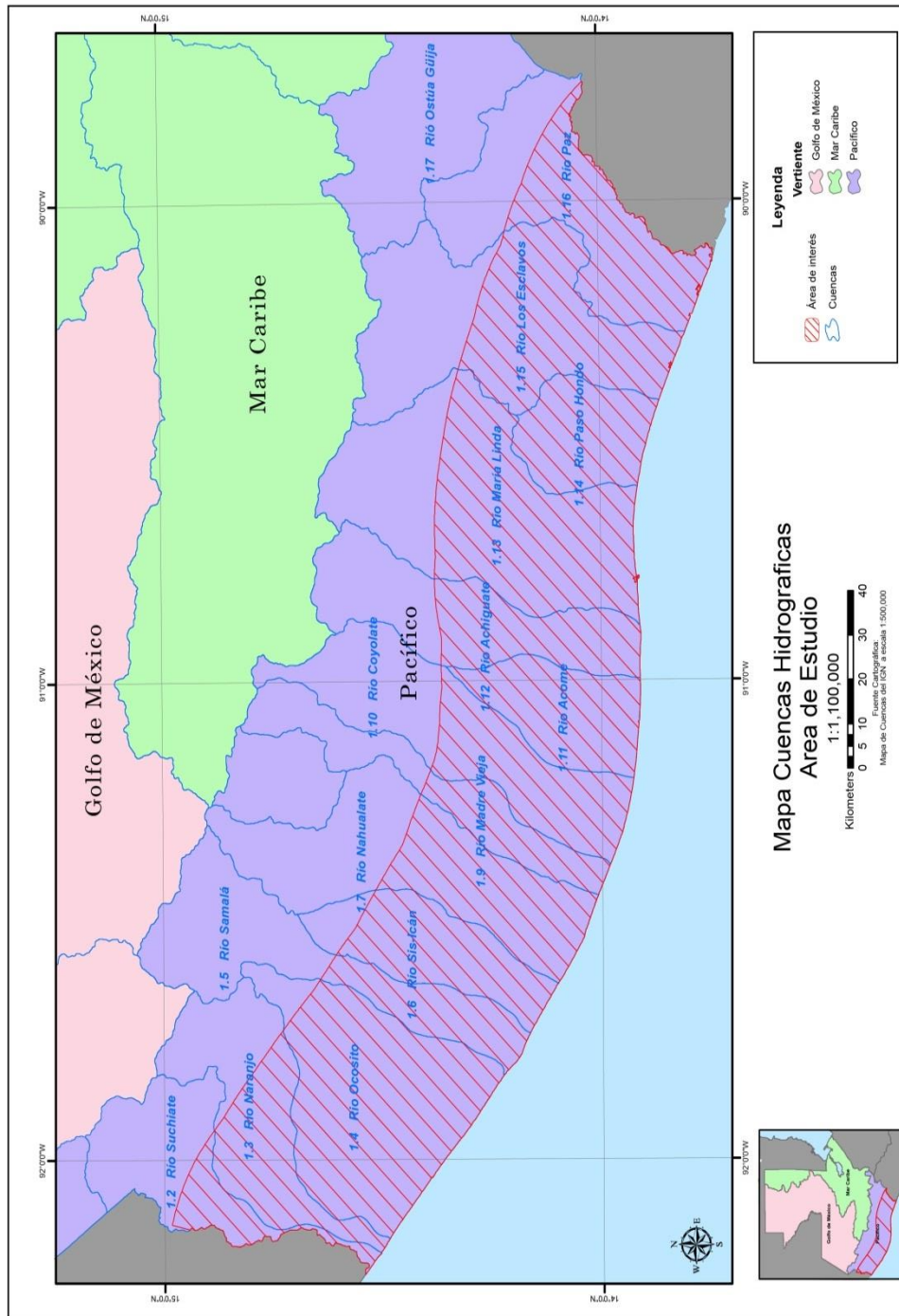
El país posee 2 regiones hidrográficas expresadas en 38 cuencas fluviales y 194 cuerpos de agua continentales, divididos en: 7 lagos, 49 lagunas, 109 lagunetas, 19 lagunas costeras, 3 lagunas temporales y 7 embalses distribuidos en 18 de los 22 departamentos del país y que abarcan una superficie de 1067 km².

Los sistemas montañosos son los que determinan estas regiones, la de los ríos que desembocan en el océano Pacífico, y los que lo hacen en el Atlántico, que a la vez se dividen en dos vertientes: la del Caribe, por el golfo de Honduras, y la del golfo de México, atravesando Yucatán. Los ríos que desembocan en el golfo de Honduras son extensos y profundos, propios para la navegación y la pesca; entre los más importantes está el río Motagua o Río Grande, y Río Dulce, desagüe natural del lago de Izabal.

Los ríos de la cuenca hidrográfica del Pacífico se caracterizan por ser cortos, de curso rápido e impetuoso; entre ellos están el río Suchiate (frontera natural entre México y Guatemala, a la altura del departamento de San Marcos), y el río La Paz (frontera natural entre el Salvador y Guatemala, a la altura del departamento de Jutiapa).

La zona en estudio puede subdividirse en 14 cuencas hidrográficas (ver figura 8) que de oeste a este son: Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate, Madre Vieja, Coyolate, Acomé, Achiguate, María Linda, Paso Hondo, Los Esclavos y río La Paz.

Figura 8. Cuencas hidrográficas de la planicie costera del Pacífico de Guatemala



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

El litoral costero de Guatemala tiene una extensión de 402 km. Las costas del mar Caribe, estimadas en 148 km, están comprendidas en el golfo de Honduras, donde se encuentra la Bahía de Amatique. El litoral costero del Pacífico es la costa más extensa con 254 km.

1.4.1. Vertiente del océano Pacífico

Los ríos de esta vertiente son cortos (110 km en promedio), se originan a una altura media de 3 000 msnm y presentan pendientes fuertes en las partes altas de las cuencas (mayor que 32 %), cambiando bruscamente a pendientes mínimas en la planicie costera. Esto genera grandes zonas susceptibles de inundación en la parte baja al producirse crecidas instantáneas de gran magnitud y corta duración, debido a que el drenaje es, en la mayor parte, deficiente, de tipo subdentrítico en las cabeceras y lineal subparalelo en la parte media y baja alta de las cuencas, donde muchos de los ríos no desembocan directamente en el mar, sino que corren paralelamente a la línea de costa antes de desembocar en el, dando lugar a la formación de lagunas, esteros y canales.

Asimismo, los ríos que conforman las cuencas, durante el periodo lluvioso y al sucederse erupciones volcánicas en los volcanes activos en el límite norte de la vertiente, pueden acarrear lahares que provocan inestabilidad de los cauces e inundaciones en las partes bajas. Esta vertiente ocupa el 25 % del país.

1.4.2. Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas en Guatemala son ampliamente utilizadas para agua potable, industria y riego y se estima que la mayoría de la población que goza de agua potable por acueductos se abastece de agua subterránea. El país puede ser dividido en cuatro regiones hidrogeológicas, siendo la correspondiente a la planicie costera del Pacífico, la región de las llanuras aluviales cuaternarias de la costa sur, que se considera son las formaciones con mayor potencial de aguas subterráneas.

Los diferentes tipos de rocas (litología), los lineamientos estructurales y la geomorfología son los parámetros que se toman en consideración como los factores principales que controlan la circulación y almacenamiento de agua subterránea. Se considera que los diferentes tipos de roca constituyen el factor principal ya que las propiedades físicas son una evidencia indirecta que definen si un área tiene potencial de agua subterránea bajo, medio o alto.

La geomorfología es considerada como el segundo factor de importancia debido al hecho de que la infiltración del agua en el terreno depende de los tipos de suelos, sedimentos, relieve y vegetación. Los lineamientos estructurales constituyen normalmente el tercer factor de importancia que controla la circulación y almacenamiento de agua subterránea aunque en terrenos cristalinos puede considerarse un factor de extrema relevancia.

La complejidad geológica del país es manifiesta a las distintas escalas a que se realicen estudios hidrogeológicos, desde el nivel local al regional. Para algunas regiones como la planicie costera del Pacífico no hay disponible un modelo geométrico sedimentario del aluvión así como tampoco existe información sobre las variaciones estructurales de la cuenca sedimentaria.

Esto puede explicar las variaciones en el rendimiento de algunos pozos perforados en varios órdenes de magnitud para la planicie costera del Pacífico, por ejemplo, un pozo en Retalhuleu reporta 30 gpm, algunos pozos en Masagua un promedio de 120 gpm y pozos en La Gomera, Escuintla con 2 000 gpm. En algunos sectores del norte de ciudad de Guatemala se reportan variaciones de 900 a 160 gpm en una distancia de 800 m entre los pozos, lo cual obedece a fuertes cambios estructurales y litológicos. Por la complejidad geológica de Guatemala, estos drásticos cambios en rendimiento de pozos de agua documentados para ciudad de Guatemala y la planicie costera del Pacífico pueden ocurrir en cualquier otra región del país.

Se han identificado puntualmente acuíferos con dureza en terrenos carbonatados, incursiones salinas en acuíferos costeros, salinización en terrenos compuestos por yeso y/o anhidrita, contaminación natural de sodio y anomalías geotérmicas en zonas volcánicas.

La tabla III y la figura 9 muestran la división de las regiones hidrogeológicas del país. La tabla IV, la descripción de las unidades hidrogeológicas identificadas para Guatemala.

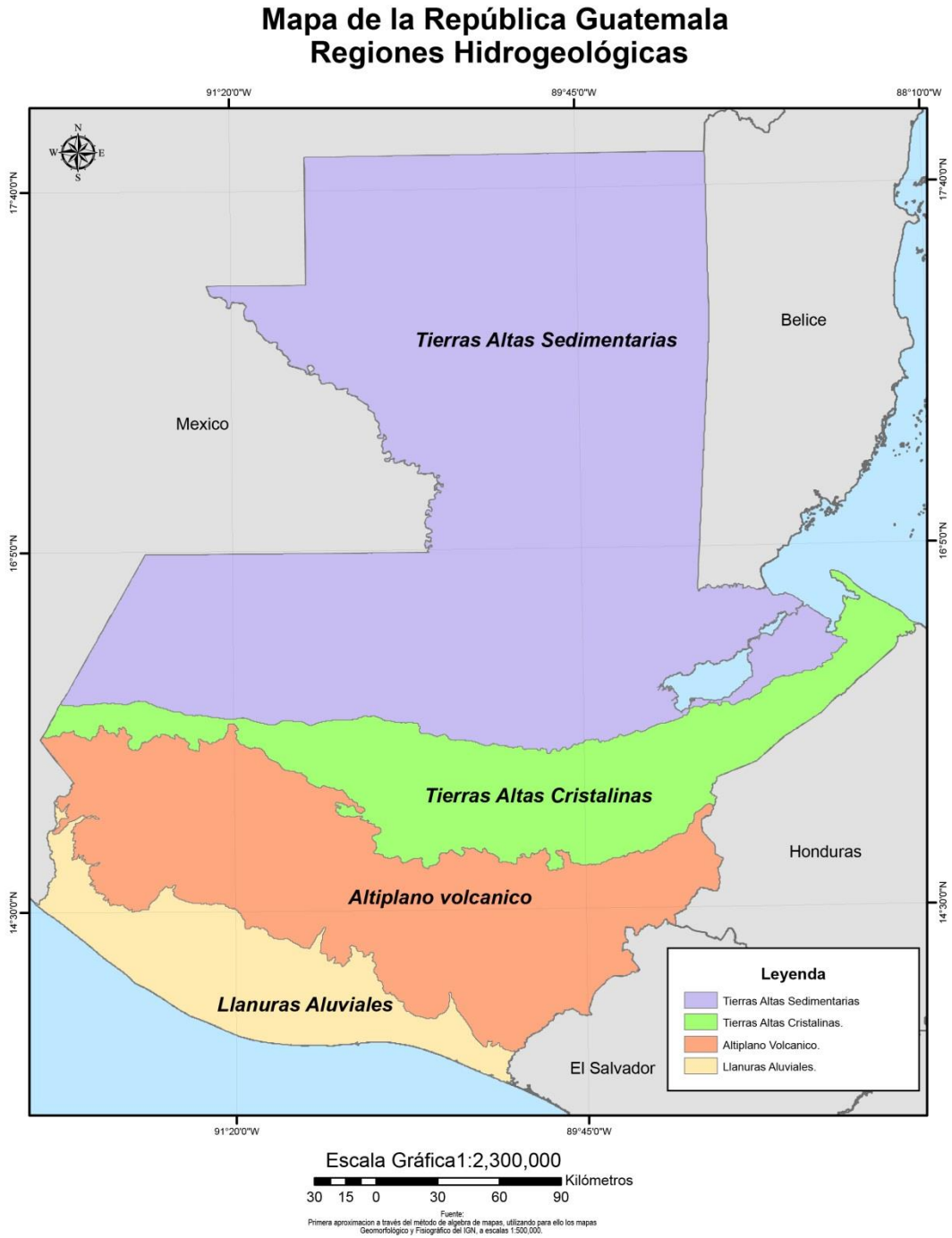
La evaluación de aguas subterráneas más reciente a que se tuvo acceso lo constituye el estudio del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, cuyos resultados, específicamente para el área de interés, se sintetizan en la tabla V.

Tabla III. Descripción de las regiones hidrogeológicas de Guatemala

Región hidrogeológica	Características
Llanuras aluviales de la costa del Pacífico	Están compuestas por depósitos aluviales cuaternarios que se extienden a lo largo de la costa del Pacífico en una longitud de 260 km y ancho entre 10 y 60 km.
Altiplano volcánico	Se localiza al norte de la llanura del Pacífico a lo largo de una franja de 350 km de largo con un ancho entre 60 y 90 km. Constituido por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias, derrames de lava y piroclastos. Algunos conos volcánicos están activos.
Tierras altas cristalinas	Esta región se localiza al norte del altiplano volcánico y está compuesta por una serie de cadenas montañosas (Chuacús, Las Minas, Merendón) delimitadas por la zona de falla del Motagua y del Polochic. Las formaciones geológicas presentes son rocas ígneas intrusivas, rocas metamórficas y algunos afloramientos pequeños de lutitas, areniscas y conglomerados.
Región sedimentaria septentrional	Esta zona ocupa el resto del país y se dividió en dos sub-regiones: las tierras altas sedimentarias (Sierra de Los Cuchumatanes, Sierra de Chamá, y Sierra de Santa Cruz) y la región sedimentaria de Petén. Las formaciones geológicas consisten principalmente de calizas Cretácicas en gran parte karstificadas, calizas Pérmicas, rocas sedimentarias clásticas, y algunos intrusivos en las Montañas Mayas.

Fuente: *Evaluación del Potencial de Aguas Subterráneas de Guatemala*. p. 2.

Figura 9. Regiones hidrogeológicas de la República de Guatemala



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

Tabla IV. Descripción de las unidades hidrogeológicas identificadas para Guatemala, con base en el mapa geológico 1:500 000

Unidad número.	Símbolo	Nombre	Características generales
1	Qa	Aluviones cuaternarios	Los depósitos están ubicados en la costa del Pacífico formados por gravas, arenas y arcillas provenientes de la erosión de la cadena volcánica con espesor de sedimentos hasta 200 m en Escuintla sin haber interceptado la base. Algunos depósitos aluviales se han desarrollado en los valles de algunos ríos del altiplano volcánico y de las tierras altas cristalinas, con espesores de hasta 145 metros.
2	Qp	Piroclásticos cuaternarios	Compuesta principalmente por pómez, lapilli y flujos de ceniza acumulados en los valles del altiplano, rellenando depresiones tectónicas. En el valle de Guatemala se reporta un espesor que alcanza más de 250 metros. En el valle de Quetzaltenango se reporta un espesor promedio entre 300 y 400 m pudiendo alcanzar hasta 1000 m en la parte más profunda de la caldera.
3	Qv	Lavas cuaternarias	Lavas de composición basáltica, andesítica y riolítica derivadas de los conos activos. El espesor de las coladas y lahares intercalados es variable pudiendo alcanzar hasta 500 metros. El potencial de aguas subterráneas está relacionado directamente con el grado de fracturamiento que presentan las lavas.
4	Tv	Lavas y tobas terciarias	Depósitos que incluyen lavas y tobas del Terciario Superior con espesores de cientos de metros. Muy importante en el altiplano volcánico con rendimientos que varían entre 4000 y 8000 gpm en El Ojo de Agua al sur de Ciudad de Guatemala. Los acuíferos están constituidos por andesitas con alto grado de fracturamiento.

Continuación de la tabla IV.

5	Tsp, Tsd, Tic, Tpe	Depósitos sedimentarios terciarios	Se incluyen formaciones sedimentarias que afloran en la parte más septentrional de Guatemala con un espesor de hasta 6000 metros. La composición litológica es muy variable incluyendo estratos de arenisca, limolitas, margas, calizas y yeso.
6	KTsb, KTs	Depósitos sedimentarios cretácico-terciarios	Incluye sedimentos clásticos principalmente arcillosos y de baja permeabilidad que se presentan en la parte sur de Petén y el norte de Alta Verapaz los cuales pueden alcanzar un espesor de hasta 4000 metros.
7	Ksd	Calizas y dolomitas cretácicas	Unidad que considera los depósitos carbonatados con desarrollo de paisaje kárstico distribuidos en la parte central del país. La composición litológica varía de calizas arrecifales, dolomitas, brechas calcáreas y conglomerados calcáreos.
8	JKts	Depósitos clásticos jurásico-cretácico	Los depósitos incluyen la Formación Todos Santos y San Ricardo principalmente sedimentos arcillosos y limolitas rojas con intercalaciones de calizas y conglomerados, en espesores que varían de 400 a 500 metros.
9	Pc	Calizas y dolomitas pérmicas	Se trata de la Formación Chochal que incluye calizas y dolomitas con intercalaciones de lutitas y un espesor que varía de 500 a 1000 metros.
10	CPsr	Depósitos clásticos permo-carboníferos	Esta unidad incluye el Grupo Santa Rosa, el cual está compuesto por litologías clásticas que varían de lutitas, limolitas, pasando por areniscas y conglomerados.
11	Pzm,	Rocas ígneas y metamórficas	Esta unidad incluye las rocas ígneas y metamórficas que forman parte de las Tierras Altas Cristalinas, incluyendo granitos, dioritas, peridotitas, gneises, esquistos, y filitas.

Fuente: *Evaluación del Potencial de Aguas Subterráneas de Guatemala*. p. 3.

Tabla V. **Resumen de la evaluación de aguas subterráneas de Guatemala para la planicie costera del Pacífico**

Unidad de acuíferos	Características de los acuíferos	Hidráulica de los acuíferos	Otras observaciones
Aluvión Cuaternario en la planicie costera del Pacífico, Valle del Motagua, Valle del Polochic y Norte de Petén	Aluvión Cuaternario compuesto por arenas y grava interestratificada con arcillas. En algunos lugares de Escuintla el espesor del aluvión puede alcanzar hasta 200 metros.	18 pozos de Escuintla muestran un rango de producción entre 158 y 792 gpm. Las transmisividades en el aluvión del Pacífico varían de 150 a 2000 m cuadrados/día.	En el Pacífico las profundidades del nivel estático varían de 1 a 6 metros. El nivel dinámico se localiza entre 10 y 30 metros. Algunos acuíferos someros son vulnerables a la contaminación biológica y por pesticidas.
Rocas Volcánicas Piroclásticas y lavas Terciarias y Cuaternarias.	El fracturamiento en las andesitas ha incrementado notablemente la permeabilidad.	Pozos en el Valle de Quetzaltenango reportan entre 317 y 792 gpm. Algunos pozos entre Ipala y Suchitán producen entre 237 y 634 gpm. Para el año 1995 EMPAGUA administraba 121 pozos.	Para el Valle de Ipala el nivel dinámico varía entre 35 y 90 metros. Un pozo en el Hospital Roosevelt presentaba concentraciones anómalas de sulfatos (SO ₄ -2, 256 miligramos/litro).
Sedimentos cuaternarios costeros	Sedimentos en la línea de costa del océano Pacífico y el Caribe.	No se reportan datos específicos.	Se reporta agua salada alojada en los sedimentos. Esta agua salada puede contaminar los acuíferos de agua fresca, si ocurren ambientes de sobreexplotación.

Fuente: *Evaluación del Potencial de Aguas Subterráneas de Guatemala*. p. 4.

1.5. Topografía

La topografía de la planicie costera del Pacífico es en general plana, susceptible a inundaciones, sumersión, pérdida de tierra cultivable y otros problemas ocasionados por la introducción de aguas oceánicas. No se han identificado zonas de acantilados (ver figura 10).

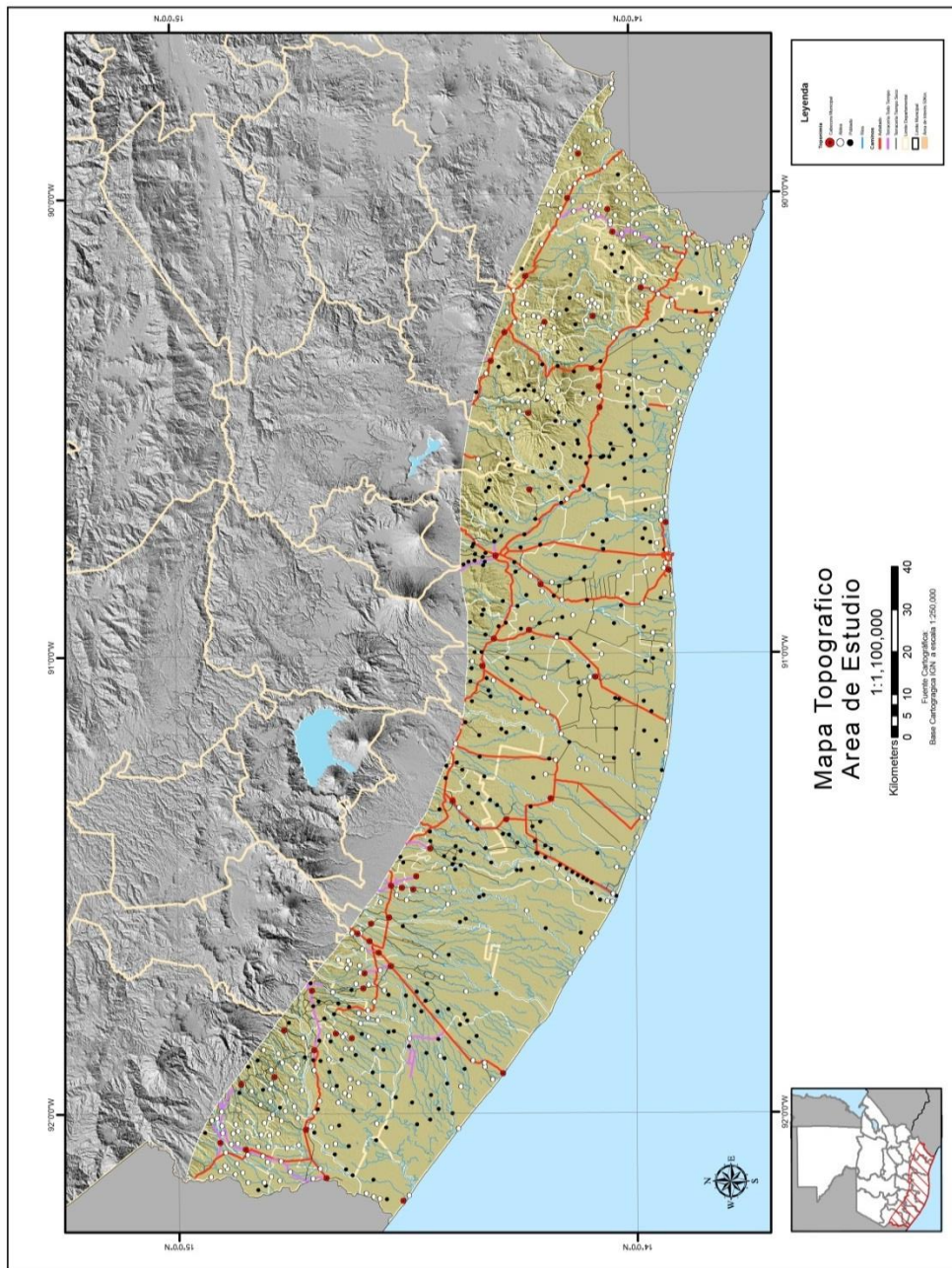
1.6. Clima

La planicie costera del Pacífico se caracteriza por tener elevaciones de 0 a 300 msnm, extendiéndose desde el departamento de San Marcos hasta el de Jutiapa. Las lluvias tienden a disminuir conforme se llega al litoral marítimo con deficiencia durante parte del año.

Según el sistema de clasificación Thornthwaite, el clima de la costa del Pacífico corresponde al tipo A' a Bi, lo cual significa que es cálido, sin estación fría bien definida, húmedo y con invierno seco variando a semiseco (ver figura 11). Los registros de temperatura son altos, teniendo como temperatura promedio 28 °C. La vegetación varía de bosque a pastizal en el sector oriental.

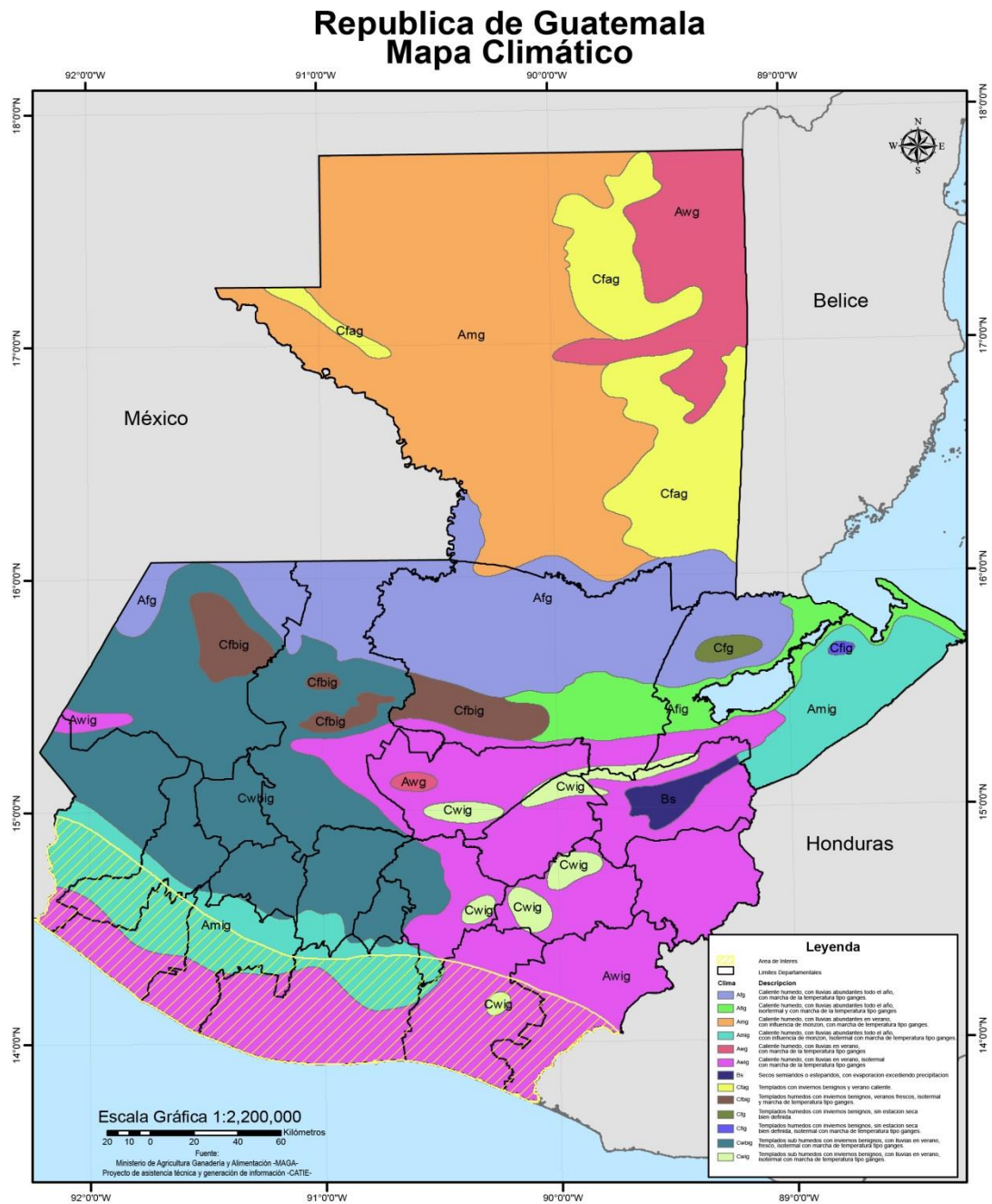
El rango de las precipitaciones se encuentra entre los 1500 a 4500 mm anuales, en el sector oeste-este de la vertiente, siendo inferiores en el sector este y mayores hacia el oeste; mientras que el rango para el sector norte-sur de la vertiente se encuentra entre 700 a 1500 mm anuales, siendo inferiores los valores en la parte costera y aumentando conforme las elevaciones. A partir de estas informaciones se estima un volumen de escorrentía de 25 500 000 de m³/año.

Figura 10. Mapa topográfico de la planicie costera del Pacífico de Guatemala



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

Figura 11. Mapa climatológico de la planicie costera del Pacífico de Guatemala



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

1.7. Clasificación de los suelos

En las secciones departamentales que forman parte de la planicie costera del Pacífico de Guatemala, los suelos son clasificados en series, donde la mayoría tiene el origen en depósitos marinos presentando una textura superficial arenosa y una coloración gris oscuro a gris café oscuro, en el subsuelo presenta texturas franco-arcillosas y coloraciones gris a gris café. Por tratarse de arenas de origen marino, el drenaje interno es malo y el pH alcalino. En la tabla A.3 del apéndice 2 se encuentran listados todos los grupos y subgrupos en los que se clasifican los suelos para cada departamento del área de estudio.

1.7.1. Suelos del departamento de San Marcos

El declive del Pacífico es un llano inclinado que se extiende desde el extremo sur de las montañas volcánicas hasta el litoral del Pacífico. Las elevaciones varían desde cerca de 150 m hasta aproximadamente 1 800 msnm. Esta región está formada principalmente por un sistema de abanicos aluviales coalescentes, incluyendo además algunas áreas con base rocosa. La inclinación de esta planicie varía entre el 22 % en la parte superior y el 2 % en la parte inferior; el área se caracteriza por ríos en canales profundos y barrancos en forma de V.

El litoral del Pacífico es una planicie que se extiende desde el límite sur del declive del Pacífico hasta el océano Pacífico. La inclinación varía de 0,5 a 1 %. El seccionamiento no es completo y los suelos son en general de mal drenaje.

Los suelos del departamento de San Marcos han sido divididos en 20 unidades que consisten de 17 series de suelo, una fase de suelo y dos clases de terreno misceláneo. Adicionalmente, los suelos han sido divididos en cinco grupos amplios y cada grupo se divide en subgrupos según la profundidad del suelo, la clase de material madre, el relieve y el drenaje, donde estos son factores importantes. En el grupo IV que corresponde a la zona de interés, hay tres subgrupos (ver figura 12, tabla A.3).

El litoral del Pacífico no es ancho en el departamento de San Marcos y se extiende a lo largo del río Suchiate por unos 35 km, solamente alrededor del 8 % del área del departamento. Es un llano con una inclinación máxima del 1 %. Gran parte está en pastos, un área considerable encontrándose en la producción del maíz.

En el subgrupo A, están los suelos Ixtán. Estos suelos se usan comúnmente para el pastoreo. Con regadío pueden adaptarse al cultivo en general. En el subgrupo B, están los suelos Bucul. Casi toda el área está forestada, con ciertas partes que han sido desmontadas para pastos.

Se necesitan sistema de regadío y desagüe para poderlos desarrollar completamente. En el subgrupo C, están incluidos los suelos Tiquisate franco arenoso fino, que comprenden más de 11 000 Ha y son los suelos más extensos en el litoral. Se han desarrollado sobre depósitos arenosos aluviales o marinos.

Son porosos y fácilmente penetrados por las raíces, el agua y el aire, pueden ser cultivados con éxito si se proveen de riego y desagüe, aumentando y manteniendo el nivel de materia orgánica.

1.7.2. Suelos del departamento de Quetzaltenango

Este departamento se extiende desde cerca de la costa del Pacífico, a través de la vertiente continental, hasta la altiplanicie central, una distancia en línea recta de aproximadamente 100 km.

El litoral del Pacífico consiste de depósitos marinos que ocupan un llano casi plano en la parte sur del departamento, caracterizado por la inclinación casi uniforme de alrededor de 0,5 %. El margen interno tiene una altitud aproximada de 150 msnm. El declive del Pacífico es un llano cóncavo formado por abanicos aluviales coalescentes. La inclinación en la parte superior es aproximadamente del 22 % pero esta se reduce gradualmente hasta el 1 % en el límite inferior. Tiene alrededor de 30 km de ancho.

Casi toda el área de Quetzaltenango desagua hacia el sur en el océano Pacífico, pero una parte desagua en el mar Caribe a través del río Motagua y una zona en el norte desagua en el golfo de Campeche por el río Negro.

En el declive del Pacífico hay muchos arroyos cortos que fluyen rápidamente a través de barrancos estrechos tortuosos. No existen áreas de suelos mal drenados, excepto en la planicie costera del Pacífico.

Los suelos del departamento de Quetzaltenango han sido divididos en 21 unidades que consisten de 17 series de suelo, 2 fases de suelo y 2 clases de terreno misceláneo (ver figura 13). Los suelos han sido divididos en cinco grupos amplios y en el grupo IV que corresponde a la zona de interés, hay tres subgrupos.

La planicie costera del Pacífico de Quetzaltenango es una planicie suavemente inclinada que se extiende desde la base del declive del Pacífico hacia el mar. En este departamento no se extiende exactamente hasta la costa, pues el departamento de Retalhuleu incluye una faja angosta del litoral al sur del departamento de Quetzaltenango. Esta planicie tiene una inclinación uniforme entre 0,5 y 1,0 %.

En el subgrupo A, están incluidos solamente los suelos Ixtán. El subgrupo B incluye los suelos Bucul. Casi toda el área está forestada. En el subgrupo C, están incluidos los suelos Tiquisate franco arenoso fino.

Estos suelos no son muy extensos en este departamento, siendo de mayor importancia en San Marcos y en los departamentos al este del río Nahualate. Son porosos y fácilmente penetrados por las raíces, el aire y el agua.

1.7.3. Suelos del departamento de Suchitepéquez

El declive del Pacífico se extiende desde la base de las montañas volcánicas hasta la orilla del litoral, hasta aproximadamente 150 m de altitud. Esta región forma un llano cóncavo, caracterizado por declives que disminuyen progresivamente, desde alrededor del 22 % en la base de las montañas hasta menos del 2 % donde se une a la región del litoral. Está formada por abanicos aluviales coalescentes compuestos de materiales volcánicos. La división del litoral es una llanura que se inclina hacia la costa con un declive uniforme de aproximadamente 10 metros/kilómetro. No existe un límite definido entre el litoral y el declive del Pacífico ya que es el material de la sección superior ha sido lavado hacia la división inferior.

La costa del Pacífico aparentemente está sufriendo un alzamiento, creyéndose que el área del litoral emergió del mar en una época geológica reciente. El área desagua hacia el océano Pacífico a través de los ríos Nahualate, Tulate y Madre Vieja, siendo el primero el más importante. El sistema de drenaje es estriado y está formado por muchos arroyos relativamente rectos y casi paralelos, que fluyen rápidamente a través de canales angostos y pedregosos, muy raramente encontrándose llanos aluviales. Las fajas de aluvión que existen son angostas y aisladas.

Muchos de los arroyos tienen corrientes continuas con agua para usos domésticos, fuerza, beneficio de café y el regadío.

Los suelos del departamento de Suchitepéquez han sido divididos en 23 unidades que consisten de 21 series de suelo y 2 clases de terreno misceláneo (ver figura 14). Adicionalmente, los suelos han sido divididos en cuatro grupos amplios y en el grupo III que corresponde a la zona de interés, hay tres subgrupos.

El litoral del Pacífico comprende 115 429 Ha, o sea el 45,97 % del área total del departamento. Es una planicie casi llana, siendo el ancho máximo alrededor de 40 km y la elevación del límite interior de cerca de 165 msnm.

Originalmente el área estuvo bajo bosque denso de árboles deciduos como la caoba y el cedro, pero actualmente tiene grandes plantaciones de pastos y gramíneas de aceites esenciales.

Se incluyen en el subgrupo A los suelos Coyolate, Ixtán arcilloso e Ixtán franco limoso. Se caracterizan por ser suelos superficiales de color oscuro y subsuelos arcillosos de color café rojizo.

En el subgrupo B están los suelos Bucul y Champerico. Ocupan depresiones en la planicie y son susceptibles a las inundaciones durante la época lluviosa. En el subgrupo C está los suelos Tiquisate franco arenoso fino y Tiquisate franco. Se han desarrollado sobre los depósitos arenosos, aluviales o marinos y se extienden a lo largo de la planicie costera.

1.7.4. Suelos del departamento de Retalhuleu

La elevación del terreno de este departamento varía desde el nivel del mar hasta alrededor de los 1050 m de altitud, sin embargo, casi las cuatro quintas partes del área se encuentran a altitudes menores de los 150 msnm. Toda el área es drenada hacia el océano Pacífico por medio de ríos que nacen en otros departamentos.

En este departamento están representadas las divisiones fisiográficas del litoral del Pacífico y el declive del Pacífico. El litoral del Pacífico comprende 78,86 % del área total del departamento. Este litoral es una planicie costera extensa de alrededor de 30 km de ancho a lo largo del océano Pacífico. La pendiente es suave y gradual, empezando desde una elevación máxima aproximada de 150 m y llegando hasta el nivel del mar, con una inclinación promedio aproximada del 0,5 %. La mayoría del área consiste de suelos bien drenados. Geológicamente esta región está formada por materiales aluviales que probablemente fueron depositados en el mar.

El declive del Pacífico es una planicie inclinada que se extiende desde las faldas de las montañas volcánicas en los departamentos adyacentes a elevaciones de 1500 msnm hasta el borde del litoral. La inclinación en el límite superior es alrededor del 22 %, disminuyendo gradualmente hasta llegar a ser menos del 2 % en los límites del litoral.

Esta planicie está formada por un sistema de abanicos aluviales coalescentes compuestos principalmente de ceniza volcánica depositada durante varios periodos de erupción. En Retalhuleu no hay montañas volcánicas, siendo la elevación máxima alrededor de 1050 msnm. La pendiente general de la planicie en la parte norte es alrededor del 15 %. Esta región está completamente dividida por ríos cortos y relativamente rectos que corren rápidamente a través de canales o barrancos de laderas inclinadas.

El sistema de drenaje es estriado y casi todos los ríos se unen antes de llegar al litoral, de modo que sólo unos pocos de mayor tamaño llegan al océano.

La superficie del departamento ha sido dividida en 15 unidades de terreno. Estas consisten de 13 series de suelo y 2 clases de terreno misceláneo. Las series han sido divididas en tres grupos amplios (ver figura 15).

Adicionalmente, los suelos han sido divididos en cinco grupos y en el grupo II que corresponde a la zona de interés, hay tres subgrupos. La planicie costera en este departamento, como se mencionó anteriormente, constituye el 80 % del terreno. La mayor parte de esta sección se usa para pastoreo, aunque también hay grandes plantaciones de gramíneas de aceites esenciales.

En el subgrupo A están los Ixtán arcilloso e Ixtán limoso franco, que se caracterizan por los suelos superficiales de color oscuro y por los subsuelos arcillosos café rojizo. El subgrupo B incluye los Bucul y Champerico. Estos ocupan depresiones en la planicie y pueden inundarse durante la época lluviosa.

Durante esta época deben construirse drenajes antes de poder cultivarlo y durante la sequía el regadío es necesario antes de proceder a usarlos. Una gran parte está aún bajo bosques, pero se han habilitado otros sitios para pastos o para el cultivo del maíz.

En el subgrupo C se incluye solamente los suelos Tiquisate. Se encuentran en la parte oeste del departamento en asociación con los suelos Bucul y comprenden solamente el 0,12 % del área total del departamento. Se han desarrollado sobre depósitos marinos o aluviales, arenosos de color oscuro.

1.7.5. Suelos del departamento de Escuintla

La planicie costera de este departamento es un llano casi plano limitado al sur por el océano Pacífico. La elevación máxima es de 150 msnm y el ancho promedio es de aproximadamente 30 km. El declive es suave y constante, alrededor de 0,5 %.

Esta planicie costera está compuesta de sedimentos depositados en una parte del mar que era poco profunda. El seccionamiento no es completo, la mayoría de las vías de desagüe son los riachuelos que atraviesan el área con muy pocas ramificaciones.

La mayor parte, casi el 70 % del área de la región, consiste de suelos arenosos bien drenados y aproximadamente el 25 % de suelos mal drenados de textura pesada.

El declive del Pacífico es una planicie inclinada que consiste principalmente de un sistema de abanicos aluviales coalescentes formados durante los periodos de actividad volcánica. En muchos lugares, el material es lava lodosa o lahar, pero sobre gran parte del área, la superficie está cubierta de ceniza volcánica. El declive varía desde alrededor del 22 % al pie de los conos volcánicos hasta menos del 2 % en las límites inferiores.

El sistema de drenaje es estriado y los ríos corren casi paralelos, uniéndose cerca del margen inferior, formando algunos de los ríos de mayor tamaño que atraviesan el litoral. La mayor parte corren por barrancos angostos y tortuosos, no existiendo áreas de aluviales de mayor tamaño.

Un gran número de los ríos tienen corriente de agua continua y son apropiados para el desarrollo de la fuerza hidroeléctrica. Los suelos varían ampliamente y en muchos lugares son muy pedregosos.

Los suelos del departamento de Escuintla han sido divididos en 32 unidades que consisten de 28 series de suelo y 4 clases de terreno misceláneo. Los suelos han sido divididos en tres grupos amplios (ver figura 16) y en el grupo II, se distinguen cuatro subgrupos.

El material madre del suelo, con la probable excepción de los suelos Coyolate y Papaturro, es probablemente un material aluvial reciente que fue depositado en partes poco profundas del mar. La altitud máxima es alrededor de los 160 metros.

Esta faja comprende casi dos tercios del área del departamento y un 66 % consiste de suelos bien drenados que necesitan solamente ser desmontados y preparados para el cultivo con maquinaria.

Para obtener la producción óptima se debería proveer regadío durante la época seca, es decir, de diciembre a mayo. Los cultivos adaptados a la región, tales como el banano, caña de azúcar, gramíneas de aceites esenciales, algodón y otras fibras, al igual que el maíz, pueden producirse en grandes cantidades.

Cerca de una cuarta parte del área tiene suelos que necesitan ser drenados para poder ser preparados para el cultivo. El subgrupo A se incluye solamente los suelos Coyolate. Estos representan una superficie de terreno antigua que no fue cubierta por los depósitos de ceniza recientes. Al contrario de muchos de los otros suelos de la región, estos suelos son de reacción ácida. El subgrupo B, incluye los suelos Achiguate, Paxinamá, Tiquisate franco y Tiquisate franco arenoso fino. Son suelos extensos, comprendiendo un 44,5 % del área del departamento.

Los suelos Bucul y Tecojate comprenden el subgrupo C. Ocupan depresiones pequeñas y casi todas las áreas están cerca de la costa, pero algunas se extienden hacia adentro y generalmente se encuentran entre los ríos grandes. Comprenden alrededor del 15% del área del departamento. El subgrupo D incluye los suelos Palpaturro. Están desarrollados sobre una superficie antigua de terreno y no son productivos.

1.7.6. Suelos del departamento de Santa Rosa

La planicie costera del Pacífico en este departamento, es una llanura casi plana, suavemente inclinada que se extiende desde las faldas del declive del Pacífico hasta la costa. El ancho varía desde 17 km en la parte central hasta 22 km en la parte este.

La elevación máxima es de aproximadamente 150 msnm y el desnivel desde el límite interior hasta la costa es constante y parejo. Geológicamente estos materiales fueron depositados en un mar relativamente poco profundo. El seccionamiento es incompleto y la mayor parte del área, aproximadamente 54 % tiene suelos de pobre desagüe.

La división fisiográfica del declive del Pacífico es generalmente una planicie inclinada que consiste principalmente de un sistema de abanicos aluviales coalescentes formados durante los periodos de actividad volcánica intensa. En Santa Rosa son más comunes las formaciones de lava volcánica con pendientes inclinadas y pedregosas, con numerosos afloramientos de roca.

Los suelos del departamento de Santa Rosa han sido divididos en 26 unidades que consisten de 23 series de suelo y 3 clases de terreno misceláneo.

Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos amplios (ver figura 17) y en el grupo III, se distinguen cuatro subgrupos.

El litoral del Pacífico es una llanura casi plana, bordeada por el océano Pacífico. La altitud máxima es de alrededor de 165 msnm y la declive hasta el mar es uniforme. La mayor parte de esta región en Santa Rosa consiste de suelos mal drenados e incluye áreas más extensas de suelos poco productivos que otras partes de la planicie costera del Pacífico.

En el subgrupo A están solamente los suelos Toltecate. Se encuentran en el margen interior del litoral y se usan extensamente para la producción del maíz y el algodón con áreas aún mayores que están en pastoreo.

Pueden producir con éxito la mayoría de los cultivos alimenticios y textiles que se adaptan a la región, y con regadío durante el verano, podrán obtenerse grandes cosechas de caña de azúcar, maíz y otros cultivos.

En el subgrupo B están solamente los suelos Tiquisate. Son porosos y son fácilmente penetrados por las raíces, el agua y el aire, pero necesitan amplia humedad, especialmente en la época seca.

Con el regadío suficiente, pueden producir caña de azúcar, bananos y casi todas las cosechas adaptadas a la región. Son muy arenosos para el cultivo del arroz, pero son extensamente usados para la producción del maíz y el algodón. En el subgrupo C están los suelos Bucul y Tecojate. Ocupan terreno casi plano o depresiones leves. Son extensos a lo largo de la costa y en la parte oeste de la planicie costera del Pacífico. Están sujetos a las inundaciones durante la época de lluvia, por lo que se necesita un sistema adecuado de drenaje para adaptarlos a los cultivos continuados. Gran parte del área está forestada y extensiones considerables han sido desmontadas para el pastoreo. En el subgrupo D, se encuentran los suelos Palpaturro. Estos aparentemente se han desarrollado sobre una superficie antigua de terreno. No son productivos y necesitarían prácticas agronómicas especiales para ponerlos a producir económicamente. Las prácticas necesarias serán determinadas por medio de la experimentación, debe incluirse el drenaje, la incorporación de materia orgánica y las araduras especiales del subsuelo.

1.7.7. Suelos del departamento de Jutiapa

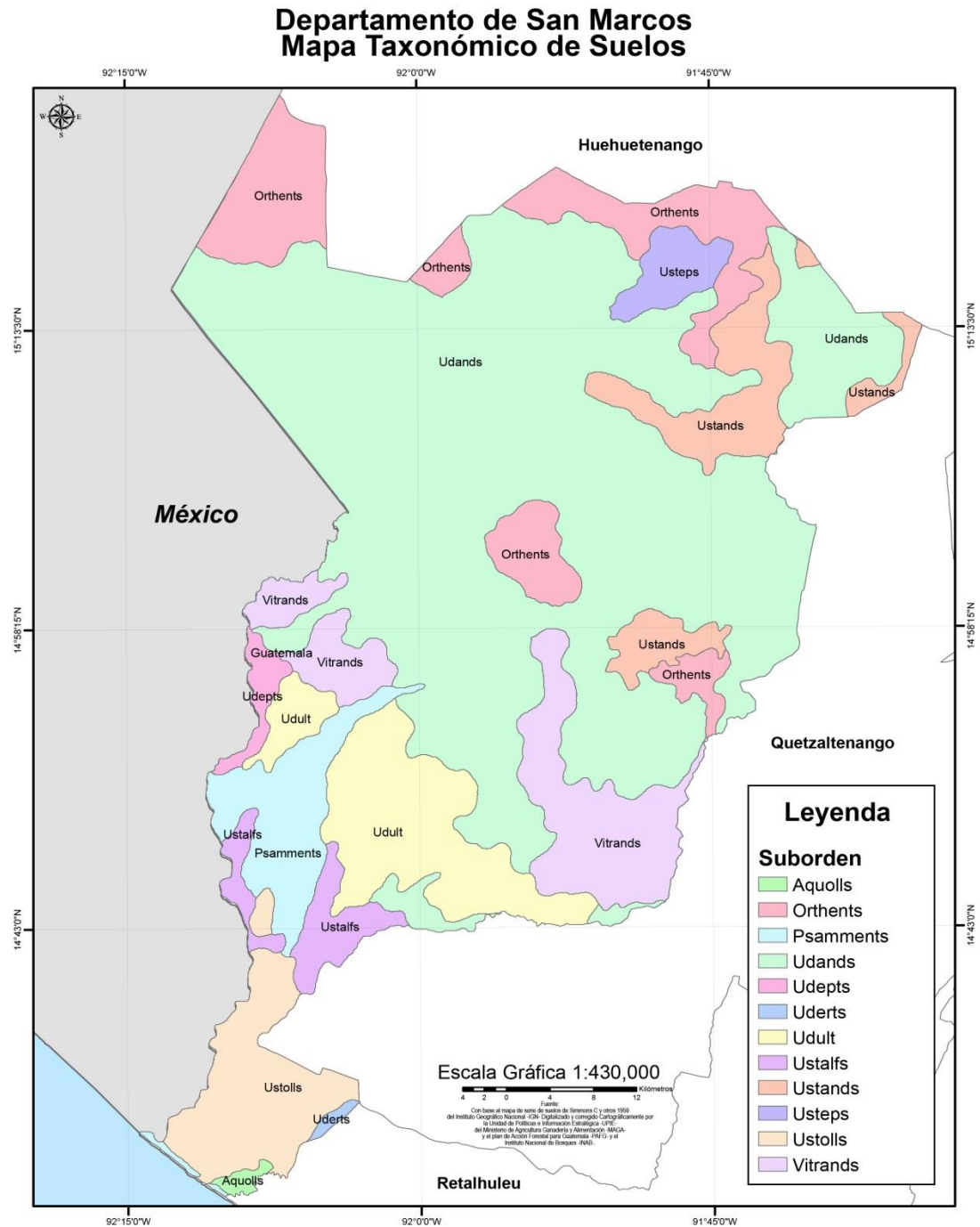
En el área de este departamento están representadas las divisiones fisiográficas de la altiplanicie central y la del declive del Pacífico, ya que la región de la planicie costera del Pacífico es muy angosta, de sólo 10 km de ancho.

La elevación de la altiplanicie disminuye hasta ser sólo aproximadamente 900 msnm. El seccionamiento es relativamente completo y no existen grandes áreas de suelos mal drenados, excepto en la planicie costera propiamente dicha.

Los suelos del departamento de Jutiapa han sido divididos en 22 unidades que consisten de 19 series de suelo y 3 clases de terreno misceláneo. Las series han sido clasificadas en tres grupos amplios (ver figura 18) donde en el grupo II correspondiente a la zona en estudio se distinguen dos subgrupos.

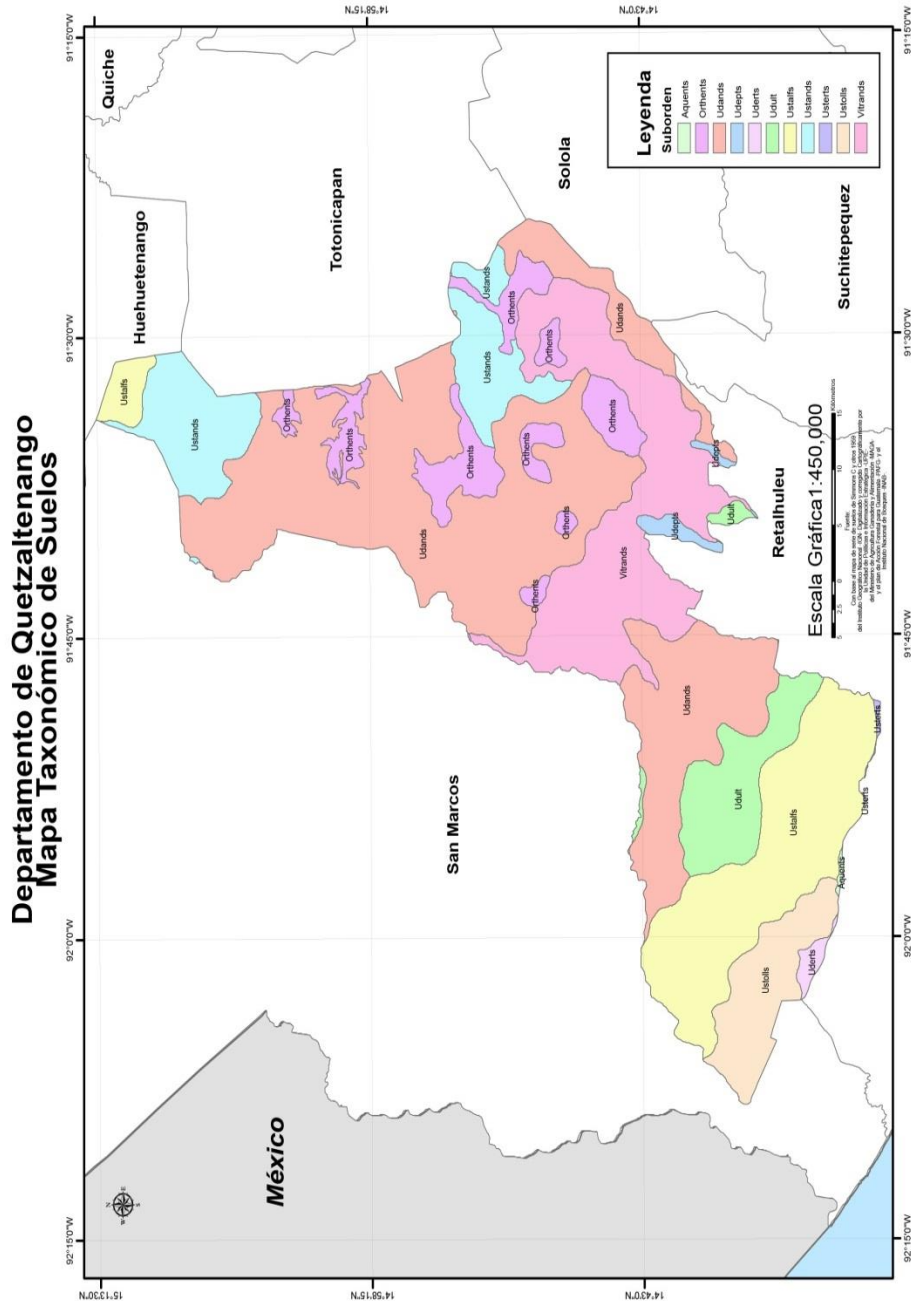
La planicie costera del Pacífico comprende solo un área pequeña del 5,4 % del área total del departamento. En la mayoría son suelos fértiles, productivos y fáciles de manejar; una pequeña extensión es de suelos mal drenados. Entre los suelos considerados bien drenados, se incluye solamente los suelos de Tiquisate. Estos son suelos de primera clase y ocupan terreno casi plano, están libres de piedras y se manejan fácilmente. Los suelos mal drenados del subgrupo B incluyen los suelos de Palpaturro y Tecojate. No son extensos y tampoco son productivos.

Figura 12. Distribución de las unidades de suelo, departamento de San Marcos



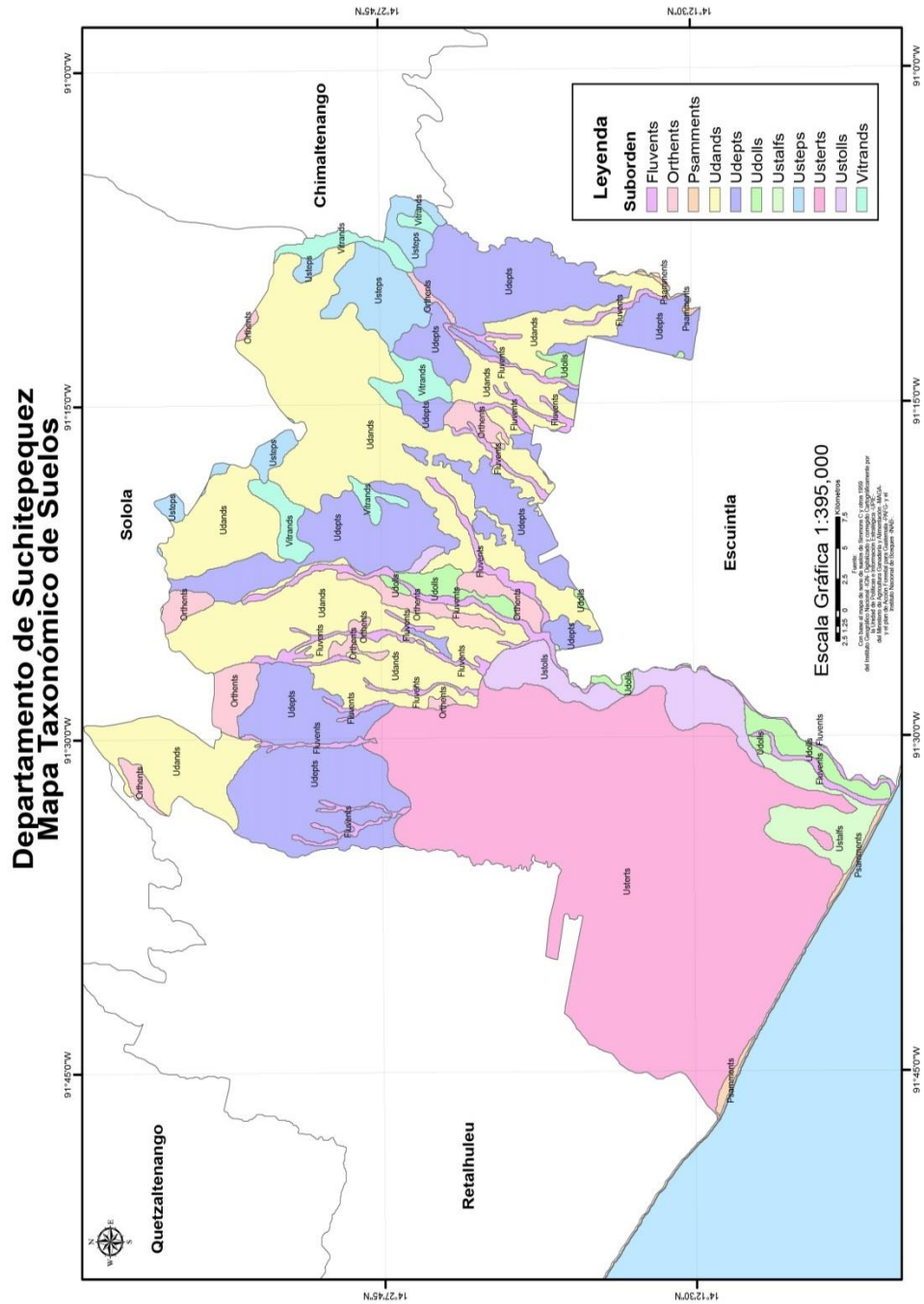
Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

Figura 13. Distribución de las unidades de suelo, departamento de Quetzaltenango



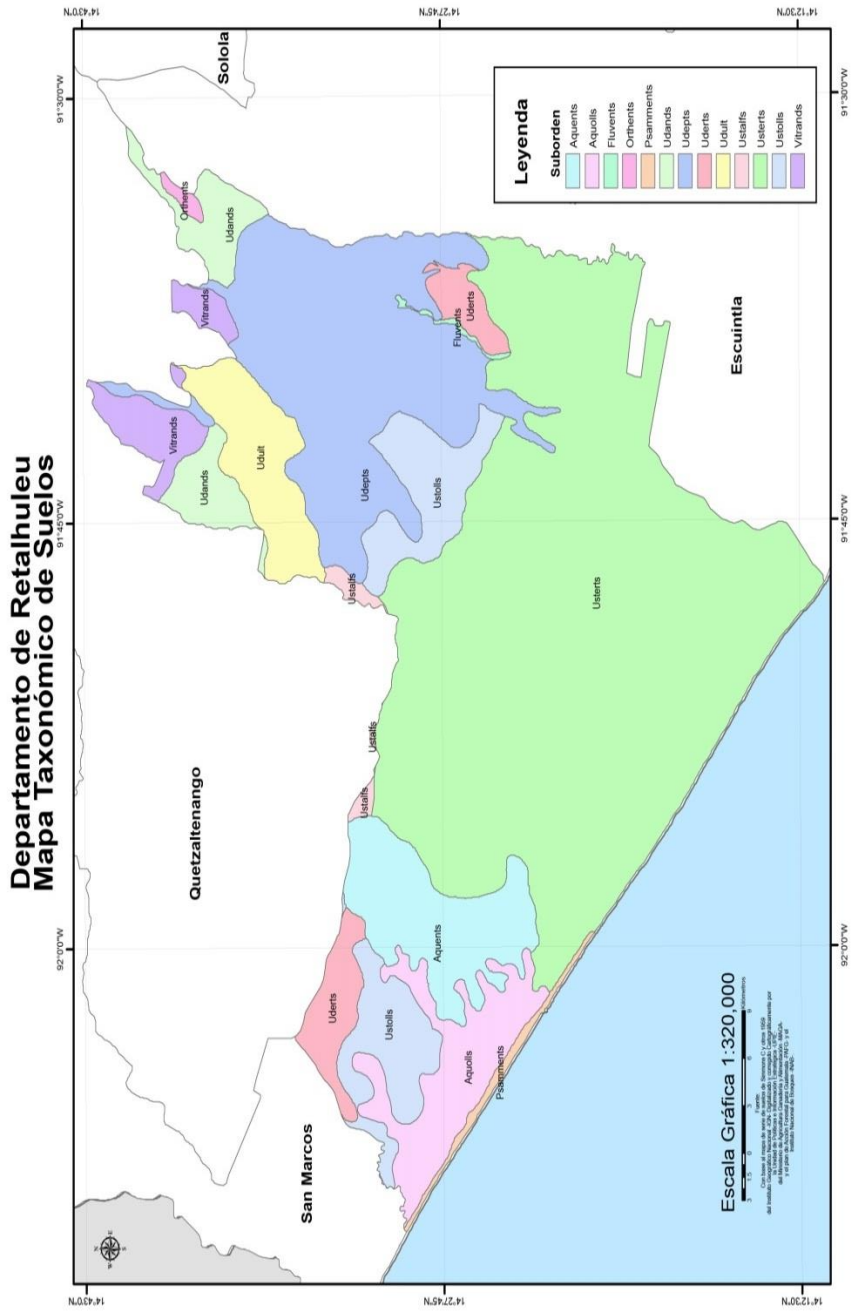
Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

Figura 14. Distribución de las unidades de suelo, departamento de Suchitepéquez



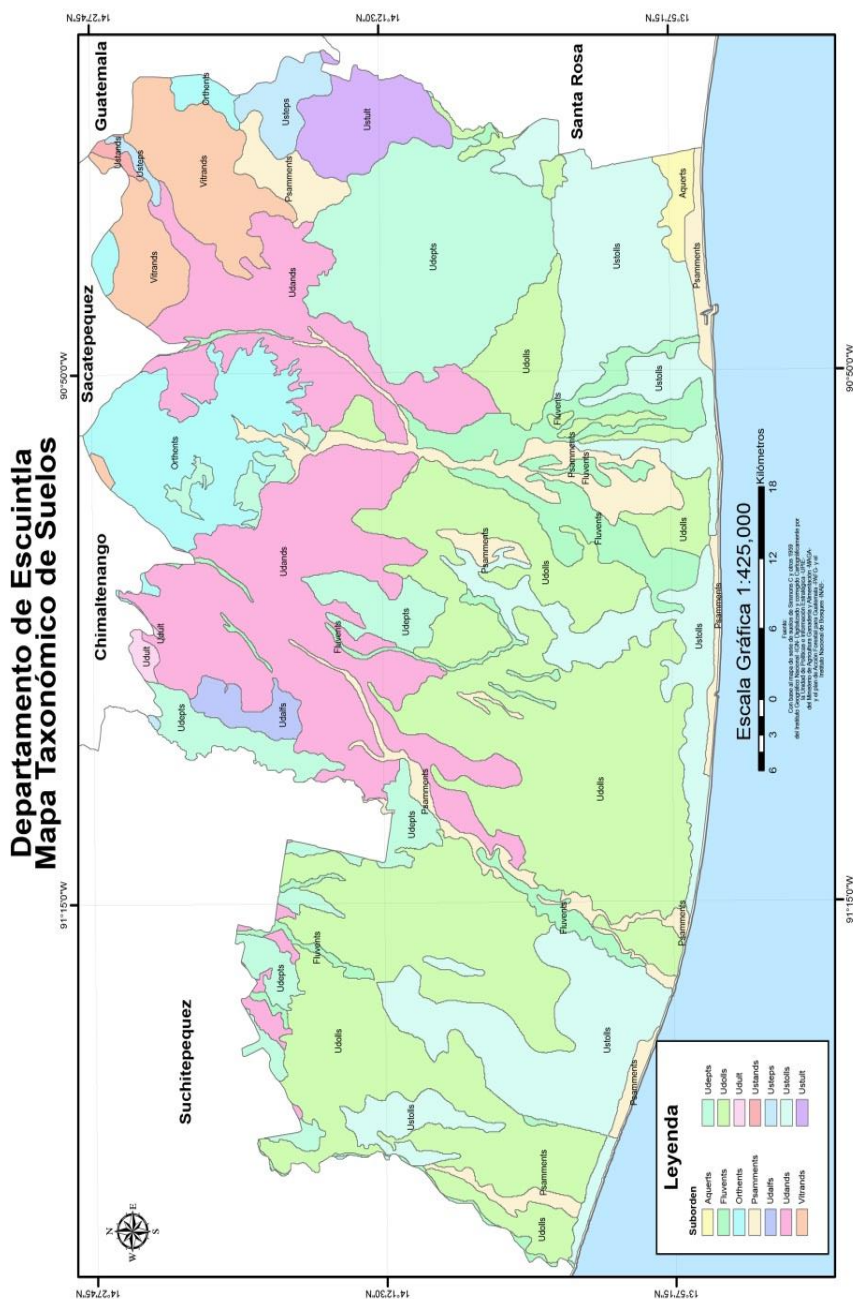
Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

Figura 15. **Distribución de las unidades de suelo, departamento de Retalhuleu**



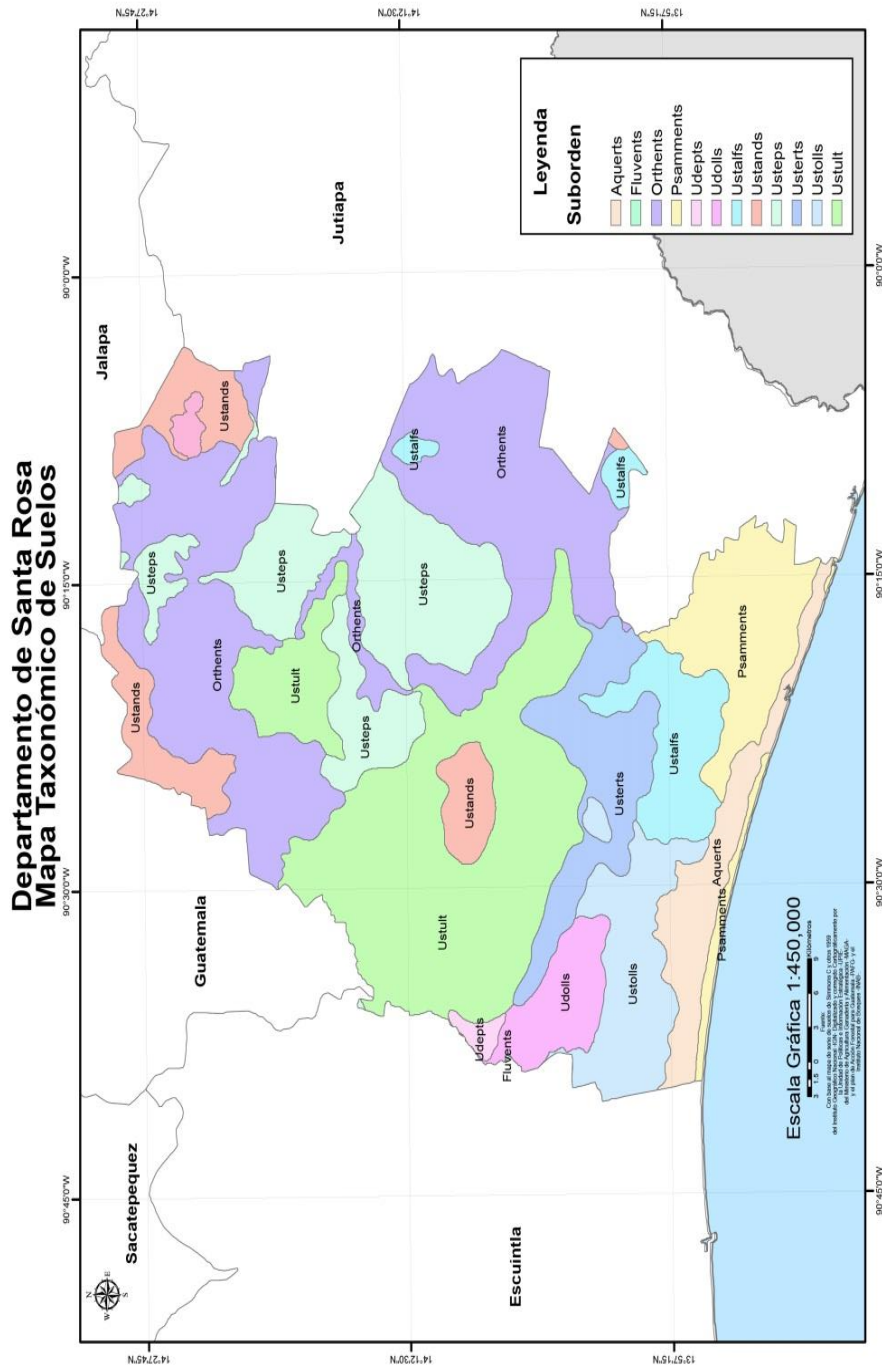
Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

Figura 16. Distribución de las unidades de suelo, departamento de Escuintla



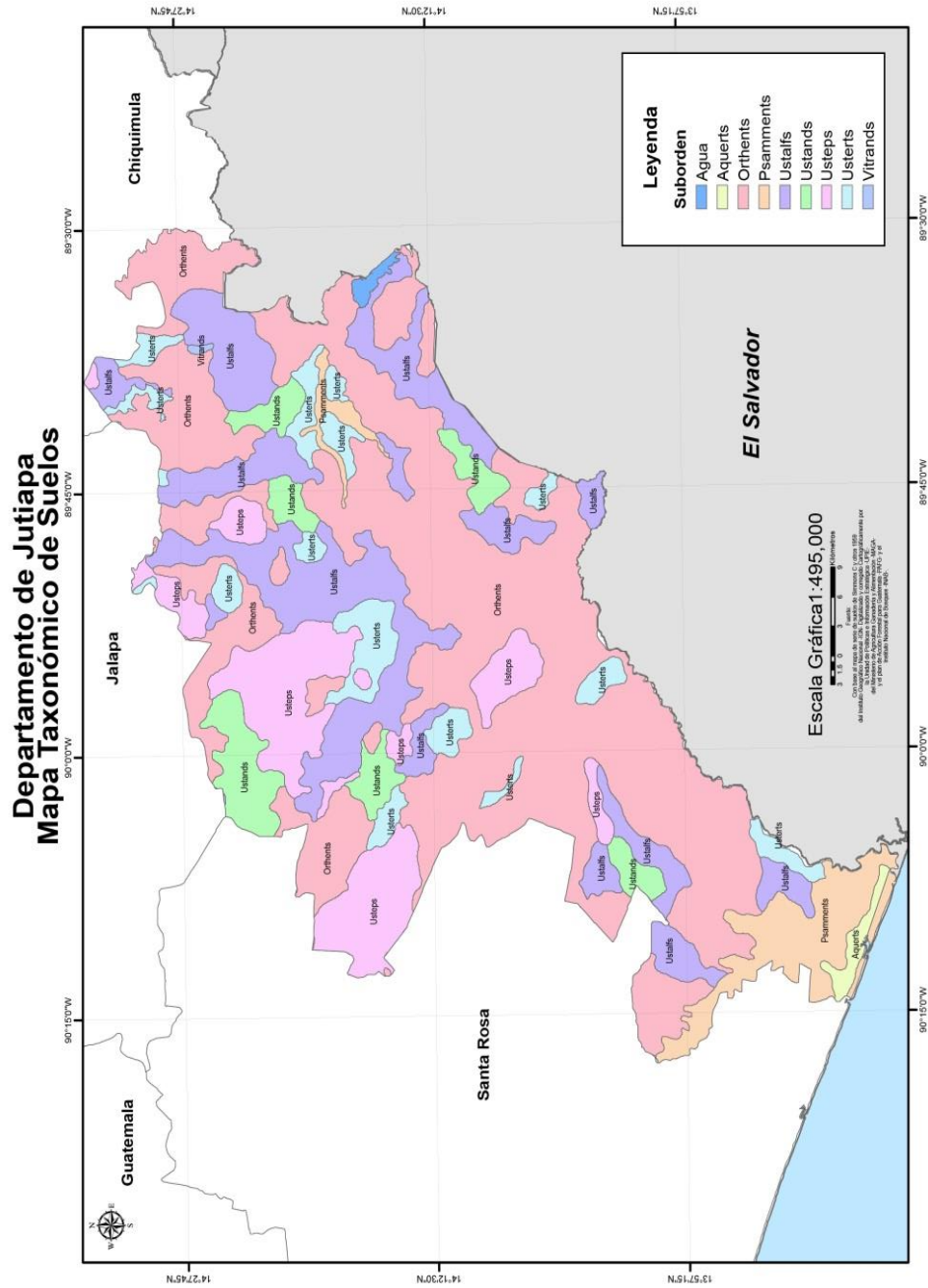
Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

Figura 17. Distribución de las unidades de suelo, departamento de Santa Rosa



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

Figura 18. Distribución de las unidades de suelo, departamento de Jutiapa



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

2. CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS EN LA ZONA DE LA PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO DE GUATEMALA

2.1. División política

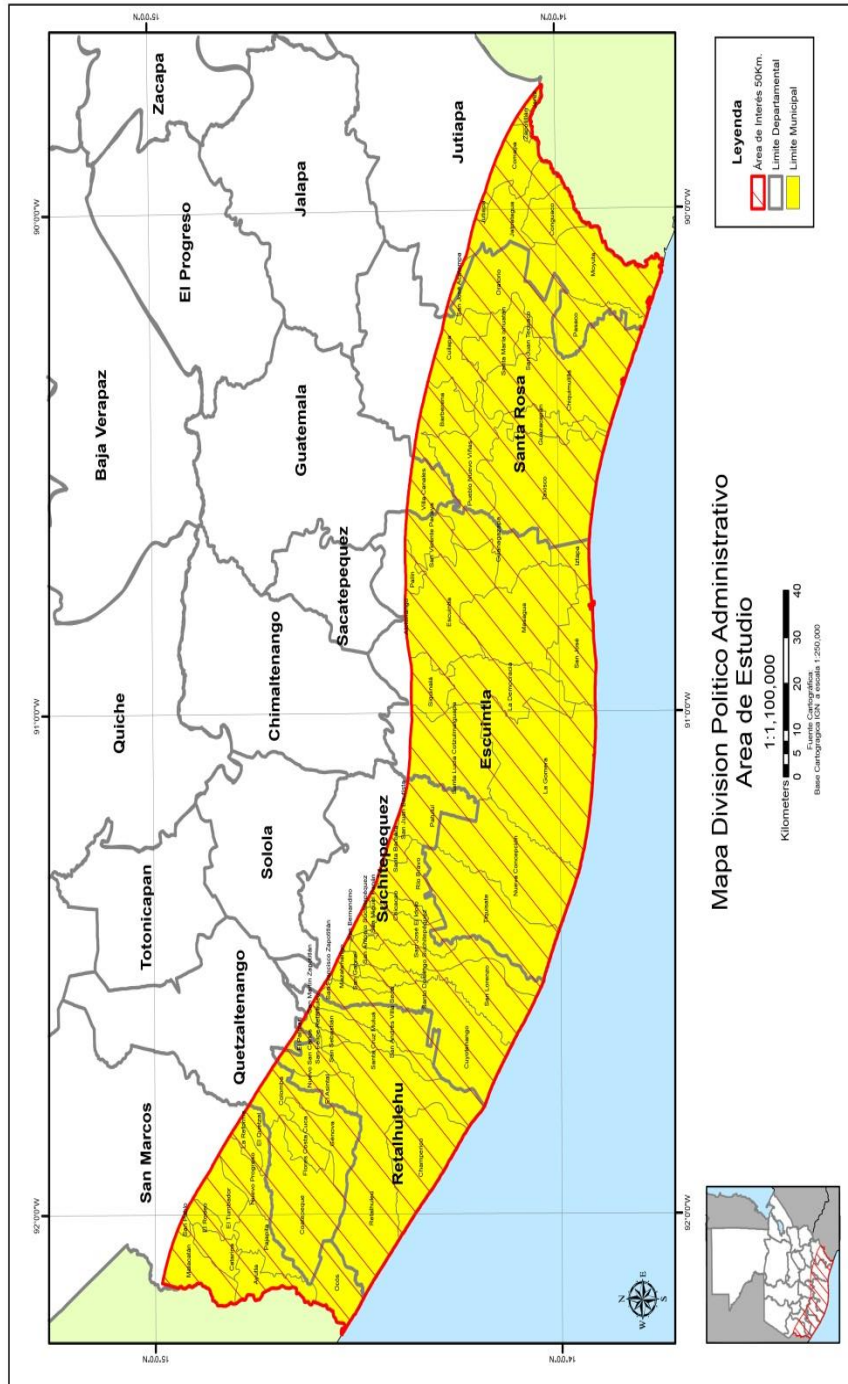
La planicie costera del Pacífico de Guatemala comprende parte de 7 departamentos, dentro de los cuales tienen asiento 59 municipios, importantes conglomerados humanos, mostrados en la tabla VI.

2.2. Aspectos demográficos

Guatemala es el país centroamericano más grande, tanto en términos demográficos como económicos, de acuerdo con las cifras oficiales del último censo de población y habitación, realizado por el Instituto Nacional de Estadística, INE en el 2002. La población del país, según las proyecciones realizadas, en el 2012 es de 15 073 375 habitantes, con una tasa de crecimiento poblacional cercana al 2,8 % anual. La población de estos 59 municipios que comprenden la planicie costera del Pacífico de Guatemala es de 3001 154 habitantes, la cual comprende el 19,91 % de la población del país.

Las cifras indican que el 40 % de la población del país es menor de 15 años y que el 45 % de la población para ese año era analfabeta.

Figura 19. División política dentro de la franja de la planicie costera del Pacífico de Guatemala



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

Tabla VI. **Centros poblados de mayor importancia dentro de la zona en estudio**

Departamento	Municipio
San Marcos	Ocós, Sipacate, Malacatán, Catarina, El Quetzal, Pajapita, San Pablo, El Tumbador, El Rodeo, La Reforma, La Blanca.
Quetzaltenango	Coatepeque, Colomba, Flores Costa Cuca, Génova.
Retalhuleu	San Andrés Villa Seca, Champerico, Nuevo San Carlos, El Asintal, San Martín Zapotitlán, Santa Cruz Muluá, San Sebastián, Retalhuleu.
Suchitepéquez	Santo Domingo Suchitepéquez, Mazatenango, Cuyotenango, San José El Ídolo, San Miguel Panán, San Gabriel, San Lorenzo, Río Bravo, Patulul, San Juan Bautista, Santa Bárbara.
Escuintla	Pueblo Nuevo Tiquisate, Nueva Concepción, Santa Lucía Cotzumalguapa, Siquinalá, La Democracia, La Gomera, Escuintla, Masagua, Guanagazapa, San José, Iztapa, San Vicente Pacaya.
Santa Rosa	Barberena, Cuilapa, Oratorio, Santa María Ixhuatán, San Juan Texcuaco, Guazacapán, Chiquimulilla, Taxisco, Pueblo Nuevo Viñas.
Jutiapa	El Progreso, Jalpatagua, Moyuta, Comapa, Pasaco, Conguaco.

Fuente: elaboración propia.

Étnicamente el país registra un 60 % de población ladina y un 40 % de población indígena. A lo largo de la planicie, la población es étnicamente ladina y el idioma hablado es el español.

La población económicamente activa en el país con más de 10 años de edad representa el 36 % del total, lo que implica una alta tasa de dependencia, muy asociada al predominio de la población joven. Para la costa sur el porcentaje es de aproximadamente el 30 % de la población total y desde el punto de vista de los principales sectores de actividad económica que contribuyeron a la ocupación fueron la agricultura, comercio e industria manufacturera.

La tasa bruta de mortalidad del país es del 8 % y las principales causas de enfermedad reportadas por los servicios de salud para la zona de la planicie costera del Pacífico son: infecciones respiratorias agudas, el síndrome diarreico agudo, desnutrición y paludismo. Entre las principales causas de defunción se encuentran las enfermedades infecciosas intestinales, neumonía y el sarampión.

En cuanto a la disponibilidad de servicios en la planicie costera del Pacífico, el servicio de agua domiciliar solo cubre aproximadamente un 50 % de los hogares urbanos y 17 % de los hogares rurales. El resto se abastece de chorros públicos, pozos y fuentes naturales. El servicio de electricidad tiene una cobertura del 70% de las viviendas del área urbana y 17 % en el área rural. El servicio de drenajes lo posee solo un 15 % de las viviendas urbanas y el resto hace uso de pozos ciegos o letrinas.

2.3. Aspectos económicos

El producto interno bruto (PIB) en términos corrientes para el 2002 fue de 72 975 millones de quetzales y de 12 983 millones de dólares americanos.

Otros de los indicadores económicos de importancia, recogidos del mismo censo, son:

- El PIB está creciendo a una tasa de 2,5 %
- La inflación anual fue de 11,6 %
- El cambio del quetzal con respecto al dólar es 7,80 en promedio
- La base monetaria fue de Q.7 983 millones, con crecimiento del 23,4 %
- El crecimiento de ahorro fue de 10,6 %

2.4. Sector agropecuario

El sector agropecuario continúa siendo el pilar fundamental de la economía guatemalteca con una contribución al PIB significativa, emplea un alto porcentaje de la fuerza laboral y genera alrededor de los dos tercios de las exportaciones del país. Las exportaciones agropecuarias provienen principalmente de las fincas ubicadas a lo largo de la planicie costera del Pacífico, que dado la calidad de los suelos, ha llegado a ser una de las riquezas más grandes del país. Los cinco departamentos que abarcan la planicie costera del Pacífico comprenden 18 714 km² lo que constituye un 17,2 % del territorio nacional.

Aunque, se estima que aproximadamente la mitad de estas tierras son consideradas tierras agrícolas de primera, la territorio es plano en un 80 % y solamente hacia el norte de los departamentos se encuentran algunas elevaciones. Los principales productos han sido tradicionalmente el café, algodón, banano, azúcar y cardamomo y otros productos como maíz, frijol, yuca, legumbres, carnes, frutas tropicales (guanaba, piña, naranja, coco, mango, papaya, limón, chico, zapote, jocote marañón), hule, cacao y otras que han venido ganando participación en el mercado externo.

2.5. Producción pecuaria

La ganadería se atiende en gran escala, pues hay grandes haciendas, dedicadas a la crianza, esquilmo y engorde de ganado bovino. La mayoría poseen hatos de razas finas de altos rendimientos, tanto de leche como de carne, cuya producción en gran parte se destina al mercado de exportación. Las existencias de ganado bovino se sitúan alrededor de unos dos millones de cabezas, de acuerdo con las cifras presentadas en el IV Censo Nacional Agropecuario realizado en el 2004.

El 13 % del ganado está localizado en el departamento de Escuintla, seguido por Jutiapa con el 7 %. Se atiende también crianza de equinos tanto de silla como de pista con reproductores pura sangre de diversas razas. La avicultura ha ido tomando auge con la producción de carne de gallina y huevos para el consumo interno, así como la ganadería porcina, cuya explotación resulta fundamentalmente de tipo doméstica sin mayor manejo técnico.

La pesca, piscicultura y la producción de sal constituyen finalmente un componente importante a lo largo de toda la planicie costera, ya que es una zona apta para este tipo de actividades y la producción resulta importante para el consumo a nivel nacional.

En la pesca, el objeto principal de atención ha sido el camarón, cuya pesca constituye una importante actividad comercial desde la década del 60, aunque también la riqueza de atún es importante pero no ha sido bien aprovechada. Otras especies de la región son el bagre, corvina, guabina, lenguado, róbalo, pez sierra y tiburón.

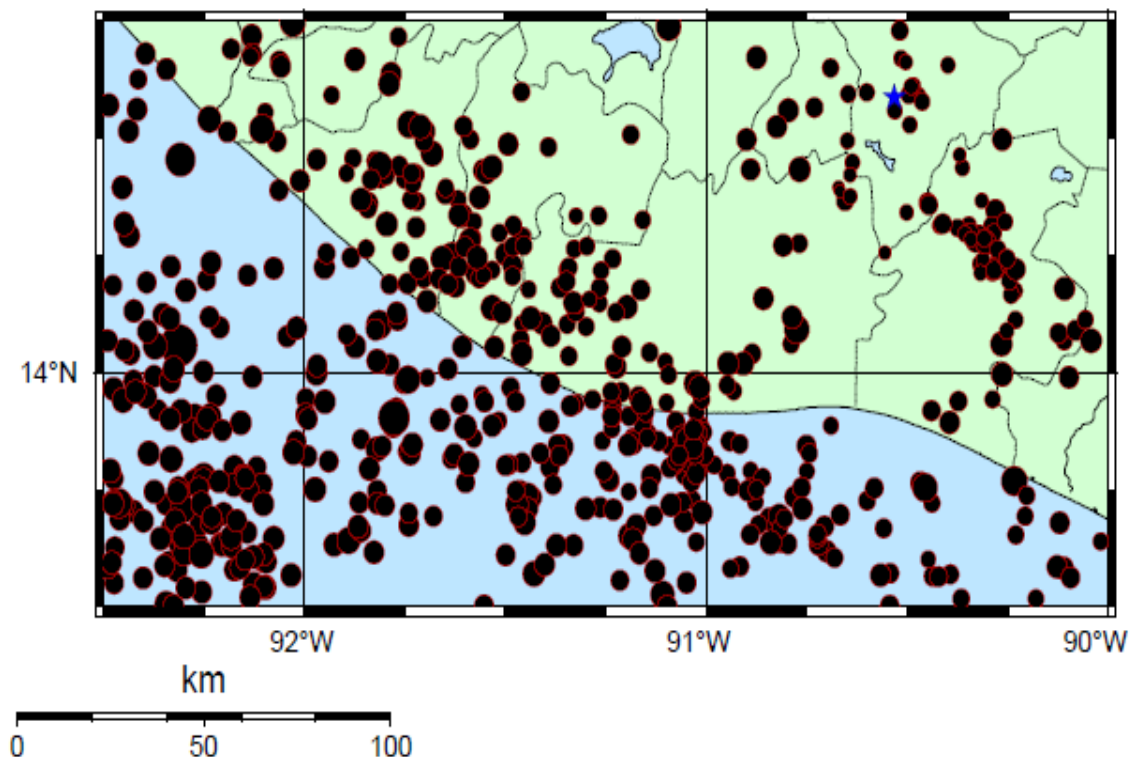
2.6. Desastres naturales

La recurrencia de fenómenos naturales y algunos factores sociales como densidad de población y actividad económica, determinan la vulnerabilidad de un área dada.

La planicie costera del Pacífico es una región muy propensa a sismos por ubicarse muy cerca de la zona de subducción, en la cual la placa de Cocos se subduce en la placa del Caribe, sobre la cual están ubicados una gran cantidad de poblados (ver tabla VI). La mayoría de los epicentros de los sismos que ocurren a nivel nacional están localizados frente a las costas de los departamentos ubicados sobre la planicie costera del Pacífico de Guatemala (ver figura 20).

La posición intertropical de la región la hace también vulnerable a huracanes e inundaciones, siendo estas últimas uno de los principales problemas que surgen en el área a consecuencia de las lluvias copiosas que ocurren cada año y que causan el desbordamiento de todos los ríos que desembocan en el océano Pacífico, teniendo como consecuencia la pérdida de bienes, cosechas (por las correntadas) y de vidas, principalmente por el brote de enfermedades como el paludismo (por el estancamientos de las aguas).

Figura 20. **Sismicidad registrada en la planicie costera de enero a diciembre 2012**



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Consulta: febrero de 2013.

2.7 Vivienda

La vivienda es una edificación cuya principal función es ofrecer refugio y habitación a las personas, protegiéndolas de las inclemencias climáticas y de otras amenazas.

El Reglamento de Construcción vigente, clasifica a las viviendas de acuerdo al tipo de construcción:

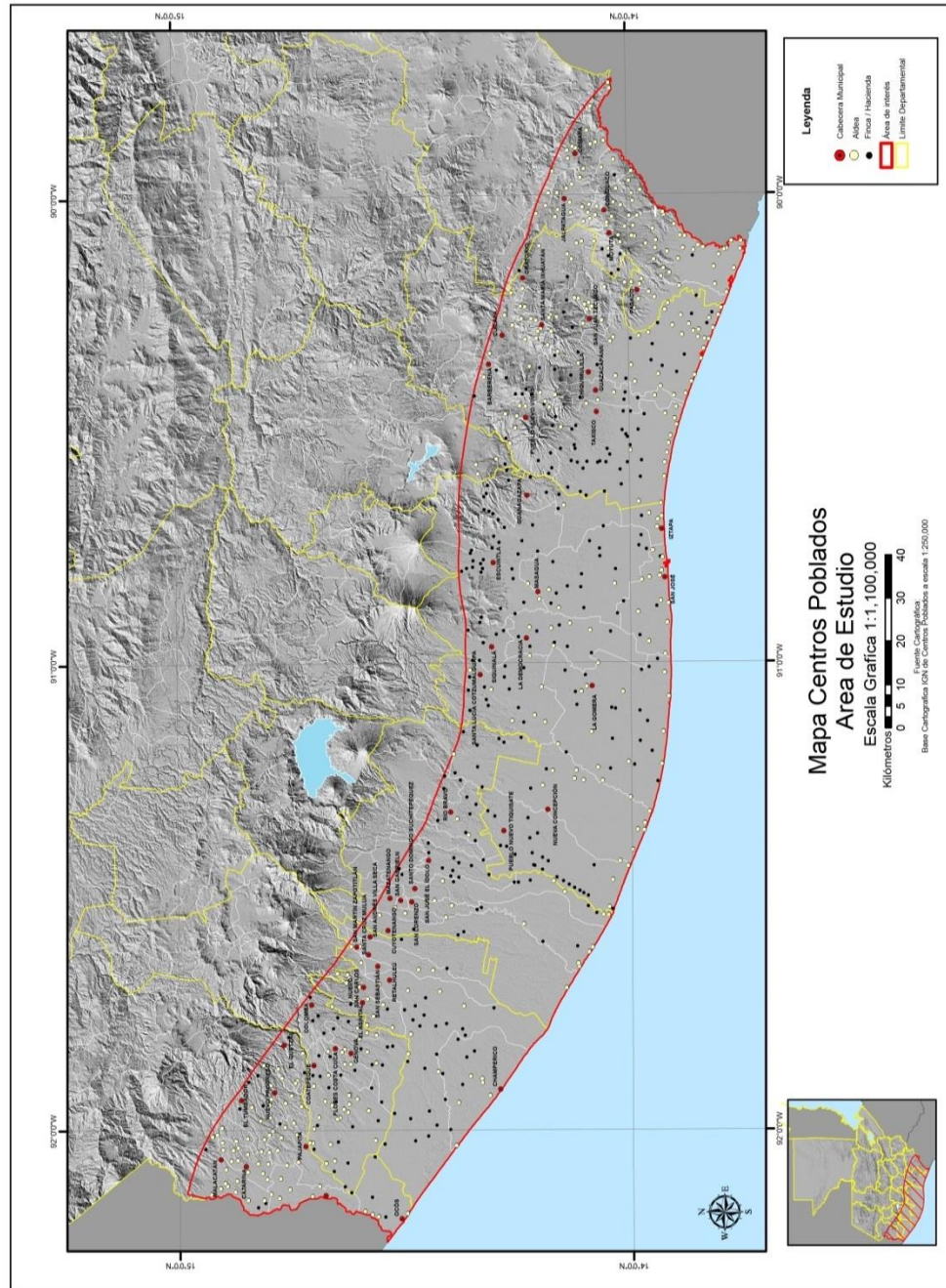
- Edificaciones tipo E: obras exclusivamente de adobe, de una sola planta, con techo de teja o lámina.
- Edificaciones tipo D: obras de mixto u otros materiales, de una sola planta, con techo de teja o lámina.
- Edificaciones tipo C: obras de una y hasta dos plantas, con o sin sótano, cuya construcción incluya losas, voladizos, vigas, marcos, columnas aisladas, de concreto armado, acero o cualquier material de construcción.
- Edificaciones tipo B: obras de tres plantas en adelante, con o sin sótano.
- Edificaciones tipo A: obras para uso industrial, comercial, talleres, etc.

En la zona de estudio, predominan las edificaciones tipo E, D y C.

En las zonas rurales, las de adobe son las más comunes que se pueden encontrar, pero en aquellas donde el crecimiento económico y desarrollo urbano se ha incrementado, ya se lleva a cabo una transición hacia viviendas tipo D y C paulatinamente.

En las cabeceras municipales principalmente y las ciudades más importantes de cada departamento, casi no se encuentran viviendas de adobe, a excepción de aquellas muy antiguas. Gran porcentaje de los asentamientos se encuentran contruidos con block, ladrillo, concreto armado, etc.

Figura 21. Centros poblados a lo largo de la planicie costera del Pacífico de Guatemala



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

3. LICUEFACCIÓN

Los desastres más fuertes en edificios e infraestructura durante un terremoto se deben al fenómeno de la licuefacción, el que consiste, en palabras sencillas, cambiar de un material firme a viscoso semilíquido. La licuefacción es generalmente un fenómeno de suelos de arenas finas a medias sometidos a cargas cíclicas. No se ha observado en gravas y es difícil que se desarrolle en arenas finas limosas o arenas medianas a gruesas.

Las cargas dinámicas que actúan sobre cimentaciones y estructuras de suelo pueden originarse por terremotos, explosiones de bombas, operaciones de maquinarias y martillos; operaciones de construcción (hincado de pilotes), explosiones en canteras, tráfico intenso (incluyendo aterrizaje de aviones), viento y también la carga debido a la acción de las olas en el agua, por mencionar algunas. La naturaleza de cada una de estas cargas es bastante diferente una de otra, siendo los terremotos los que constituyen la fuente más importante de cargas dinámicas sobre estructuras y cimentaciones.

La licuación ocurre en suelos saturados, esto es, suelos en los cuales los espacios entre las partículas individuales están completamente llenos de agua. Esta agua ejerce una presión sobre las partículas de suelo lo cual influencia la forma como las partículas por sí mismas son presionadas juntas. Antes de un terremoto, la presión de agua es relativamente baja. Sin embargo, el movimiento sísmico puede causar que la presión de agua se incremente al punto donde las partículas de suelo puedan fácilmente moverse una con respecto a la otra.

3.1. Definición del fenómeno de licuefacción

Estado del suelo causado por una acumulación de presiones de poro en una carga cíclica o dinámica hasta que la presión efectiva sea cero. Tal estado del suelo da como resultado el fenómeno de la licuefacción, estado en el que el suelo pierde la resistencia al corte.

Transformación de un material granular de un estado sólido a un estado licuado como consecuencia del incremento de la presión de agua de poros.

3.2. Descripción del fenómeno de licuefacción

En este estudio se quiere enfatizar que la causa más dramática de daños a edificaciones y obras civiles durante un terremoto es el fenómeno licuación, el cual, como se mencionó en los apartados anteriores, es un proceso en el cual el suelo cambia de un material firme a un material viscoso semilíquido y bajo condiciones similares a una arena movediza. La licuación ocurre cuando suelos arenosos son sometidos a vibración, por lo tanto, cuando un estrato de suelo se licúa y empieza a fluir por la acción del terremoto, este no es capaz de soportar el peso de cualquier suelo o estructura encima de él, debido a esto, es posible que ocurran una serie de efectos, algunos catastróficos, como deslizamientos, flujos, hundimiento o inclinación de edificaciones, volcanes de arena, asentamientos diferenciales, etc., como ha quedado evidenciado en numerosos terremotos ocurridos en diferentes partes del mundo.

Generalmente, es en determinados suelos de naturaleza contractiva, es decir, con tendencia a la disminución de volumen durante el corte, donde la ocurrencia de un terremoto severo puede producir el incremento gradual de las presiones de poro, reduciendo la resistencia del suelo y la rigidez, llevándose a cabo el fenómeno de licuefacción.

Las características principales, de manera general, de este fenómeno son:

- El equilibrio estático es roto por la aplicación de acciones estáticas o dinámicas, en suelos con una reducida resistencia residual.
- Las acciones externas derivan en un proceso de crecimiento de las presiones de poros, sin posibilidad de disipación rápida en función del tiempo de carga.
- La resistencia residual es la existente en el suelo licuado.

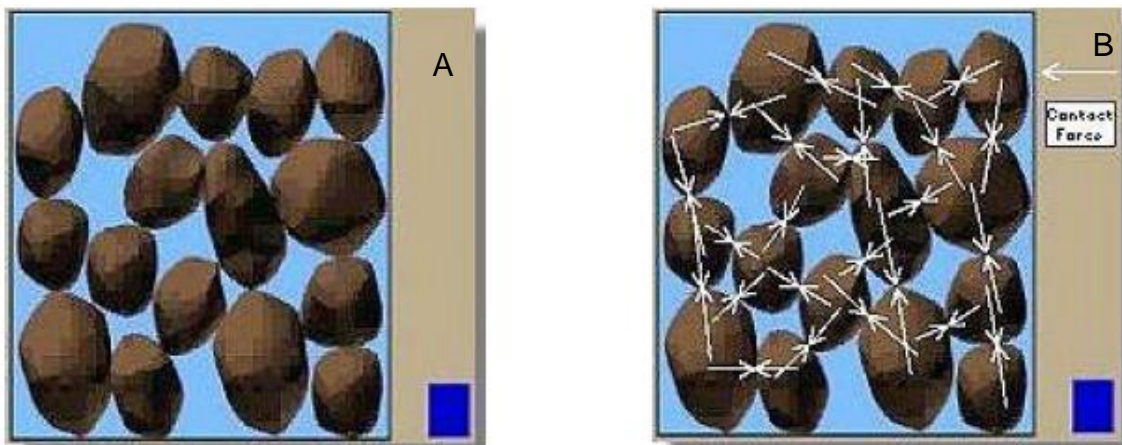
Algunas de las acciones desencadenantes de este fenómeno son:

- Estáticas: construcciones o excavaciones
- Dinámicas: sismos, explosiones, pilotajes, etc

Para comprender el fenómeno de licuación es importante reconocer las condiciones que existen en un depósito de suelo antes de un sismo. Un depósito de suelo consiste de un grupo de partículas individuales de suelo. En la figura 22 se presenta una vista esquemática de estas partículas, donde cada partícula está en contacto con un número de partículas vecinas. Las partículas de suelo apoyadas producen fuerzas de contacto entre ellas, estas fuerzas son las que mantienen en su lugar a las partículas individuales y proporcionan al suelo la resistencia.

El esquema A es la representación de partículas en un depósito de suelo donde la altura de la columna en azul a la derecha representa el nivel de la presión de agua de poros en el suelo. En el esquema B, la longitud de las flechas representa el tamaño de las fuerzas de contacto entre las partículas individuales del suelo. Estas fuerzas son mayores cuando la presión de agua de poros es baja.

Figura 22. **Representación de partículas en un depósito de suelo**



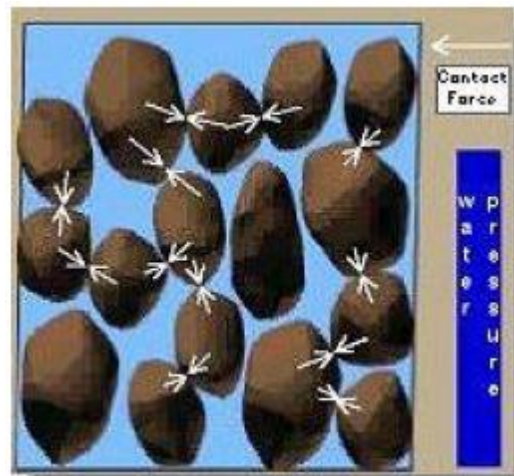
Fuente: *Licuación de suelos y resistencia cíclica*. p. 9.

La licuación ocurre cuando la estructura de una arena suelta saturada se altera deteriorándose debido a la aplicación de una carga violenta. Al deteriorarse la estructura, las partículas que se encuentran empaquetadas comienzan a moverse libremente con la finalidad de conformar una estructura más densa. En un terremoto, sin embargo, no hay tiempo suficiente para que el agua contenida en los poros del suelo sea expulsada. Esto está acompañado de un incremento en la presión de agua la cual reduce la fuerza de contacto entre las partículas individuales del suelo, tanto que la estructura de suelo comienza a ablandarse y a perder resistencia.

En la figura 23, se observa como las fuerzas de contacto son pequeñas debido a las altas presiones de agua.

En un caso extremo, la presión de agua de poros puede llegar a ser tan alta que muchas partículas de suelo pierden contacto una con la otra, en tales casos, el suelo tendrá muy poca resistencia y se comportará más como un líquido que como un sólido.

Figura 23. **Representación de partículas en un depósito de suelo sometidas a un aumento en la presión del agua**



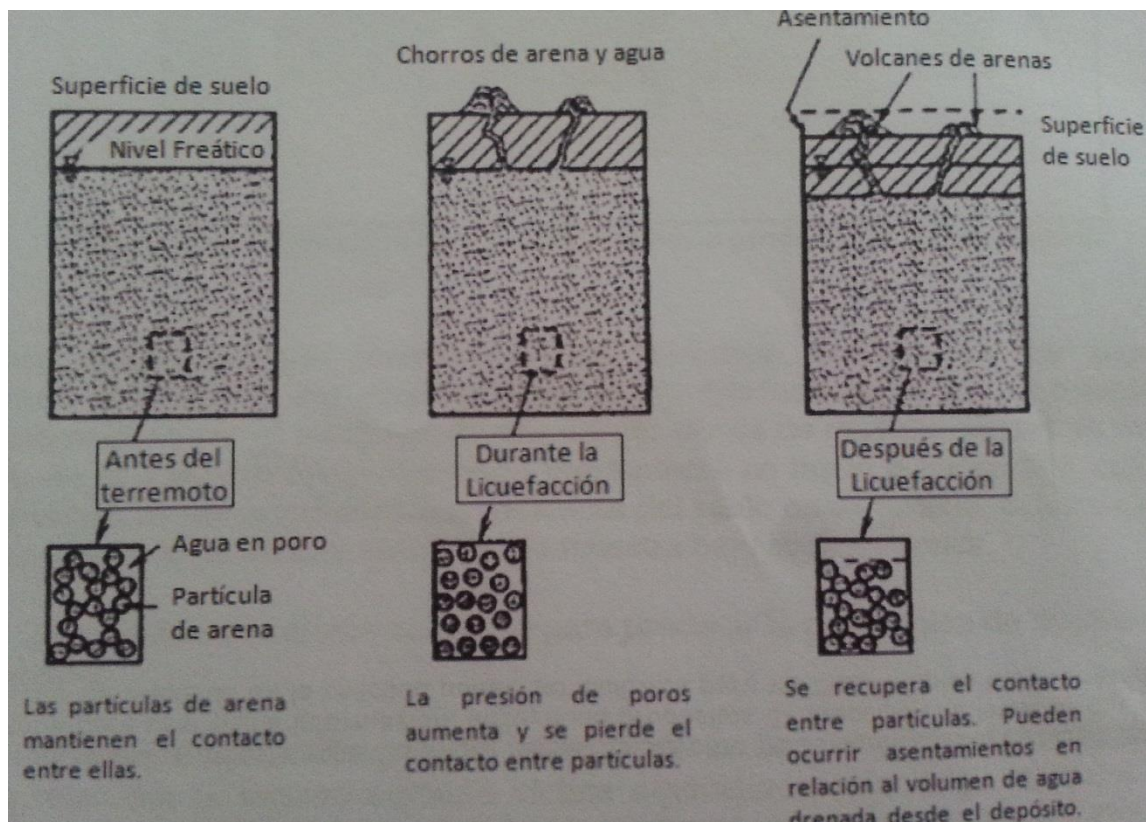
Fuente: *Licuación de suelos y resistencia cíclica*. p. 9.

Como se mencionó anteriormente, la licuación es un fenómeno en el cual la resistencia y rigidez de un suelo son reducidas por vibración sísmica u otra carga de aplicación violenta y ocurre en suelos saturados, suelos en los cuales el espacio entre las partículas individuales está completamente lleno de agua. Antes de un terremoto, la presión de agua es relativamente baja.

Sin embargo, la sacudida del terremoto puede ocasionar el incremento de la presión de poros hasta el punto donde las partículas del suelo puedan moverse fácilmente una respecto a la otra.

El sacudimiento sísmico frecuentemente ocasiona el incremento de la presión de agua, pero actividades relacionadas con la construcción, tales como las voladuras, pueden también ocasionar el incremento de la presión de agua.

Figura 24. **Mecanismo de la licuefacción**



Fuente: *Respuesta sísmica reciente en balsas de relaves chilenas y presas de material suelto.*

Cuando ocurre la licuación, la resistencia del suelo decrece y se reduce la capacidad del depósito para soportar las cimentaciones de edificios y puentes. El suelo licuado también ejerce alta presión sobre muros de contención y destruye estructuras en la superficie del terreno.

El incremento de la presión de poros puede también causar deslizamiento del terreno y causar el colapso en presas. Por ejemplo, la presa de Pacoima en San Fernando California, de San Fernando sufrió un deslizamiento durante el terremoto de San Fernando en 1971 (ver figura 25).

Afortunadamente no se produjo el colapso, con lo cual se previno un desastre potencial por inundación de las grandes áreas pobladas aguas abajo de la presa.

Figura 25. **Deslizamiento en la presa Pacoima de San Fernando, terremoto de 1971**



Fuente: *Licuación de suelos y resistencia cíclica*. p. 10.

El término licuación realmente se ha usado para describir una cantidad de fenómenos relacionados, los cuales pueden dividirse en dos principales categorías: flujo por licuación y movilidad cíclica.

- Flujo por licuación

Es un fenómeno en el cual el equilibrio estático es destruido por cargas estáticas o dinámicas en un depósito de suelo con baja resistencia residual. La resistencia residual es aquella que posee el suelo después de haber licuado.

Cargas estáticas, por ejemplo, pueden ser aplicadas por las edificaciones sobre una ladera en pendiente que ejerce fuerzas adicionales en el suelo por debajo de la cimentación. Los terremotos, voladuras, y el hincado de pilotes son ejemplos de cargas dinámicas que pueden producir flujo por licuación. Las fallas debido al flujo por licuación se caracterizan comúnmente por grandes y rápidos movimientos los cuales pueden producir efectos desastrosos.

El desprendimiento de tierra del Turnagain Heights, en el terremoto de Alaska de 1964, el cual fue provocado por la licuación de lentes de arenas en un área deslizada de 52,6 hectáreas, es un ejemplo de flujo por licuación, como se ilustra en la figura 26. La presa Sheffield sufrió una falla por flujo provocado por el terremoto de Santa Bárbara en 1925. Una sección de 90 m (de los 220 m de longitud de la presa) se desplazó más de 30 metros. La presa consistía principalmente de arenas limosas y limos arenosos compactados sobre el relleno.

Como estos casos históricos de falla por flujo, se pueden involucrar el flujo de volúmenes considerables de material que experimentan grandes movimientos, los que son producidos por esfuerzos de corte estáticos.

Para provocar flujo por licuación sólo se necesita en algunos casos una perturbación muy pequeña.

Figura 26. **Desprendimiento de tierra y licuación, Turnagain Heights, terremoto de Alaska, 1964**



Fuente: *Licuación de suelos y resistencia cíclica*. p. 6.

- Movilidad cíclica

Es un fenómeno de licuación provocado por una carga cíclica, ocurre en depósitos de suelo con esfuerzos de corte estáticos menores que la resistencia del suelo. Las deformaciones debido a la movilidad cíclica se incrementan porque los esfuerzos estáticos y dinámicos subsisten durante un terremoto.

El desplazamiento lateral es un resultado común de la movilidad cíclica, puede ocurrir sobre terrenos suavemente inclinados y en terrenos llanos cercados por ríos y lagunas. Por ejemplo, el terremoto de Guatemala en 1976 ocasionó un desplazamiento lateral a lo largo del río de Motagua.

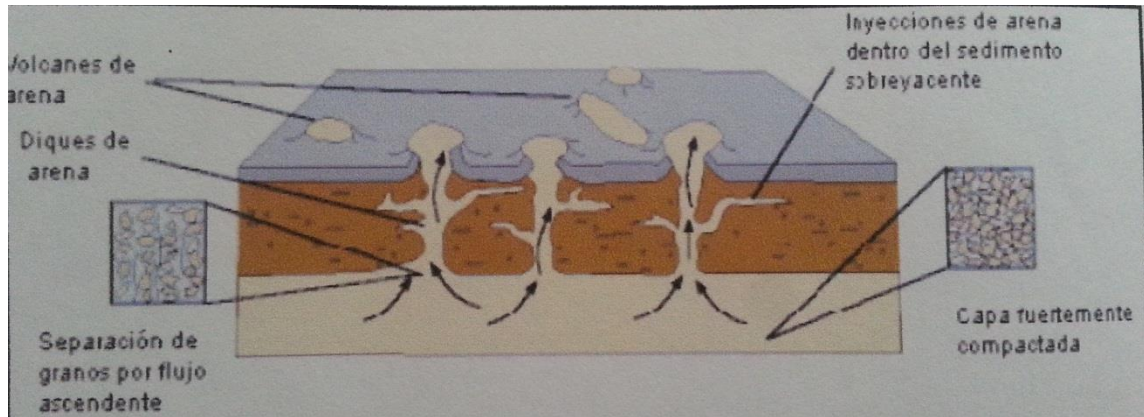
Sobre el nivel del terreno, debido a la alta presión de agua de poros ocasionada por licuación, puede ser que el agua de poros fluya rápidamente a la superficie. Este flujo puede ocurrir durante la ocurrencia del terremoto como también después de este. Si el flujo de agua de poros asciende lo suficientemente rápido, puede llevar partículas de arena hasta la superficie donde se depositan formando volcanes de arena o ebulliciones de arena. Estos aspectos pueden observarse frecuentemente en lugares que han sido afectados por licuación.

Figura 27. **Volcanes de arena como evidencia de la ocurrencia de licuefacción**



Fuente: *Licuación de suelos y resistencia cíclica*. p. 6.

Figura 28. **Generación de volcanes de arena producto de la licuefacción**



Fuente: *Respuesta sísmica reciente en balsas de relaves chilenas y presas de material suelto.*

p. 14.

3.3. **Historia de la licuefacción**

Alrededor del mundo ocurren terremotos y otros desastres naturales que afectan considerablemente desde zonas no pobladas o escasamente pobladas a grandes ciudades y centros urbanos de gran importancia.

Durante los últimos 20 años, más de 68 000 eventos sísmicos de grande y mediana magnitud han sido ubicados y registrados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (US Geological Survey). Aunque muchos de estos eventos no han tenido mayor impacto en la población, en escalas de tiempo geológico, estos han ayudado a formar los paisajes. La lista mostrada en la tabla VII, marca algunos eventos sísmicos de interés especial. Estos sismos están entre los que han producido los cambios geológicos más notables del paisaje o han causado destrucción devastadora a la sociedad.

Dado que el fenómeno de licuefacción está ligado a los movimientos telúricos principalmente, a continuación se presenta un recuento de daños sufridos en algunos de los eventos pasados documentados, debido a los efectos de este fenómeno.

Tabla VII. **Grandes eventos sísmicos a nivel mundial**

Ranking	Evento	Magnitud	Efectos Notables	Destrucción
1	Chile 22 de mayo de 1960	9,5M _w	La ciudad de Valdivia se hundió 4m bajo el nivel del mar y provocó la erupción del volcán Puyehue. El sismo fue percibido en gran parte del cono sur y en diferentes partes del planeta debido al tsunami que se propagó por todo el océano Pacífico.	2 millones de damnificados, 10 mil muertos.
2	Estados Unidos 28 de marzo de 1964	9,1M _w	Produjo un levantamiento del suelo de hasta 11,5 m en 520 000 km ² en el continente.	128 muertos
3	Indonesia 26 de diciembre de 2004	9,1M _w	El tsunami generado por la magnitud del sismo causó más de 289 000 muertos en Sri Lanka, islas Maldivas, Malasia, India, Tailandia y Myannar (antigua Birmania). Es uno de los cinco peores terremotos conocidos desde 1900.	289 000 a 400 000 muertos
4	Ex - Unión Soviética 4 de noviembre de 1952	9,0M _w	Produjo un tsunami de 3,2 m que alcanzó Las islas Midway, Cocos, Hawaii, Alaska y California a unos 3 000 km de distancia del epicentro.	Daños materiales estimados de US\$1 000 000
5	Japón 11 de marzo de 2011	9,0M _w	Provocó un tsunami 15 minutos después del sismo. Causó que el eje de la tierra se moviera 10 centímetros el maremoto arrasara a algunas islas del Pacífico.	15 836 muertos y pérdidas millonarias

Continuación de la tabla VII.

6	Arica, ex localidad peruana, 13 de agosto de 1868	9,0M _W	El evento asoló gran parte del sur de Perú. Seguido al movimiento principal, un tsunami arrasó las costas peruanas y cruzó el océano Pacífico llegando hasta California, Hawaii, Filipinas, Australia, Nueva Zelanda y Japón.	25 000 muertos
7	Chile 27 de febrero de 2010	8,8M _W	Se sintió durante 3:50 minutos y el tsunami generado afectó gran parte de la costa. El terremoto provocó que el eje de la tierra se corriera aproximadamente 8 centímetros, acortando el día en 1,26 microsegundos.	524 muertos
8	Chile, 15 de agosto de 1880	8,8M _W	Las ciudades afectadas sufrieron daños considerables principalmente en las estructuras.	25 muertos
9	Ecuador- Colombia 31 de enero de 1906	8,8 M _W		1000
10	Indonesia 24 de noviembre de 1833	8,8 – 9, 2M _W	Provocó un tsunami que causó daños en Seychelles frente a las costas de África	
11	Norte de Bolivia, Junio de 1994	8,2M _W	El mayor terremoto ocurrido a 637 km de profundidad. Fue el primer terremoto de esa parte de Sur América, sentido Norte América incluyendo Canadá.	Varios muertos
12	Taiwán Septiembre de 1999	7,7M _W	Causó desnivelación de la superficie en dos a tres metros a lo largo del estrecho de la falla de Chelongpu.	Más de 17 000 muertos, 50 000 heridos, miles sin vivienda y daños estimados en billones de dólares

Continuación de la tabla VII.

13	India Enero de 2001	7,7M _W	Se registró licuefacción del suelo	20 000 muertos 167 000 heridos 600 000 sin vivienda
14	Pakistán Octubre de 2005	7,6M _W	Deslizamientos de tierra y caídas de roca que dañaron varias carreteras principales.	80 000 muertos
15	Turquía Agosto de 1999	7,6M _W	Temblor de 37 segundos, desnivelaciones verticales de 2,7 m en un área de 60 km	Más de 17 000 muertos 50 000 heridos Miles sin vivienda y daños estimados en 6,5 billones de dólares
16	Papua Nueva Guinea Julio de 1998	7,6M _W	Maremoto con ondas de más de 10 m de altura	2 183 muertos, miles de heridos y sin vivienda y 500 desaparecidos
17	Norte de Irán, Mayo-Junio de 1997	7,3M _W	Deslizamientos de tierra y secuencia rara de grandes terremotos	1567 muertos 2300 heridos 50 000 sin vivienda y daños extensivos
18	Kobe, Japón Enero de 1995	6,8M _W	Fala superficial de 9 km de radio con desplazamientos horizontales de 1,2 a 1,5 metros. Se registró licuefacción del suelo.	5 502 muertos 36 896 heridos 310 000 sin vivienda y daños severos
19	Northridge, California, Enero de 1994	6,8M _W	Las montañas de Santa Susana se elevaron 15 centímetros. Varios deslizamientos de rocas, grandes grietas y licuefacción del suelo.	60 muertos 7000 heridos, 20 000 sin vivienda y daños severos.
20	Sudeste de Irán Diciembre de 2003	6,6M _W	Causado por una rotura en la falla geológica de Ban (localidad)	26 000 muertos, 30 000 heridos, 85 % de edificios destruidos y 20 000 sin vivienda

Fuentes: *Los diez mayores terremotos de la historia*. p. 3 y 4.

Eventos sísmicos de interés especial. p. 1.

3.3.1. Registro histórico de Guatemala

Por las condiciones geológicas y tectónicas en medio de las cuales se encuentra Guatemala, a lo largo de la historia han ocurrido diversos eventos de los cuales se tiene conocimiento, los cuales fueron documentados principalmente en fecha, hora, magnitud, localización, profundidad y algunas observaciones adicionales como número de muertos o casas dañadas. Algunos de los principales ocurridos en el presente siglo, fueron:

- Terremoto de 1902
- Terremoto de 1913
- Terremotos de 1917 y 1919
- Terremoto de 1942
- Terremoto de 1959
- Terremoto de 1976
- Terremoto de Uspantán de 1985
- Terremoto de Pochuta de 1991
- Terremoto de Tucurú de 1995
- Enjambre sísmico del 10 de enero de 1998
- Enjambre sísmico del 2 de marzo de 1998
- Sismo del 28 de mayo de 2009 en Puerto Barrios
- Terremoto de San Marcos, 7 de noviembre de 2012

En todos los eventos anteriores, a excepción del terremoto de 1976 y del sismo del 28 de mayo de 2009, no existe evidencia o documentación con respecto a licuefacción del suelo.

Al hablar de grandes terremotos en Guatemala, las mediciones matemáticas indican que el evento de 1942 ha sido el de mayor cantidad de liberación de energía en lo que va del siglo, sin embargo, no ha sido el más destructor. Posiblemente por la ubicación del evento y la menor población existente en la época influyeron en ello.

El evento que más estragos ha causado en el presente siglo es sin duda el terremoto de 1976. Fue registrado el día 4 de febrero a las 03:03:33 horas, localizado en 15,32 grados latitud norte y 89,10 grados longitud oeste, de características superficiales, alrededor de 5 km de profundidad y magnitud Ms de 7,5 grados. Los efectos de la ruptura fueron desastrosos, se registraron mediciones de desplazamiento horizontal de más de 3 m en algunas partes a lo largo de la falla, se crearon aceleraciones muy altas que ocasionaron la destrucción de miles de viviendas en las zonas adyacentes, incluyendo el valle de la ciudad capital. Se registraron cerca de 25 000 muertos y 75 000 heridos y aunque no se fijaron cifras exactas, se calcula que las pérdidas excedieron un mil doscientos cincuenta mil millones de dólares estadounidenses y se dio la activación del sistema de fallas de Mixco.

El sismo del 29 de mayo de 2009 se manifestó con una magnitud de 7,1 en la escala de Richter e intensidad de V en la escala de Mercalli, a nivel del municipio de Puerto Barrios. Las principales comunidades dañadas y evaluadas fueron Mojanales, Las Vegas, Media Luna y El Quetzalito, observándose en todas fenómenos de inundación en el cauce del río Motagua y las alrededores, efectos de licuefacción y tubificación dentro o cercanos a sitios donde se asientan las poblaciones.

La primera manifestación en tiempos recientes y de los cuales se tiene conocimiento sobre un comportamiento parecido, tanto del río Motagua como del mar, datan del terremoto del 4 de febrero de 1976 y del ocurrido el 11 de julio de 1999, fecha que se dio un sismo de magnitud 7,0 e intensidad V en el departamento de Izabal. Los efectos más importantes del sismo del mes de mayo fueron:

- Regresión del límite del agua costera aproximada hasta de 70 m hacia mar adentro en forma lenta, por un tiempo de media hora.
- Retorno del agua al litoral del mar Caribe, con un aumento considerable del nivel de la marea, con fuerte oleaje, provocando resalto hidráulico, el cual impidió el libre desfogue del río Motagua y las afluentes hacia el mar Caribe.
- Reflujo debido al remanso, se produjo embalsamiento e inversión de la dirección del flujo del río Motagua, incrementando el nivel hasta la capacidad máxima del cauce (2 a 4 m de altura) a lo largo de varios km, aguas arriba desde la desembocadura del mismo.
- La elevación de los niveles del río Motagua permitió la saturación del medio poroso de los suelos de ambos márgenes, principalmente donde son localizados cauces antiguos de las afluentes y actualmente están rellenos con materiales arenosos o utilizados para áreas de explotación agropecuaria e incluso en sitios urbanizados.

- Al sobresaturarse los suelos y cuando se alcanzó la nivel superficial se produjo el arrastre de sedimentos desde capas más profundas con predominio de arena pómez y cristales de mica o talco, los cuales posteriormente fueron depositados en la superficie del suelo como pequeños volcancitos explotados o en las márgenes y fondo de las áreas fracturadas.
- Las características de los minerales en estos sedimentos y granulometría son similares a los encontrados en el fondo del cauce del río Motagua. Desde el punto de vista de la mecánica de suelos, la licuefacción conlleva a la pérdida o reducción sustancial de la capacidad de soporte de los mismos, dejándolos en condiciones no aptas para la ejecución de obras de infraestructura.
- Tubificación (erosión interna en los estratos del suelo) y agrietamiento en varios puntos por acción hidráulica. El descenso de la marea en el mar Caribe permitió el desfogue del río Motagua en forma acelerada, imprimiendo velocidades que generaron erosión interna conocida como tubificación en estratos arenosos y saturados del suelo definiendo la longitud, profundidad, ancho, ángulo de reposo de los materiales y pendiente de los taludes de las grietas canalizadas, de acuerdo a la velocidad alcanzada por los flujos que buscaron sitios más bajos o que regresaron nuevamente al cauce del río Motagua.
- Acumulación de arena fina en los pozos artesanales de abastecimiento de agua para consumo humano por flujos ascendentes por conexión hidráulica con el río Motagua. La elevación del nivel freático de los terrenos en forma violenta provocó la licuefacción del fondo de los estratos arenosos situados por debajo de los pozos en forma ascendente.

- Posteriormente con el efecto del desfogue rápido de las aguas del río Motagua y el descenso de los niveles freáticos locales, en los pozos artesanales se perdió el nivel del agua, quedando estos colmatados con la presencia de sedimentos finos en la parte superior, donde se pudo apreciar limos y arenas finas similares a las encontradas en el cauce del río. En algunos pozos de la comunidad de Mojanales la cantidad de sedimentos extraídos alcanzó el volumen de 1,25 m³.
- Aún luego de la limpieza de los pozos, el agua extraída presentaba mayor turbidez con cantidad de minerales (carbonatos, bicarbonatos, óxido de hierro) en altas concentraciones y mayor cantidad de minerales disueltos en relación a los que transporta el agua del río.
- Daño a la infraestructura vial, vivienda y sistemas productivos.

Se han registrado otros eventos en el área con efectos similares de producción de agrietamientos y licuefacción, los principales en agosto de 1980 y en julio de 1999. En todos, el embalsamiento del río Motagua y las afluentes provocaron la saturación de los suelos con el aumento regional de los niveles del agua subterránea, traduciéndose en el fenómeno hidrogeológico de licuefacción.

Hasta el momento, la mejor documentación encontrada sobre los casos de licuefacción es la presentada en el informe del simposio internacional sobre el terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976 y el proceso de reconstrucción. Este documento preparado por geólogos estadounidenses, resume los principales eventos y lugares en los que debido al fenómeno de licuefacción se registraron daños a la infraestructura y al terreno.

Figura 29. **Evidencia de licuefacción en la comunidad Mojanales, Puerto Barrios, Guatemala a raíz del sismo del 28 de mayo de 2009**



Comunidad Mojanales: licuefacción y asentamientos diferenciales

Fuente: *Evaluación técnica de las comunidades El Quetzalito, Mojanales, Las Vegas y Media Luna del municipio de Puerto Barrios, Izabal, afectados por inundaciones y proceso de licuefacción a causa del sismo del 28 de mayo de 2009.* p. 10.

La licuefacción sísmicamente inducida durante el terremoto de 1976 causó severas fallas en la tierra. Las fallas se produjeron principalmente en las áreas de deposición reciente, como los deltas y canales de arroyos y alrededor de algunas pequeñas lagunas y zonas húmedas de las tierras altas. Los depósitos de arena pomácea saturadas con agua fueron altamente susceptibles a la licuefacción.

Deslizamientos de tierra con más de 9,6 m de desplazamiento horizontal y un metro de subsidencia se produjeron en las pendientes tan suaves de 3,2 % en la parte más joven del delta debido al fenómeno en una capa superficial (1 m de profundidad) de arena pómez y grava.

Asociado a esto, aparecieron grietas en el suelo y volcanes de arena formados a varios cientos de metros de la orilla del lago y con orientación paralela a la orilla del lago o río. El desplazamiento lateral a través de estas grietas destruyó cientos de casas que no parecían tener daño directo por el temblor. En el delta del río Panajachel en el lago de Atitlán, hubo hundimientos y agrietamientos asociados al desplazamiento lateral que causaron daños moderados a lo largo de la orilla del lago. En la parte baja del valle pantanoso del río Motagua, los bancos derrumbados fueron comunes y las grietas y volcanes de arena se observaron hasta 100 m de la orilla del río. Los efectos de la licuefacción se reportaron incluso en el lago de Izabal, Guatemala, Puerto Cortés, Omoa y San Pedro Sula en Honduras y lago Ilopango en El Salvador.

3.3.2. Registro histórico de América

- Terremoto de Alaska en Estados Unidos, 1964. El área de la costa sur de Alaska ha experimentado muchos terremotos. El viernes santo, 27 de marzo de 1964, un gran terremoto de magnitud $M_s = 9,2$ golpeó Prince William Sound y causó severos daños en forma de desprendimiento de tierra y licuación. Este evento sísmico duró 3 minutos aproximadamente y fue sentido en un área de 500 000 millas cuadradas. Un fuerte tsunami aumentó la cantidad de daño en el muelle, ocasionó muertes durante cinco horas después del terremoto en la Ciudad Creciente, California.
- Terremoto de Loma Prieta en Estados Unidos, 1989. El terremoto del 17 de octubre de 1989 en Loma Prieta ($M_s = 7,1$) ocasionó severos daños no solo en la vecindad del epicentro cerca de Santa Cruz, sino también en áreas más distantes hacia el norte, alrededor de San Francisco y Oakland.

La licuación de suelo ocasionó daño importante en las instalaciones marinas, estructuras y líneas de tuberías enterradas ubicadas en el área de la Bahía donde los suelos arenosos, sueltos, saturados fueron susceptibles a la licuación. Los numerosos volcanes de arena que fueron observados eran la evidencia de la ocurrencia de licuación. La licuefacción se observó en varios lugares, incluyendo el aeropuerto de Oakland, las zonas que se encuentran a lo largo del río Salinas y la estación de aterrizaje marítima Moss.

- Terremoto en Chimbote, Perú, 1970. El 31 de mayo de 1970 (3:23 p.m. hora local) ocurrió un terremoto de subducción de magnitud $M_s = 7,8$ y profundidad focal de 45 km, con epicentro aproximadamente a 50 km de la costa del Perú, al oeste de la ciudad de Chimbote. Es uno de los casos mejor documentados sobre el fenómeno de licuefacción de suelos en el Perú. El terremoto activó un acelerógrafo en Lima, cuya aceleración máxima corregida fue de 0,11g.

En Chimbote no se registraron aceleraciones; sin embargo la máxima intensidad del terremoto se calculó en grado IX en la escala de intensidades de Mercalli Modificada. Investigaciones indicaron que en Casma, Puerto Casma y zonas cercanas al litoral de Chimbote, se produjeron desplazamientos laterales del terreno causados por licuefacción de depósitos deltaicos y de playa, ocasionando grietas en el terreno que derrumbaron las estructuras que las cruzaron. La zona central de Chimbote fue evidentemente un área de licuefacción de suelos, así como de asentamientos diferenciales de la cimentación.

Se identificaron descensos en los terraplenes de acceso de casi todos los puentes de la carretera Panamericana y asentamientos en las plataformas del Terminal Marítimo de Chimbote.

También se presentó evidencias del fenómeno de licuefacción en los depósitos de arenas saturadas de la calle Elías Aguirre en Chimbote.

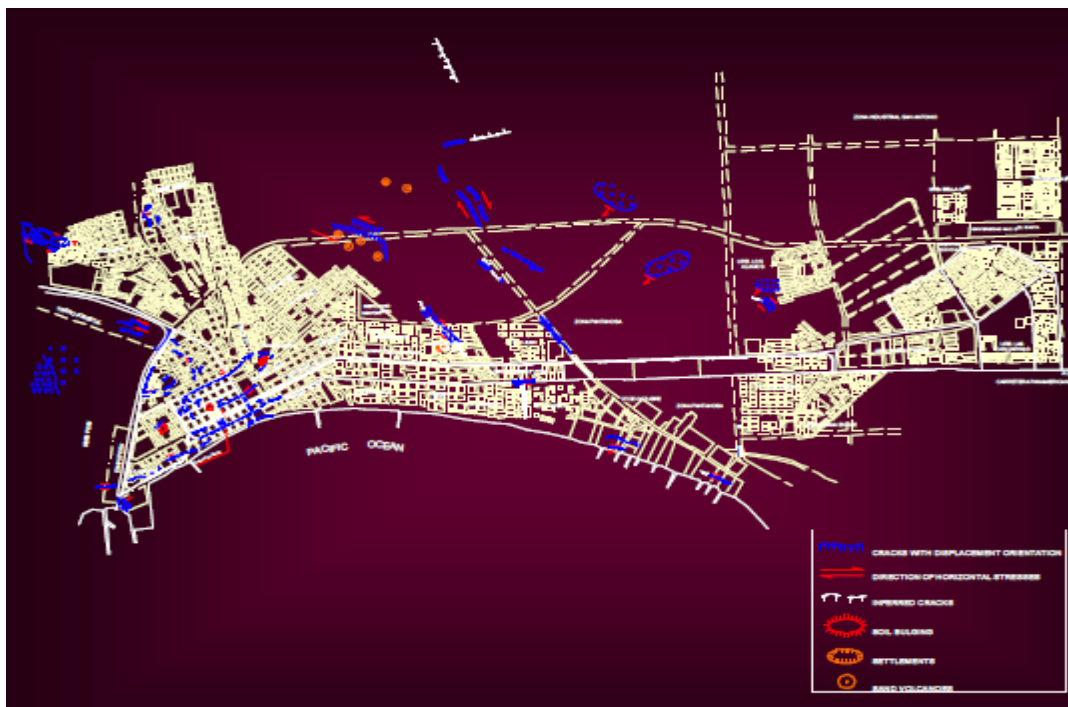
Otras investigaciones describieron la ocurrencia de licuefacción de suelos y prepararon un mapa de distribución de grietas en el terreno y volcanes de arena en Chimbote. En la zona pantanosa se produjo licuefacción generalizada, con grietas debido a compactación diferencial; y en la zona aluvial, licuefacción subsuperficial con grietas y volcanes de arena.

El 29 de mayo de 1990 y el 4 de abril de 1991, ocurrieron dos sismos moderados en el nororiente peruano, con magnitudes $m_b = 6,0$ y $m_b = 6,5$ respectivamente. Los efectos en el terreno fueron la licuefacción de suelos, inestabilidad y erosión de suelos en los taludes, asentamientos diferenciales y amplificación de suelos y deslizamientos. Los sismos fueron producidos por fallas activas (ver figuras 30 y 31).

- Terremoto de Chile, 1960. El 22 de mayo ocurrieron varios asentamientos de zapatas aisladas, fallas en rampas de acceso a puentes y muros de contención. La mayoría de estas fallas se debió a la licuefacción, ya que estos ocurrieron en zonas de suelos arenosos y saturados.
- Terremoto de El Salvador, 13 de enero de 2003. Con una magnitud de 7,6 grados en la escala de Richter y una duración de 46 segundos, causó varios daños, en especial a la costa del Pacífico. El terremoto se atribuyó al fenómeno de subducción de la placa del Caribe con la de Cocos.

También se detectaron daños en la costa sur de Guatemala, a un costado de El Salvador, a pocos kilómetros de Las Lisas se detectó un afloramiento de arena que se encontraba a 4 m debajo de una capa de arcilla. Este fenómeno es atribuible a la licuefacción.

Figura 30. **Efectos de licuefacción de suelos en Chimbote, Perú, sismo del 31 de mayo de 1970**



Fuente: *Licuación de suelos en el Perú*. p. 18.

Figura 31. **Asentamientos y fisuramientos, terremoto de Chimbote, Perú, 1970**



Fuente: *Licuación de suelos en el Perú*. p. 15.

3.3.3. Otros países del mundo

- Terremoto de Nigata, Japón, 1964. El terremoto tuvo lugar el 16 de junio de 1964 y tuvo una magnitud de 7,5 en escala de Richter y ocasionó daño severo a muchas estructuras en Nigata. La destrucción se observó en aquellos edificios que fueron cimentados sobre depósitos de suelo suelto saturado. Según el reporte del terremoto, se destruyeron 2 000 casas y se perdieron 28 vidas. Un tsunami provocado por movimiento en la base del mar asociado con la ruptura de la falla, destruyó totalmente el puerto de Niigata. Una gran falla en el terreno ocurrida cerca de la orilla del río Shinano donde los edificios de apartamentos de Kagagishi-cho sufrieron fallas en la capacidad de soporte y se inclinaron severamente.

A pesar de la excesiva inclinación, los edificios sufrieron poco daño estructural. Volcanes de arena y fisuras en el terreno fueron observados en varios lugares en Nigata. El desplazamiento lateral ocasionó un movimiento lateral en la cimentación del puente Showa, tanto que los tramos entre los apoyos fueron sacados de lugar y por lo tanto trajo consigo el colapso.

Figura 32. **Apartamentos de Kawagishi-cho, fallas en la capacidad de soporte, terremoto de Nigata de 1964**



Fuente: *Licuación de suelos y resistencia cíclica*. p. 5.

- Terremoto de Kobe, Japón, 1995. El terremoto de Hanshin de 1995 (se reportó con $M_s = 6,9$) que comúnmente se le llama terremoto de Kobe, fue uno de los más devastadores terremotos que golpearon a Japón dejando más de 5 500 muertos y otros 26 000 heridos. La pérdida económica se ha estimado cerca de 200 billones de dólares. La proximidad del epicentro a la región altamente poblada, ayudan a explicar la gran pérdida de vidas y el alto nivel de destrucción.

El colapso espectacular de la autopista Hanshin (ver figura 33) ilustra los efectos de las altas cargas inducidas por el terremoto. Los movimientos fuertes del terreno condujeron al colapso de la autopista de Hanshin, asimismo, la licuefacción ocasionó daño severo al puerto de la ciudad.

Figura 33. **Destrucción ocasionada por el terremoto de Kobe, Japón, 1995**



Fuente: *Licuación de suelos y resistencia cíclica*. p. 7.

3.4. Determinación del potencial de licuefacción

Como se ha mencionado en los apartados anteriores, los casos históricos de licuación comenzaron a hacerse cada vez más notables a partir del terremoto de Nigata en 1964. Desde de entonces innumerables metodologías han sido desarrolladas para tratar de definir el riesgo de licuefacción de un depósito de arenas saturadas. Una vez que se determina que existe riesgo de licuefacción en un depósito arenoso, hay dos aspectos fundamentales que deben tratar de controlarse: la pérdida de resistencia al corte y las grandes deformaciones debido a fallas de flujo.

El interés ampliamente difundido por la energía nuclear ha generado la necesidad de investigar potenciales fallas geológicas o posibles licuefacciones del suelo durante un sismo en los sitios de ubicación de plantas nucleares. Durante estos últimos 10 años se han usado tres tipos de ensayo para estudiar la estabilidad estructural (resistencia) de las arenas. Estos incluyen el ensayo triaxial cíclico, el ensayo de corte directo y en ensayo de la tabla vibratoria.

Estos estudios se hacen para estimar la magnitud y el número de ciclos de esfuerzos (o deformaciones) necesarios para causar una acumulación de presiones de poro suficiente para reducir la presión efectiva del poro a un valor suficientemente bajo, de tal manera que bajo las cargas del suelo el material se comporte como un fluido viscoso o líquido. Investigaciones han demostrado que la presión de poro residual tiende a incrementarse en ciclos de esfuerzos sucesivos en una arcilla. Se ha encontrado también que la presión de poro se incrementa con el incremento de la deformación. Este fenómeno es de esperarse en un suelo saturado en condiciones sin drenar.

En suelos naturales donde $S < 100$ por ciento aun con drenaje, este fenómeno puede también inducirse si la presión de poro que se acumula es mayor que la velocidad de drenaje, como puede ocurrir durante los sismos, en donde se desarrollan relativamente grandes deformaciones. Nótese también que la falla progresiva no requiere que la masa entera esté simultáneamente en un estado de licuefacción. Un punto local de licuefacción puede transferir carga suficiente a un punto adyacente, de tal manera que el suelo se sobre esfuerce, resultando un falla de toda la masa.

El ensayo cíclico de corte directo y el ensayo cíclico de corte triaxial pueden usarse también para determinar el módulo dinámico y el factor de amortiguamiento en un suelo bajo las condiciones del ensayo (relación de vacíos, presión de confinamiento, (cementación), perturbación de la muestra, relación de esfuerzos o deformación).

Por lo común la deformación y los esfuerzos son controlados electrónicamente, la respuesta es dirigida a un oscilógrafo y se hace el dibujo indicado. El gráfico puede hacerse también a mano y se obtienen los esfuerzos y las correspondientes deformaciones. Generalmente, debido a que el ciclo es del orden del 1/6 a 10 Hz, resulta práctico usar solamente un oscilógrafo.

Del ciclo de histéresis mostrado, el módulo e esfuerzo-deformación es:

$$M_d = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} \quad [1]$$

Donde

$M_d = E_s$ para deformación axial y esfuerzo desviador
= G para deformación cortante y esfuerzo cortante

La amortización se calcula así:

$$D = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\text{Área del ciclo ABCD}}{\text{Área de ambos triángulos (OBE+ODF)}} \right] \quad [2]$$

El área del ciclo y de los triángulos se obtiene fácilmente usando un planímetro.

El ensayo de corte cíclico también se usa para determinar el número de ciclos N_c para cualquier esfuerzo desviador, generalmente expresado como una relación de esfuerzos:

$$R = \frac{\Delta\sigma_1}{2\sigma_3} \quad [3]$$

Donde σ_3 = presión confinante efectiva que causará la presión de poro medida a partir de condiciones consolidadas drenadas ($u=0$), hasta igualar la presión confinante ($u = \sigma_3$). Para esta condición de presión de poro se supone la licuefacción. Para el ensayo de corte directo use Δs = esfuerzo cortante cíclico y el esfuerzo normal aplicado σ_v para σ_3 .

Para el ensayo triaxial cíclico,

- Construir una muestra con la densidad deseada (o relación de vacíos). Usar arena de amortiguación con contenido de agua conocido y pesarla en 5 a 10 partes iguales separadas para producir una muestra uniformemente densa, acomodando los pesos iguales en volúmenes iguales de muestra. Varias muestras de tanteo pueden ser requeridas antes de que se obtenga una muestra satisfactoria.

- Para estudios de licuefacción, saturar y consolidar la muestra usando una contra-presión σ_b y verifique que el parámetro B sea 0,98⁺. La presión de consolidación efectiva se obtiene de la diferencia entre la presión de confinamiento y la contra-presión:
- $$\sigma_3 = \sigma_3 - \sigma_b \quad [4]$$
- Para determinar el módulo dinámico, deben usarse el contenido de agua in situ o la arena de amortiguación en una condición drenada de líneas de poro abiertas para el drenaje.
- Colocar la cámara en una máquina triaxial modificada para aplicaciones cíclicas de carga. Puede hacerse una modificación del equipo existente con costos modestos en aquellos lugares en donde se disponga de técnicos competentes de laboratorios. El equipo es ofrecido por diversos laboratorios comerciales o puede ser construido fácilmente.
- Aplicar un incremento de deformación y observar la carga máxima desviadora (esfuerzo). Generalmente se usa una deformación de 2,5 y/o 10 % en los estudios de licuefacción. Ajustar el equipo de tal manera que una parte del esfuerzo estabilizador (o deformación) sea cíclico. Es evidente que el ciclo debe ser de tal manera que el contacto con la muestra se mantenga sobre la parte de esfuerzo (-) en el ciclo de histéresis.
- Para estudios de licuefacción, los ciclos se cuentan hasta la licuefacción ($u = \sigma_3$), y se hace un gráfico de la relación de esfuerzos contra N_c para varias relaciones de esfuerzos con $\epsilon =$ constante.

3.5. Evaluación de riesgo a la licuefacción

Se presentó el concepto de licuefacción tal como se usa en el estudio de sismos; también se presentaron los ensayos cíclicos de cortante, tal como se usan para evaluar la resistencia de sismos. Estos temas han sido asignados a los problemas de relacionar muestras de laboratorio con las condiciones del campo con respecto a los métodos de preparación de la muestra, el grado de saturación, la presión de confinamiento, el tipo de suelo, las limitaciones de equipo, la exactitud en la simulación del ensayo y la interpretación de la información. En general, sin embargo, se ha hallado que los factores que determinan el fenómeno de licuefacción son:

- Los esfuerzos cíclicos que inducen licuefacción son mucho menores que los requeridos bajo condiciones de cargas estáticas.
- La frecuencia no es particularmente crítica ya que frecuencias de 1/6 a 10 Hz producen esencialmente los mismos resultados.
- Los esfuerzos cíclicos producirán licuefacción en suelos con un intervalo considerable de pesos unitarios.
- Cuando las arenas se licúan bajo esfuerzos cíclicos, las deformaciones inmediatas llegan a ser muy grandes. Esto causa algunos problemas en el laboratorio al determinar la falla.
- La licuefacción parcial de arenas densas produce una condición de esfuerzo cercano a 0 para bajas deformaciones, pero si la deformación se incrementa, se recupera una resistencia apreciable.

- Cuanto mayor sea la relación de esfuerzo, menor el número de ciclos para llegar a la licuefacción.
- Cuanto menor sea la presión de confinamiento, más bajo el número de ciclos requeridos para causar la licuefacción.
- Los ambientes sedimentarios más favorables para la génesis de licuefacciones son: playas, barras arenosas y sistemas fluviales, ambientes lacustres y fluviolacustres.
- Para que se produzcan inyecciones en filón y cráteres de arena es necesaria una capa de arena de al menos 3 m de potencia. Una composición del 95 % de sílice en arenas de grano medio a fino favorece el fenómeno y la mayor probabilidad de licuefacción se da entre la superficie topográfica y los 6 a 7 m de profundidad como máximo y por encima de los 3 m de profundidad del nivel freático.
- Edad de los materiales sedimentarios: con terremotos actuales no se produce licuefacción en materiales más antiguos que el Pleistoceno.
- Profundidad de la lámina de agua (nivel freático) es importante. La probabilidad de licuefacción disminuye mucho por debajo de los 3 m del nivel freático, sólo en condiciones particularmente inestables y con magnitudes mayores que 7,5 se genera licuefacción por debajo de este nivel.
- Tamaño de grano: arena de tamaño medio a fino.

- Cuando los materiales son más antiguos, en general son más densos y cohesivos. A mayor densidad, se necesita mayor presión intersticial para que se produzca la licuefacción.
- Altas tasas de sedimentación favorecen la licuefacción (sedimentos de grano fino, lacustres y fluviales).
- Espesores mínimos de arenas de 3 m (o de alternancia de arenas y limos).
- La aceleración interna depende de la amplitud de la onda sísmica y varía en función de los mecanismos focales del sismo y parámetros locales de los materiales.
- Sismos de magnitud 6 pueden generar estructuras de licuefacción en un radio de 40 km. Para sismos de magnitud 5 a 5,7 se generan estructuras de licuefacción a 25 km del epicentro. Para terremotos de magnitud 7 el radio en el que se pueden dar licuefacciones es de 70 km y para sismos de magnitud 8 o superior, el radio pasaría a ser de 100 km.

4. SISMOS

Un terremoto o sismo es una sacudida del terreno producido por el choque de las placas tectónicas. Debido a este choque se libera gran cantidad de energía elástica que da lugar a un movimiento vibratorio de la superficie terrestre. Una parte de la energía liberada en un terremoto se transforma en calor y la otra en forma de ondas sísmicas.

Los sismos son originados por tres tipos de esfuerzos: distensivos, compresivos y de cizalla, cada uno de ellos es característico de los distintos tipos de límites existentes, divergentes, convergentes y pasivos, respectivamente.

El punto interior de la tierra donde se produce el sismo se denomina foco sísmico o hipocentro y el punto de la superficie que se halla directamente en la vertical del hipocentro y que por tanto es el primer afectado por la sacudida recibe el nombre de epicentro.

4.3. Magnitud e intensidad de los sismos

La magnitud de un sismo es una medida del tamaño. Es un dato objetivo, es decir, es el mismo en cualquier parte del mundo donde se calcule. Por el contrario, la intensidad es una medida de los efectos de un sismo sobre un área determinada. La intensidad es una medida subjetiva y conforme uno se aleja del epicentro, esta tiende a disminuir.

La magnitud más conocida es la propuesta por Charles Richter. Richter fue un científico que observó que la amplitud de las ondas sísmicas tendía a disminuir en forma predecible con la distancia. Él elaboró una ecuación para relacionar tanto la distancia como la amplitud de la onda S en un tipo de sismógrafo ampliamente utilizado en California y fue así como nació la Escala de Richter.

Aunque la escala de magnitud de Richter es la más conocida, en sismología se prefiere utilizar la escala de magnitud momento o Mw. Al igual que la magnitud de Richter, la magnitud momento es también logarítmica, pero en lugar de basarse en la amplitud máxima de movimiento del terreno, la magnitud momento relaciona el área de ruptura de la falla que causa el sismo y el máximo desplazamiento.

Richter reportó inicialmente valores con una precisión de un cuarto de unidad, sin embargo, usó números decimales más tarde.

$$M = \text{Log}A + 3\text{Log}(8\Delta t) - 2.92 \quad [5]$$

Donde:

A = amplitud de las ondas en milímetros, tomada directamente en el sismograma.

Δt = tiempo en segundos desde el inicio de las ondas P (Primarias) al de las ondas S (Secundarias).

M = magnitud arbitraria pero constante a terremotos que liberan la misma cantidad de energía.

El uso del logaritmo en la escala es para reflejar la energía que se desprende en un terremoto.

El logaritmo incorporado a la escala hace que los valores asignados a cada nivel aumenten de forma logarítmica y no de forma lineal. Richter tomó la idea del uso de logaritmos en la escala de magnitud estelar, usada en la astronomía para describir el brillo de las estrellas y de otros objetos celestes. Richter arbitrariamente escogió un temblor de magnitud 0 para describir un terremoto que produciría un desplazamiento horizontal máximo de 1 micrómetro en un sismograma trazado por un sismómetro de torsión Wood-Anderson localizado a 100 km de distancia del epicentro. Esta decisión tuvo la intención de prevenir la asignación de magnitudes negativas. Sin embargo, la escala de Richter no tenía límite máximo o mínimo y actualmente habiendo sismógrafos modernos más sensibles, estos detectan movimientos con magnitudes negativas.

Debido a las limitaciones del sismómetro de torsión Wood-Anderson usado para desarrollar la escala, la magnitud original M_L no puede ser calculada para temblores mayores a 6,8. Varios investigadores propusieron extensiones a la escala de magnitud local, siendo las más populares la magnitud de ondas superficiales M_S y la magnitud de las ondas de cuerpo M_b .

El mayor problema con la magnitud local M_L o de Richter radica en que es difícil relacionarla con las características físicas del origen del terremoto. Además, existe un efecto de saturación para magnitudes cercanas a 8,3 – 8,5, debido a la ley de Gutenberg-Richter del escalamiento del espectro sísmico que provoca que los métodos tradicionales de magnitudes (M_L , M_b , M_S) produzcan estimaciones de magnitudes similares para temblores que claramente son de intensidad diferente. A inicios del siglo XXI, se consideraron obsoletas las escalas de magnitudes tradicionales, siendo estas reemplazadas por el momento sísmico, más adecuado para relacionar los parámetros físicos, como la dimensión de la ruptura sísmica y la energía liberada por el terremoto.

En 1979, los sismólogos Thomas C. Hanks y Hiroo Kanamori, investigadores del Instituto de Tecnología de California, propusieron la escala sismológica de magnitud de momento (M_W), la cual provee una forma de expresar momentos sísmicos que puede ser relacionada aproximadamente a las medidas tradicionales de magnitudes sísmicas.

Para que se produzca un terremoto, es necesario que exista ruptura de las rocas de la corteza. Sin embargo la corteza de la Tierra posee una profundidad finita (alrededor de 30 km). Un terremoto de magnitud 4 por ejemplo, podría suceder en cualquier parte del planeta sin mayores inconvenientes ya que no rompería un área demasiado grande y siempre estaría comprendido dentro de la corteza. Sin embargo, para que sucediera un sismo de magnitud 8, sería necesario que la falla rompiera todo el espesor de la corteza y aun así que la ruptura se extendiera por varios cientos de kilómetros a lo largo.

Con la magnitud momento es posible estimar qué tan grande podría ser un terremoto con sólo conocer el área que este pudiera romper y el desplazamiento relativo entre los bloques de la falla.

La mayor liberación de energía que ha podido ser medida fue durante el terremoto ocurrido en la ciudad de Valdivia (Chile), el 22 de mayo de 1960, el cual alcanzó una magnitud de momento (M_W) de 9,5. La tabla VIII describe los efectos típicos de los sismos de diversas magnitudes, cerca del epicentro. Los valores son estimados y deben tomarse con extrema precaución, ya que la intensidad y los efectos en la tierra no sólo dependerán de la magnitud del sismo, sino también de la distancia del epicentro, la profundidad, el foco del epicentro y las condiciones geológicas (algunos terrenos pueden amplificar las señales sísmicas).

Tabla VIII. **Efectos de sismos de diversas magnitudes**

Magnitud $M_w > 6,9$ $2,0 > M_L < 6,9$	Descripción	Efectos de un sismo	Frecuencia de ocurrencia
< 2,0	Micro	Los microsismos no son perceptibles	8 000/día
2,0 – 2,9		Generalmente no son perceptibles	1 000/día
3,0 – 3,9	Menor	Perceptibles a menudo, pero rara vez provocan daños	49 000/año
4,0 – 4,9	Ligero	Movimiento de objetos en las habitaciones que provocan ruido. Sismo significativo pero que rara vez producen daño	6 200/año
5,0 – 5,9	Moderado	Puede causar daños mayores en edificaciones débiles o mal construidas. En edificaciones bien diseñadas, los daños son leves.	800/año
6,0 – 6,9	Fuerte	Pueden ser destructivos en zonas pobladas, en hasta 160 km a la redonda	120/año
7,0 – 7,9	Mayor	Puede causar serios daños en extensas zonas	18/año
8,0 – 8,9	Gran	Puede causar daños en zonas de varios cientos de kilómetros	1 – 3 /año
9,0 – 9,9		Devastadores en zonas de varios de miles de kilómetros	1 – 2 en 20 años
10,0 +	Épico	Nunca registrado	Nunca ha sucedido un sismo de esta magnitud

Fuente: USGS: *FAQ- Measuring Earthquakes.*

La escala de intensidad fue propuesta por primera vez por el científico Giuseppe Mercalli. La escala original constaba de diez grados y la que se usa actualmente, que se llama escala de Mercalli modificada, doce grados.

A diferencia de la magnitud, la intensidad se relaciona con los efectos sobre las personas y el grado de daño sobre las estructuras. Los valores bajos por lo general están asociados con la forma como las personas sintieron el sismo, mientras que los valores altos con la forma como fue afectado el paisaje o las construcciones hechas por el hombre.

Luego de la ocurrencia de un terremoto, se realiza una encuesta, generalmente por vía telefónica, donde se pregunta a las personas como fue percibido el sismo. Dependiendo de las respuestas y de acuerdo a la Tabla IX, es como se le asigna un valor de intensidad específico al sitio donde se hace la consulta. A partir de esos datos se pueden generar mapas que muestran las zonas que fueron movidas con mayor intensidad.

4.4. Energía de un sismo

Un sismo es una sacudida del terreno producido por el choque de las placas tectónicas. Debido a este choque se libera gran cantidad de energía elástica que da lugar a un movimiento vibratorio de la superficie terrestre y una parte de la energía liberada en un terremoto se transforma en calor y la otra en forma de ondas sísmicas, Tabla X.

Tabla IX. **Escala de Mercalli modificada (MM)**

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. 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. Vibración de vajillas, vidrios de ventana y puertas, los muros crujen. Sensación como de un carro pesado chocando contra un edificio. Los vehículos de motor estacionados se balancean.
V	Sacudida sentida casi por todo el mundo, muchos despiertan. Caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos.
VI	Sacudida sentida por todo el mundo. Muchas personas atemorizadas huyen hacia afuera. Algunos muebles pesados cambian de sitio, pocos ejemplos de 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. 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 las armaduras. Caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades. Cambio en el nivel del agua de los pozos. Pérdida de control en las personas que guían vehículos motorizados.
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 las 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. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes. Invasión del agua de los ríos sobre las 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 cota de nivel (ríos, lagos y mares). Objetos lanzados en el aire hacia arriba.

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Magnitudes de la escala y la equivalente en energía liberada**

Magnitud Richter (M _L o M _S)	Magnitud de momento	Equivalencia de la energía TNT	Referencias
-1,5		1 g	Rotura de una roca en una mesa de laboratorio.
1,0		170 g	Pequeña explosión en un sitio de construcción.
1,5		910 g	Bomba convencional de la segunda guerra mundial.
2,0		6 Kg	Explosión de un tanque de gas butano
2,5		29 Kg	Bombardeo a la ciudad de Londres
3,0		181 Kg	Explosión de una planta de gas
3,5		455 Kg	Explosión de una mina
4,0		6 ton	Bomba atómica de baja potencia
5,0		199 ton	Terremoto de Lorca, Murcia, España, 2011
5,5		500 ton	Terremoto de El Calvario, Colombia, 2008
6,0		1 270 ton	Terremoto de Double Spring Flat, Nevada, EEUU, 1994
6,5		31 550 ton	Terremoto de Guerrero, México, 2011
	7,0	199 000 ton	Terremoto de Puerto Príncipe, Haití, 2010
	7,5	750 000 ton	Terremoto de Guatemala, 1976
	8,0	10 120 000 ton	Terremoto de Perú, 2007
	8,5	31 55 millones ton	Terremoto de Sumatra, 2007
	9,0	240 millones ton	Terremoto de Japón, 2011
	9,5	290 millones ton	Terremoto de Valdivia, Chile, 1960
	10,0	630 millones ton	Estimado para el choque de un meteorito rocoso de 2 km de diámetro que impacte a 25 km/s.
	12,0	1 000 millones ton = 10 ⁶ megatonnes = 1 teratón	Fractura de la tierra por el centro.
	13,0	10 ⁸ megatonnes = 100 teratonnes	Impacto en la Península de Yucatán que causó el cráter de Chicxulub hace 65 millones de años
	25,0	1 200 000 trillones de bombas nucleares de Hiroshima	Impacto de Theia hace 4530 millones de años. No hay lugar preciso del impacto debido al tamaño del planetóide.
	32,0	1.5 x 10 ⁴³ ton	Estallido de rayos gamma de la Magnetar SGR 1806-20, registrado el 27 de diciembre de 2004. Terremoto similar a los de la superficie solar.

Fuente: USGS: *FAQ- Measuring Earthquakes.*

Los daños dependen de factores como la naturaleza del sustrato, tipo de construcción y de la densidad de población.

La intensidad sísmica de una zona depende de distintos factores:

- Distancia del sitio al epicentro, mientras más lejos se encuentre del epicentro menor será la intensidad, menor serán los efectos.
- Del tipo de suelo en que se encuentran las edificaciones, los suelos blandos pueden amplificar las ondas sísmicas causando más daño.
- De la topografía del lugar. Por ejemplo, si una construcción se encuentra en el borde de una ladera, tendrá mayor probabilidad de daño que una que se encuentre en un terreno completamente plano.
- Calidad y resistencia de las estructuras, una edificación que es sismoresistente, presentará menos daño que una que no lo es.
- Grado de preparación de la gente y las autoridades relacionadas con protección civil, en el sentido de saber tomar precauciones para evitar accidentes.
- Densidad de población.

La aparición de riesgos derivados, a veces más peligrosos que la propia magnitud pueden ser: daños en los edificios por agrietamiento o desplome de los mismos, daños en las vías de comunicación (puentes, carreteras, etc.) lo que dificulta las medidas de evacuación. Inestabilidad de las laderas, tanto continentales como submarinas y rotura de presas provocando riesgo de inundaciones. Efecto de licuefacción, tsunamis (olas gigantes producidas como consecuencia de un maremoto), *seiches* u olas inducidas en las aguas continentales, desviación del cauce de los ríos y desaparición de acuíferos, en el seno de las rocas que los albergaban.

4.5. Sismicidad y amenaza sísmica

La planicie costera del Pacífico se caracteriza por la conformación sismotécnica, proximidad a límites convergentes de placas (placas de Cocos, Caribe y Norteamérica) y por poseer una alta sismicidad, debido a los movimientos relativos de las placas, que varían de 2 a 9 cm/año y que están acompañados por vulcanismo activo y alta sismicidad superficial e intermedia. Esto se observa en que la mayoría de sismos ocurren principalmente a lo largo de la zona de subducción y el arco volcánico.

La amenaza sísmica de un emplazamiento se define como la probabilidad de excedencia de un determinado nivel de movimiento del terreno, como resultado de la acción de terremotos en el área de influencia, durante un periodo especificado.

Según esta definición, la amenaza es un concepto probabilista, en el que se debe especificar qué nivel de movimiento del suelo se considera constitutivo de peligro potencial y durante qué periodo de tiempo se espera que ocurra un sismo que produzca tal movimiento.

Para caracterizar dicho movimiento se consideran generalmente parámetros cinemáticos como la aceleración, velocidad o desplazamiento, bien sean los valores máximo de las correspondientes historias temporales o los valores espectrales. La figura 34 muestra la amenaza sísmica de la zona en estudio, la cual se encuentra descrita como alta en la mayor parte de la región.

La zona en estudio se encuentra sobre la región sísmica denominada tipo zona 4,2, donde el índice de sismicidad es igual a 4,0 ($I_0 = 4,0$), medida relativa de la severidad esperada del sismo en una localidad. Este es un índice que trata sobre el nivel de protección sísmica que se hace necesario para diseñar edificaciones o cualquier tipo de obras. En el anexo 1 se incluye el listado de amenaza sísmica por municipio, dentro de la planicie costera del Pacífico de Guatemala.

Para efectos de las normas establecidas por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), el territorio de la República de Guatemala se divide en macrozonas caracterizadas por el índice de sismicidad que varía de 2 a 4. La figura 35 muestra la distribución geográfica del índice de sismicidad de acuerdo al mapa base de microzonificación sísmica de la República.

La zona en estudio se encuentra afectada por los movimientos de las zonas sismogénicas mencionadas en los siguientes subtítulos (en el anexo 2 se presentan los mapas de zonificación sísmica centroamericano).

4.5.1. Zonas corticales o superficiales (0 a 25 km)

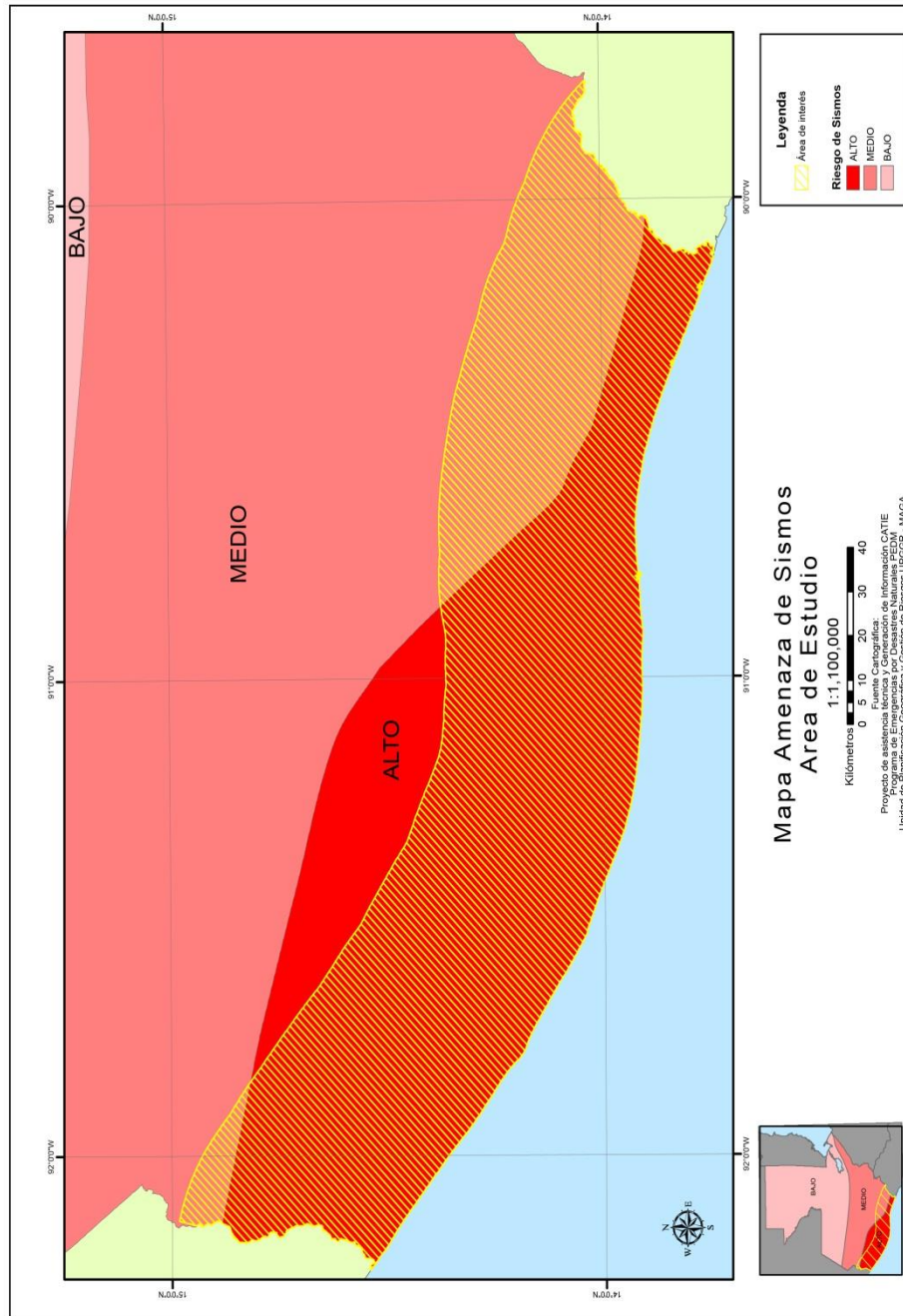
Guatemala – Pacífico Central (G1). Comprende la parte superficial de la subducción en el límite Cocos-Caribe (CO-CA), entre la Fosa Mesoamericana y la línea de costa. El evento más grande ocurrido es el de abril de 1902 en el Sur-Occidente de Guatemala con una Mw 7.4. En esta parte del contacto CO-CA han sido reportados sismos con mecanismos focales de carácter normal y de rumbo. El periodo medio entre grandes eventos, en la parte superficial e interplacas de la subducción, ha sido estimado entre 70 a 150 años.

Guatemala-El Salvador antearco (G2-S2). Comprende la franja costera entre la cadena volcánica y la línea de costa de Guatemala y El Salvador. La sismicidad es baja y espacialmente muy dispersa. Se incluyó con la sismicidad de fondo localizada en esta zona. No hay información de eventos grandes o que hayan causados daños importantes con epicentro en esta zona.

Guatemala arco volcánico oeste (G3). Es la franja de aproximadamente 40 km de ancho que incluye el arco volcánico, desde el volcán Tacaná en la frontera con México hasta el volcán de Atitlán más o menos en el centro del arco. La sismicidad en esta parte del arco es menor que en la sección este del mismo.

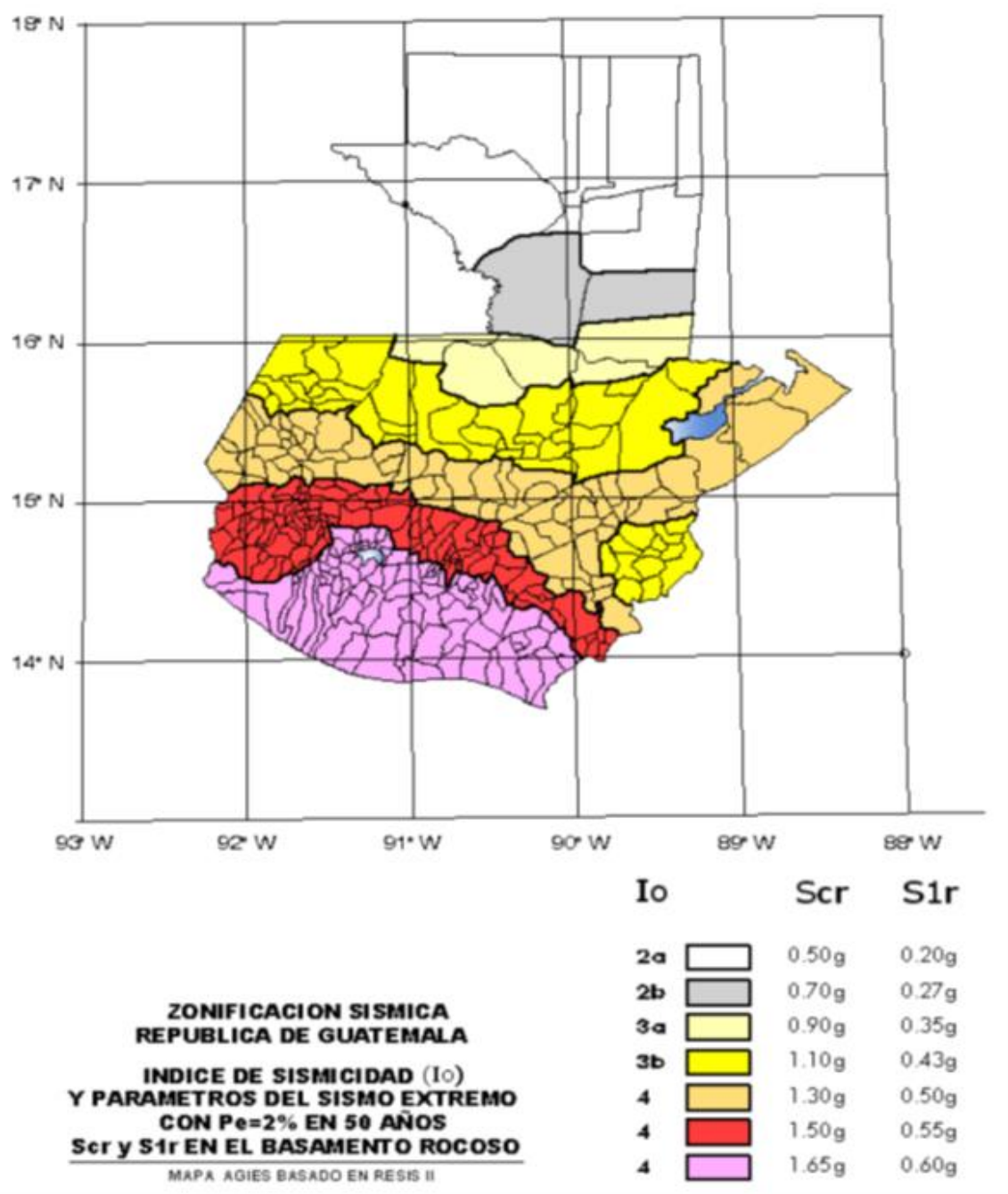
Guatemala arco volcánico este (G4). Para las fallas en la franja del arco volcánico, investigaciones encontraron que el evento de 1930 en el SE de Guatemala con Mw 6,9, es el mayor asociado a este sistema en toda la región. Durante el siglo XX los eventos destructores originados en este ambiente tectónico ocurrieron en promedio cada 2,5 años en Centroamérica. Esta sección del arco volcánico también se caracteriza por la ocurrencia de actividad sísmica tipo enjambre.

Figura 34. **Mapa de zonificación de la amenaza sísmica en la planicie costera del Pacífico de Guatemala**



Fuente: elaboración propia, con programa de GIS.

Figura 35. Mapa base de microzonificación sísmica de la República de Guatemala



Fuente: AGIES NSE 2-10, Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección.

4.5.2. Zonas sísmicas de la región interplaca (subducción)

Guatemala, interplaca (GSI9). Esta zona corresponde a la subducción entre 25 y 60 km de profundidad y un ángulo de inclinación de 30°. En esta parte la mayoría de eventos tienen mecanismos focales de falla inversa. El mayor evento registrado en esta zona es el de 1942, Ms 7,7 que afectó el centro y occidente del altiplano de Guatemala. El periodo medio entre grandes eventos ha sido estimado entre 70 a 150 años. En el cálculo final de la amenaza se agregó otra porción de la subducción interplaca para incluir la sismicidad en Chiapas, México.

4.5.3. Zonas sísmicas de la región intraplaca (subducción)

Guatemala, intraplaca (GSP10). Esta es la parte de la subducción con profundidad mayor a los 60 km y un ángulo de inclinación de 60°. Los eventos más profundos alcanzan los 250 km. La mayoría de los eventos se caracterizan por mecanismo focales de falla normal. El mayor evento registrado en este tipo de zona es el de El Salvador del 2001, Mw 7,6.

4.6. Factores de riesgo

El riesgo sísmico de una zona está relacionado también con todos los factores mencionados anteriormente además de uno evidente: situación tectónica de la zona, que la hará más o menos favorable para la formación de los sismos.

4.7. Localización de un sismo

Los sismos se localizan mediante diferentes técnicas. Una de las metodologías utilizadas, ahora en desuso, es la de establecer la diferencia de tiempos de llegada de ondas P y S a una estación. Ambas ondas se han producido en un mismo momento en el foco sísmico (t_0), pero llegan con diferentes tiempos a la estación receptora, porque tienen diferentes velocidades de propagación. Considerando la diferencia de velocidades entre ambas ondas, es posible calcular la distancia del foco sísmico a la estación que ha localizado ese sismo. Si se utiliza un mínimo de tres estaciones se puede triangular la posición del sismo y por tanto localizarlo.

La hora GMT es otro de los recursos que se pueden utilizar para realizar estos cálculos. Es la hora media en Greenwich u hora GMT (Greenwich mean time). Es la hora a partir de la cual, se miden todas las otras que recorren el globo, sumando una hora hacia el este y restándola hacia el oeste.

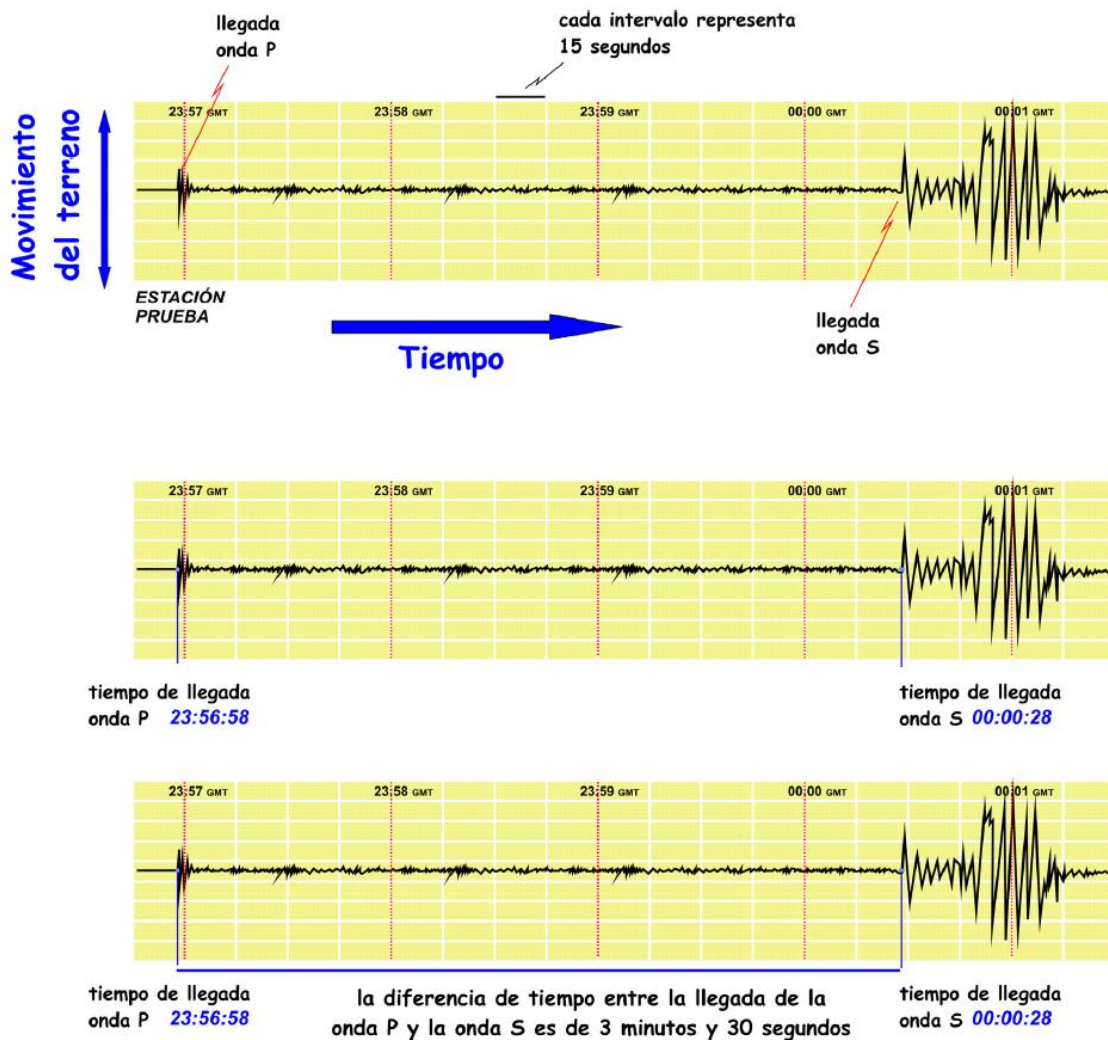
En todas las redes sísmicas del mundo se utiliza esta hora en los sismógrafos, de esta forma se pueden utilizar los registros de sismógrafos situados en diferentes zonas horarias sin necesidad de cambios de hora complejos. Esta hora es conocida también como hora zulú, utilizada en aviación y también por el ejército norteamericano. Este último al tener bases y navíos en diferentes partes del mundo, utiliza esta hora para evitar confusiones horarias.

Para localizar entonces un sismo se deben seguir una serie de pasos:

- En los registros sísmicos de cada estación, se debe medir la diferencia de tiempos de llegada entre las ondas P y las ondas S y definir el intervalo de la llegada de las ondas.

Esta diferencia se puede calcular bien definiendo el tiempo exacto de llegada de cada onda o bien midiendo la distancia entre la llegada de la onda P y la onda S, y calculando a cuanto equivale en segundos utilizando la escala que se presenta.

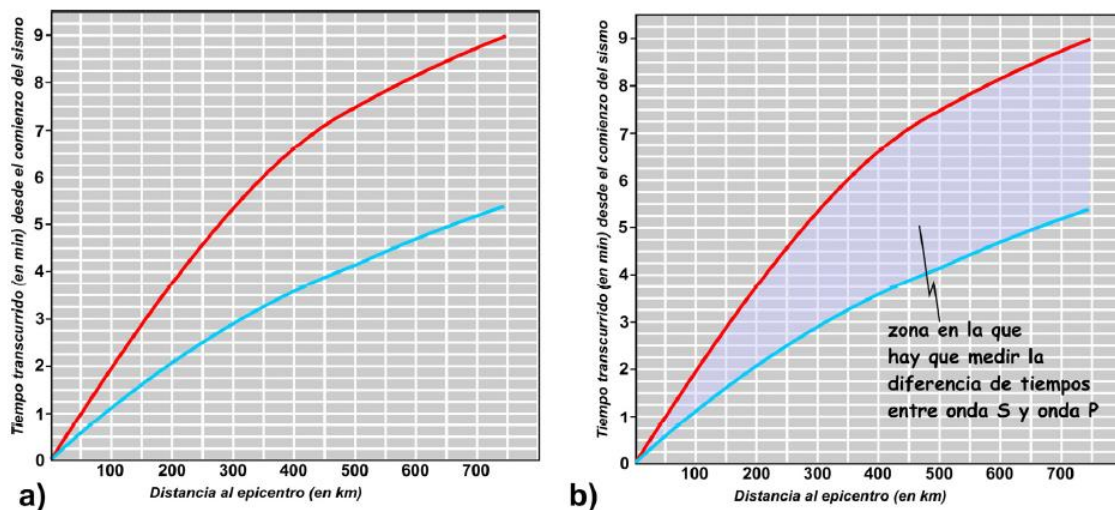
Figura 36. Esquema de un registro sísmico



Fuente: *Localización de un sismo*. p. 2.

- Una vez definidos los tiempos entre la llegada de las ondas S y P, estos tiempos deben representarse en un gráfico de velocidades, que representa el tiempo que tardan en recorrer las ondas P y las S una distancia dada. En el gráfico, el espacio que queda entre las dos curvas define la diferencia de tiempo de llegada entre la onda P y la onda S. La línea roja corresponde a la onda S y la línea azul a la de las ondas P. Se representa esa diferencia de tiempo entre las dos curvas: se localiza el punto en el que las dos curvas estén separadas por los valores de tiempo definidos en los sismogramas (a escala con respecto al eje de las ordenadas) y, se puede leer directamente en el eje de las abscisas la distancia de cada una de las estaciones al epicentro del terremoto.

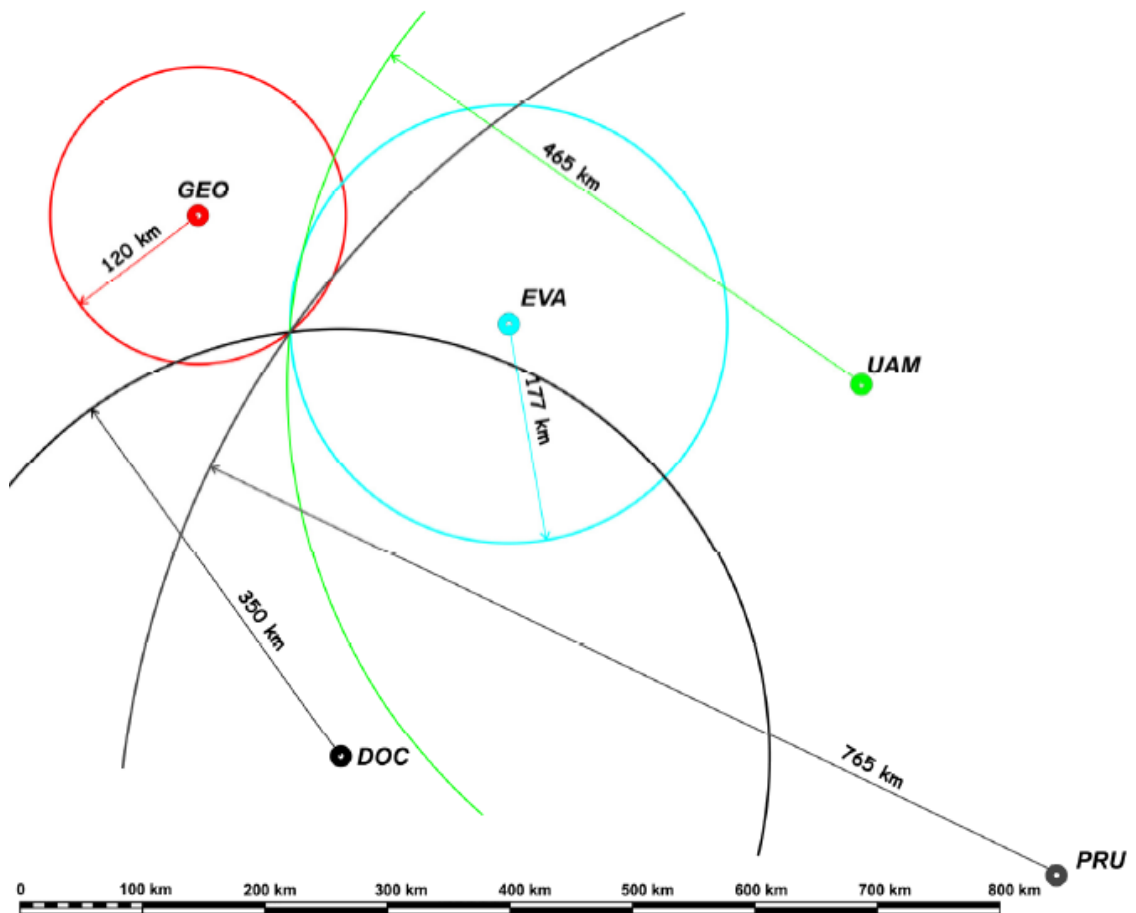
Figura 37. **Curva de velocidades generada de la información obtenida del esquema del registro sísmico**



Fuente: *Localización de un sismo*. p. 4.

- Una vez definidas las distancias de cada estación al epicentro del terremoto, se establece la posición del mismo. En un mapa se muestran la localización de las estaciones, y se dibuja a escala una circunferencia centrada en cada una de las estaciones el radio de la circunferencia debe de ser la distancia obtenida en el paso anterior. Es importante utilizar la escala adjunta al mapa. El punto donde se corten las circunferencias define la posición del epicentro del terremoto.

Figura 38. **Posición del epicentro de un terremoto, localizado a través del sistema de circunferencias**



Fuente: *Localización de un sismo*. p. 5.

4.8. Evento del 7 de noviembre de 2012

El pasado 7 de noviembre de 2012 a las 10 horas 35 minutos 47,8 segundos (hora local) se registró un evento de magnitud M_C 7,2 y VII en la escala de Mercalli Modificada, frente a las costas de Retalhuleu aproximadamente a 200 km de la ciudad capital. Catalogado como terremoto, causando los peores daños desde el terremoto de 1976, fue sensible en todo el territorio nacional, afectando principalmente la región sur-occidental y occidental del país. Se generó en la zona de subducción, en la cual en promedio, anualmente el 65 % a 70 % de los eventos sísmicos tienen origen en esta zona.

En febrero de 2013, el INSIVUMEH publicó el informe técnico sobre el acontecimiento que incluye un resumen del evento, gráficas, fotografías, conclusiones y recomendaciones, así como una breve historia de los eventos sísmicos más importantes en el país. Aunque en este informe no se concluye que el fenómeno de licuefacción se presentó en las zonas más afectadas, algunas fotografías tomadas en el lugar demuestran lo contrario.

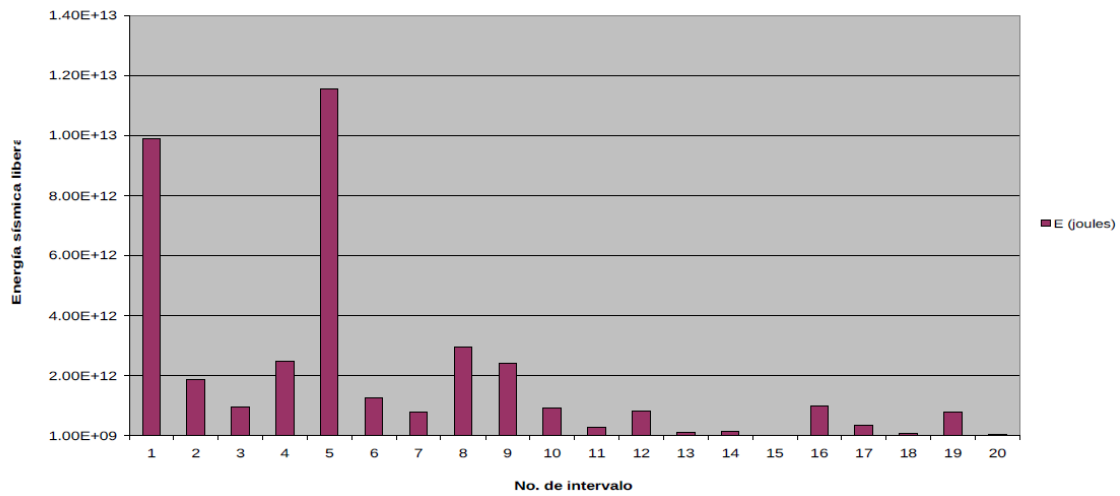
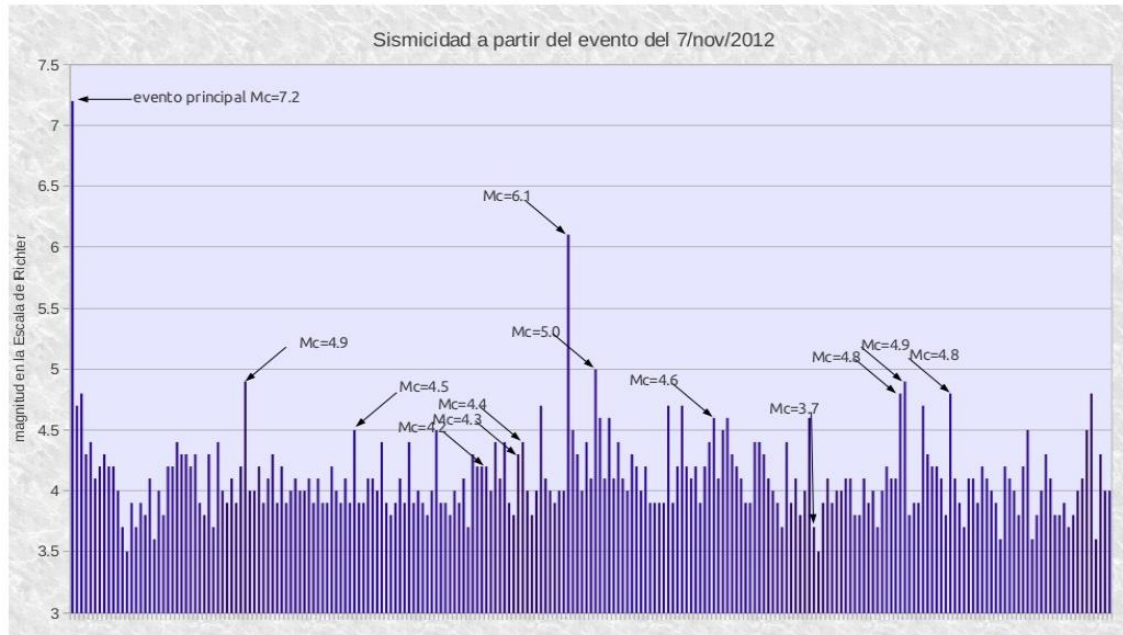
Las figuras siguientes muestran la ubicación del sismo, sismicidad generada en la zona a partir del evento y la energía liberada en cada uno de ellos.

Figura 39. **Ubicación del sismo M_C 7,2, latitud $14,05800^\circ N$, longitud $92,31200^\circ W$ y profundidad 33,2 km**



Fuente: INSIVUMEH: *Informe técnico final del sismo del 7 de noviembre de 2012.*

Figura 40. Sismicidad a partir del evento del 7 de noviembre de 2012 y energía sísmica liberada por las réplicas



Fuente: INSIVUMEH: Informe técnico final del sismo del 7 de noviembre de 2012.

5. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO

No todos los suelos son susceptibles de presentar licuefacción, así que el primer paso en el desarrollo de una evaluación de riesgo de licuefacción es la determinación de la susceptibilidad de la zona en estudio a sufrirla. La susceptibilidad de licuefacción de un suelo puede ser evaluada usando criterios históricos, geológicos, basados en la composición o según el estado:

- Criterios históricos: se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuefacción, observada en forma sistemática, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad de licuefacción, en un determinado lugar.
- Criterios geológicos: las condiciones geológicas también pueden indicar susceptibilidad de licuefacción, por ejemplo los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuefacción. También se ha observado licuefacción en depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, pero no de manera tan evidente como en los casos anteriores. Otro criterio geológico es la edad del depósito, en general los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles de licuefacción que los depósitos más antiguos.

- Criterios basados en la composición del suelo: la composición física de un suelo juega un importante papel en la determinación de la susceptibilidad de licuefacción. Las arenas uniformemente gradadas y limpias, compuestas principalmente de partículas redondeadas son intrínsecamente más susceptibles, mientras que los suelos bien gradados y los suelos con partículas angulares son menos susceptibles. La presencia de finos, particularmente finos plásticos ($IP > 10$), tiende a disminuir la susceptibilidad de licuefacción.
- Criterios basados en el estado del suelo: el potencial de licuefacción de un suelo también depende del estado, como las tensiones efectivas a las que está sometido y la densidad *in situ*, ya que la tendencia de un terreno a densificarse, bajo condiciones de carga cíclicas, depende de la densidad y de las tensiones efectivas. Los suelos sueltos son bastante más susceptibles de licuefacción que los suelos densos y, para una densidad dada, los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas altas son más susceptibles que los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas bajas.

5.1. Metodología

Reuniendo toda la información recopilada y con base en los criterios presentados anteriormente, ha sido posible establecer un procedimiento para determinar la susceptibilidad de la planicie costera del Pacífico de Guatemala a la licuefacción.

La zona total en estudio abarca 1300 km² y en toda la extensión las características geológicas, topográficas y sísmicas del suelo son similares.

Con la finalidad de presentar la metodología, del área de interés, por ser el departamento de mayor tamaño y población, se trabajó con la información del departamento de Escuintla. En el apéndice 1 se encuentra el diagrama de flujo con la metodología explicada a continuación y con los resultados del ejemplo situado en el departamento de Escuintla.

Una vez determinada el área de estudio, los pasos a seguir son sencillos pero requieren de la inversión de tiempo y muchas veces de inversión financiera también. En caso de no tener la experiencia, el soporte por parte de profesionales expertos en todas las áreas a explorar también será necesario.

Actualmente en Guatemala se cuentan con amplias bases de datos e información de carácter público en las cuales es posible consultar:

Tabla XI. **Entidades gubernamentales y no gubernamentales con información pública**

Parámetro	Entidad
Geología	CESEM, IGN, USGS
Geografía	CESEM, IGN, MAGA, INSIVUMEH, USGS, CONRED
Sismicidad	CESEM, INSIVUMEH, USGS, CONRED
Hidrología	IGN, MAGA, INSIVUMEH, USGS
Topografía	IGN, MAGA, USGS
Socioeconómico	INE, IGN, CONRED, ONG´s

Fuente: elaboración propia.

Cuando la información no está disponible será necesario hacer levantamientos topográficos, perforaciones, recorridos, encuestas y entrevistas locales y/o hacer uso de cualquier otra herramienta de apoyo para determinarla.

Una vez se tenga reunida toda la información básica del área de interés, se deben generar mapas para mostrar gráficamente todas las características investigadas. Los mapas son el mejor medio para mostrar resultados y tener acceso a la información de manera inmediata.

En el caso específico del departamento de Escuintla, con la información recopilada y de los resultados de sondeos privados realizados entre los años 1999 y 2002 fue posible establecer un perfil estratigráfico más detallado y determinar la altura del nivel freático (ver apéndice 1).

La determinación de la susceptibilidad se realiza con la ayuda de la tabla XI, marcando si cumple o no, el área de interés, con las condiciones necesarias para que la licuefacción se presente. Con más del 33 % de condiciones que el terreno cumpla, es posible decir que existe susceptibilidad y debe tomarse en cuenta para cualquier proyecto de obra civil en el área.

Una vez determinada la susceptibilidad o no del área en estudio, se procede a determinar el potencial de licuefacción con cualquiera de los métodos de campo utilizados y a recomendar acciones preventivas principalmente para los proyectos de obra civil que se requieran en la zona.

Tabla XII. **Tabla para la determinación de la susceptibilidad a la licuefacción de una zona dada**

Condición	SI	NO	Observaciones
Criterios históricos			
¿Se ha documentado licuefacción en la zona?			
¿Se ha detectado recurrentemente en el /los mismo (s) puntos?			
¿Se ha detectado más de un punto?			
¿Se han documentado eventos sísmicos en la zona?			
¿Han sido estos eventos regulares o de alto impacto?			
Criterios geológicos			
¿La zona se ubica principalmente en zona costera?			
¿La zona se ubica dentro de una cuenca hidrológica importante (sistemas fluviales, lacustres o fluvio-lacustres)?			
¿Las características de la estructura hidrológica subterránea son favorables para el flujo/almacenamiento de fluidos?			
¿El nivel freático es mayor a 6 pero menor a 10 metros?			
¿La zona se ubica cercana a playas, barras arenosas?			
¿Es la zona considerada alta o medianamente sísmica?			
¿Es la zona de historia geológica reciente?			
Composición y estado del suelo			
¿Los elementos que componen el suelo son mayormente arenas?			
¿El suelo se compone de un 95 % o más de sílica?			
¿Son las arenas de grano fino a medio?			

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo a los resultados obtenidos del ejemplo de Escuintla y por las características tanto geográficas, topográficas, sísmicas, hidrológicas e historia geológica, la planicie costera del Pacífico de Guatemala es un área susceptible en toda la extensión de estudio a la licuefacción.
2. En un país como Guatemala, principalmente con historial sísmico importante, el estudio del fenómeno de la licuefacción, basados en el daño que puede ocasionar en el terreno, es de gran importancia y brinda información necesaria para la toma de mejores decisiones al momento de diseñar cualquier estructura.
3. En las entidades gubernamentales y algunas no gubernamentales es posible acceder a información básica para realizar un estudio de licuefacción, tal como información geológica, hidrológica y topográfica, pero para realizar estudios más profundos no existen sondeos nacionales para conocer las características específicas por lugar. Todos los departamentos de la zona de interés a excepción de Escuintla, no posee información.
4. De la investigación realizada, toda la extensión de la planicie costera del Pacífico de Guatemala presenta las mismas características geomorfológicas (material aluvial del periodo cuaternario), lo que hizo posible realizar una práctica puntual y extender el resultado al resto del área.

RECOMENDACIONES

1. El sismo del 7 de noviembre de 2012 y los efectos derivados, puede ser tomado como una referencia de los aspectos a cambiar para una reconstrucción eficiente y segura. Por ejemplo, tomar en cuenta las áreas con mayor potencial a sufrir daños por las características geológicas del terreno y la susceptibilidad a la licuefacción que tenga.
2. Proponer a partir de la entrega de este documento, un proyecto que puede ser trabajado en conjunto con la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, consultores de la AGIES y representantes de las municipalidades, para realizar un mapa de susceptibilidades a nivel nacional y a detalle por departamento, para que esta información sea utilizada en el diseño de obras civiles, dando prioridad a aquellas áreas con mayor susceptibilidad.
3. El código AGIES menciona la importancia de la determinación del potencial a la licuefacción, se deben seguir los lineamientos dentro de cualquier proceso constructivo.
4. En el caso de viviendas para uso familiar construidas directamente por el dueño, la Municipalidad correspondiente, durante los trámites de rigor, puede ayudar a la población brindando la información acerca del área donde será llevada a cabo la construcción y así, realizar una obra tomando en cuenta todos los factores de seguridad.

5. Capacitar a las oficinas técnicas encargadas de autorizar y supervisar obras locales o regionales y educar a la población con respecto a este tema.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALVA HURTADO, Jorge E. *Licucción de suelos en Perú*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería y Centro Peruano-Japonés de Investigación Sísmica y mitigación de desastres, 2010. 31 p.
2. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. *Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la República de Guatemala*. Guatemala: AGIES, 2010. 498 p.
3. BOWLES, Joseph E. *Propiedades geofísicas de los suelos*. Colombia: McGraw-Hill, 1982. 490 p.
4. DÍAZ R., Abraham; WECKMANN, O.; ITURBE, R. *Licuefacción de arenas, primera parte*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM, 1973. 319 p.
5. Dirección General de Cartografía. *Diccionario Geográfico de Guatemala*. Guatemala: Instituto Geográfico Militar, 1981. 620 p.
6. GARAVITO, Fulgencio et al. *Evaluación técnica de las comunidades El Quetzalito, Mojanales, Las Vegas y Media Luna, afectados por inundaciones y proceso de licuefacción a causa del sismo del 28 de mayo del 2009*. Guatemala: INSIVUMEH, 2009. 28 p.

7. GARCÍA NÚÑEZ, Jesús Rafael. *Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas. Aplicación Tumaco (Colombia)*. España: Trabajo de graduación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cataluña, 2007. 87 p.
8. HOOSE, Seena N. et al. *Liquefaction-caused ground failure during the February 4, 1976, Guatemala earthquake*. Guatemala: Simposio Internacional sobre el Terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976 y su proceso de reconstrucción, 1976. 32 p.
9. HORST, Oscar H. *Sedimentación reciente en la planicie costera del suroeste de Guatemala y la relación con la actividad volcánica*. Guatemala: ICAITI, 1976. 30 p.
10. Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología et al. *Evaluación de la amenaza sísmica en Centro América: Proyecto RESIS II*. Guatemala: INSIVUMEH, 2008. 237 p.
11. *IV Censo Nacional Agropecuario. Número de fincas censales, existencia animal, producción pecuaria y características complementarias de la finca censal y del productor(a) agropecuario, Tomo IV*. Guatemala: INE, 2005. 365 p.
12. IRIS. *Eventos sísmicos de interés especial, Series educativas, No. 4*. [en línea]. <http://www.iris.edu>. [Consulta: noviembre de 2012].
13. KRYNINE, Dmitry P.; Judd, William R. *Principios de geología y geotecnia para ingenieros*. España: Omega, S. A., 1975. 829 p.

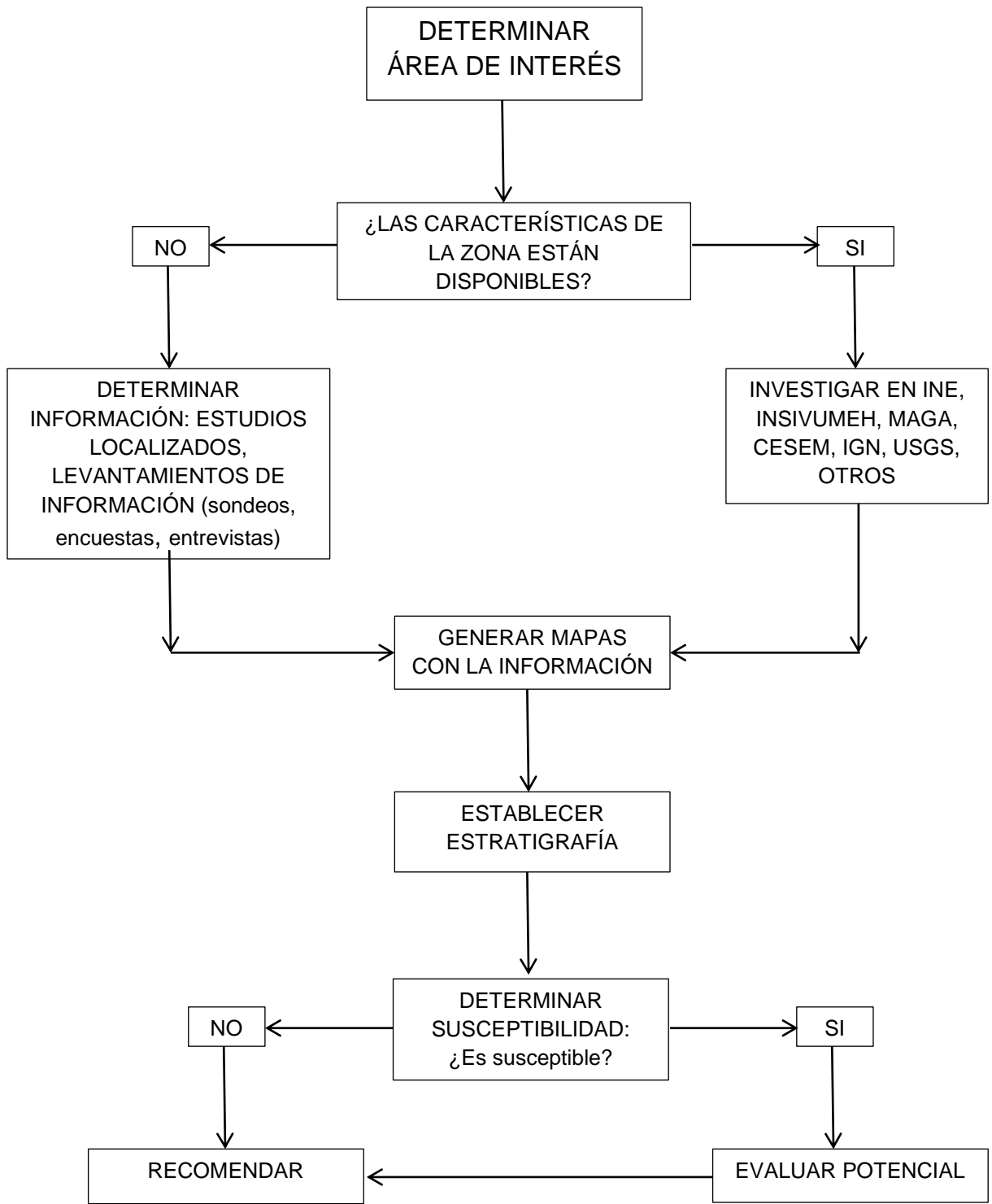
14. *Los diez mayores terremotos de la historia* [en línea]
http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Los_10_mayores_terremotos_de_la_historia. [Consulta: noviembre de 2012].
15. LUNA AROCHE, Julio Roberto et al. *Estudio de vulnerabilidad de la costa del Pacífico de Guatemala ante un posible ascenso del nivel del mar. Guatemala*. Guatemala: CESEM, 1995. 36 p.
16. OBANDO, Tupak. *Metodología y técnicas para la cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a sollicitaciones dinámicas. ejemplos de casos*. España: UNIA, 2009. 147 p.
17. PARRA MURRUGARRA, Denys. *Licuación de suelos y resistencia cíclica*. [en línea]. <http://www.scribd.com/doc/2567670/licuacion-de-suelos-y-resistencia-ciclica-ing>. [Consulta: julio de 2012].
18. Plan Regional de Pesca y Acuicultura Continental. *Inventario de cuerpos de agua continentales de Guatemala, con énfasis en la pesca y acuicultura*. Guatemala: PREPAC, 2005. 878 p.
19. RICHARDGENSUI et al. *Hidrografía de Guatemala* [en línea]. <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=53254634>. [Consulta: octubre 2012].
20. RODAS ALDANA, Erick José. *Susceptibilidad a la licuefacción por medio del sondeo de penetración estándar: Las Lisas, Chiquimulilla, Santa Rosa, Guatemala*. Trabajo de graduación de la Maestría en Ingeniería Geotécnica de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería; 2011. 156 p.

21. SANDOVAL VALLEJO, Eimar. *Resistencia a licuación de las arenas calcáreas*. Puerto Rico: Trabajo de graduación de la Universidad de Mayagüez, 2009. 80 p.
22. SIMMONS, Charles S.; PINTO Z., José Humberto. *Clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala*. Guatemala: José de Pineda Ibarra, 1959. 1000 p.
23. Unidad de investigación y servicios geofísicos departamento de sismología. *Informe técnico sobre el sismo de magnitud 7,2 del 7 de noviembre de 2012*. Guatemala: INSIVUMEH, 2012. 14 p.
24. USAID et al. *Informe de Proyecto: Evaluación del potencial de aguas subterráneas de la república de Guatemala a escala de reconocimiento (1:250,000), como apoyo al desarrollo del riego para la producción agrícola en comunidades de pequeños y medianos productores*. Guatemala: Cordillera, S. A., 2009. 60 p.

APÉNDICES

APÉNDICE 1

**Determinación de la susceptibilidad a la licuefacción en el departamento
de Escuintla**



Fuente: elaboración propia.

Departamento de Escuintla

Tabla A-1. Información básica del Departamento de Escuintla

Localización	Planicie costera del Pacífico de Guatemala, colinda al norte con los Departamento de Guatemala, Sacatepéquez y Chimaltenango, al sur con el océano Pacífico, al este con el departamento de Santa Rosa y al oeste con el departamento de Suchitepéquez
Extensión	4 384 km ²
Población	801 016 habitantes
Centros poblados más importantes	Pueblo Nuevo Tiquisate, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, José, Iztapa
Textura y composición de los sedimentos	Arenas (<1 milímetros), roca volcánica, plagioclasas, augita, hiperstena, feldespatos alcalinos, olivino, magnetita, oxihornblenda
Geología local	Principalmente aluviones cuaternarios (Qa)
Hidrología	Cuencas Ríos Madre Vieja, Achiguate, Acomé y María Linda
Topografía	Altitud media, 347 m sobre el nivel del mar
Clima	Cálido
Sismicidad	Alta

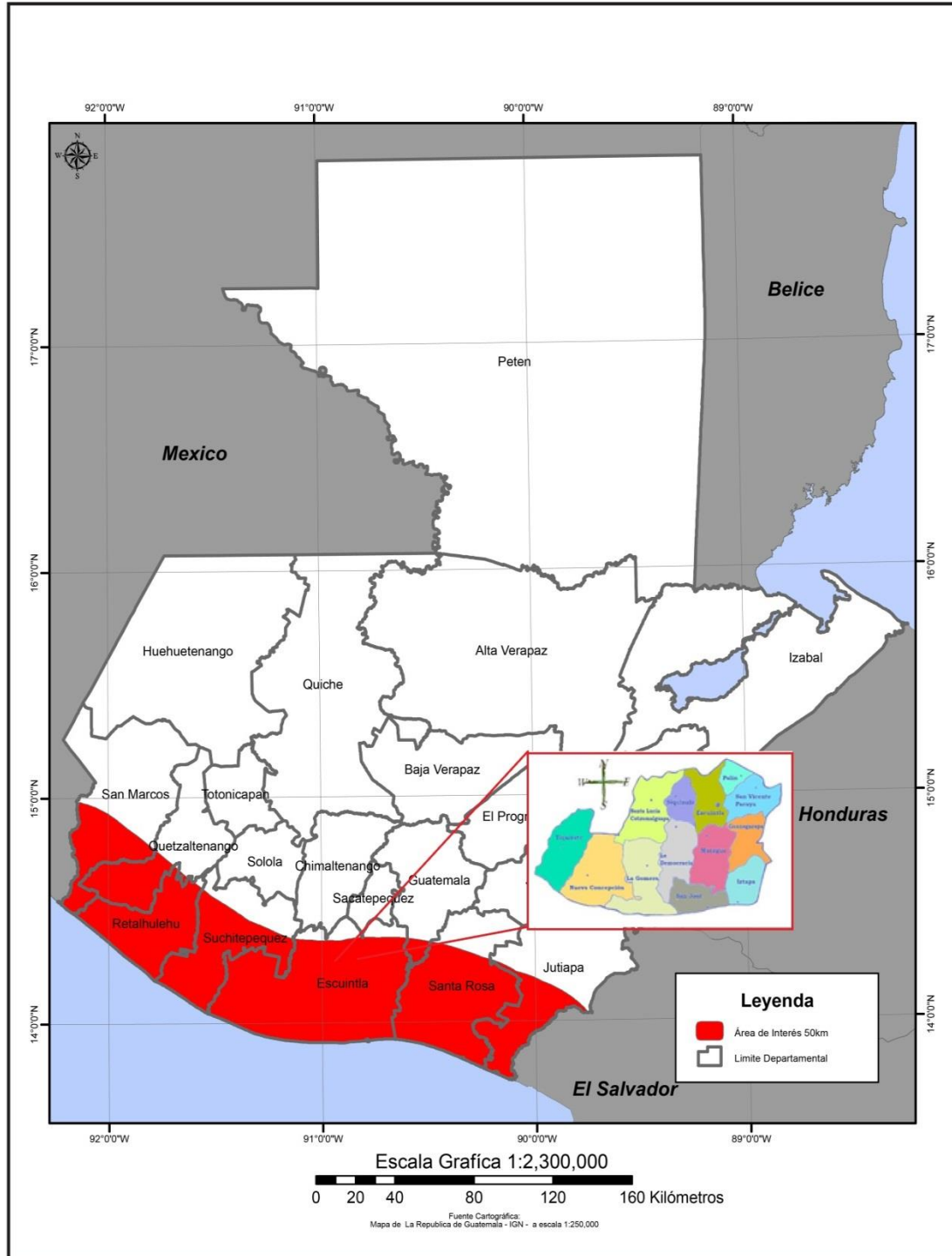
Fuente: elaboración propia.

Tabla A-2. Descripción detallada de la estratigrafía del Departamento de Escuintla

Profundidad, pies (metros)	Observaciones
0 – 1 (0,30)	Suelo orgánico
1 – 2 (0,61)	Limo arenoso color café
2 – 6 (1,83)	Arena fina color café
6 – 8 (2,43)	Arena fina color café
8 – 10 (3,04)	Limos inorgánicos y arena color café
10 – 16 (4,87)	Arena fina color negro
16 – 20 (6,10)	Limos inorgánicos y arena color café
20 – 30 (9,15)	Limos arcillosos color café
30 – 34 (10,36)	Arena fina color negra
34 – 60 (18,29)	Limos arenosos inorgánicos color negro

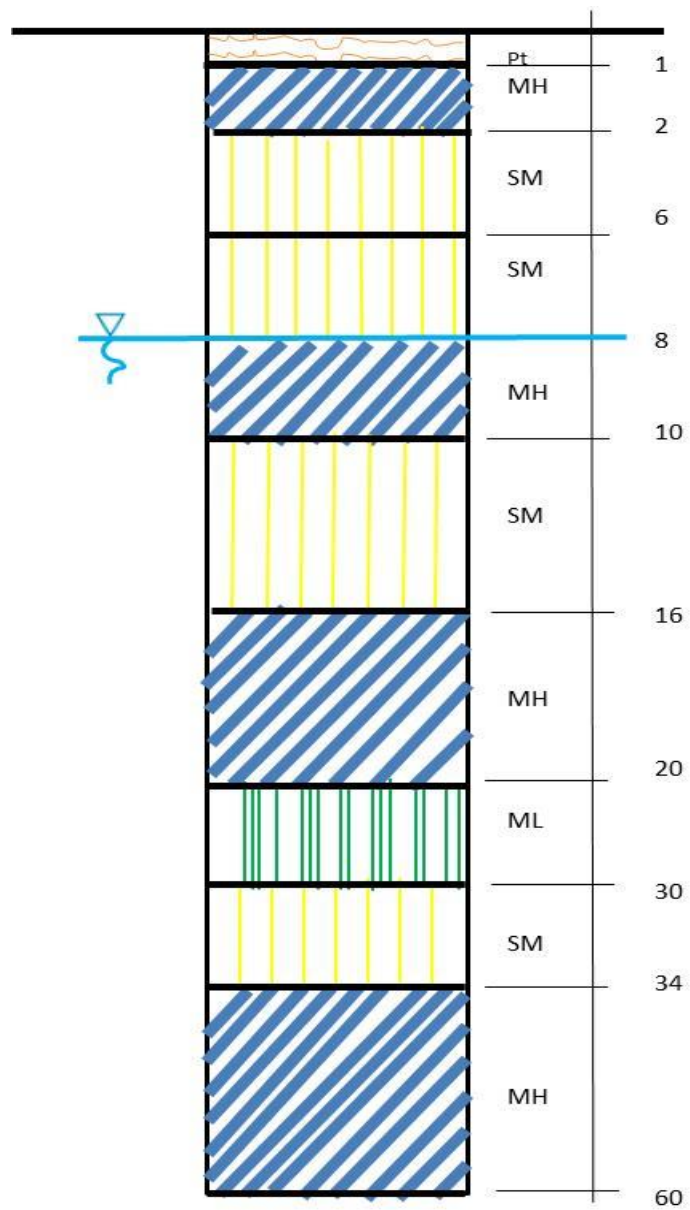
Fuente: elaboración propia, con base en información de sondeos privados de 1999 a 2002.

Figura A-1. Localización geográfica del área en estudio



Fuente: elaboración propia.

Figura A-2. **Columna estratigráfica detallada del Departamento de Escuintla**



Fuente: elaboración propia, con base en información de sondeos privados de 1999 a 2002.

SUSCEPTIBILIDAD

Condición	SI	NO	Observaciones
Criterios históricos			
¿Se ha documentado licuefacción en la zona?	X		
¿Se ha detectado recurrentemente en el /los mismo (s) puntos?	X		
¿Se ha detectado más de un punto?	X		
¿Se han documentado eventos sísmicos en la zona?	X		
¿Han sido estos eventos regulares o de alto impacto?	X		
Criterios geológicos			
¿La zona se ubica principalmente en zona costera?	X		
¿La zona se ubica dentro de una cuenca hidrológica importante (sistemas fluviales, lacustres o fluvio-lacustres)?	X		
¿Las características de la estructura hidrológica subterránea son favorables para el flujo/almacenamiento de fluidos?	X		
¿El nivel freático es mayor a 6 pero menor a 10 metros?	X		
¿La zona se ubica cercana a playas, barras arenosas?	X		
¿Es la zona considerada alta o medianamente sísmica?	X		
¿Es la zona de historia geológica reciente?	X		
Composición y estado del suelo			
¿Los elementos que componen el suelo son mayormente arenas?	X		
¿El suelo se compone de un 95 % o más de sílica?		X	Sectorizada
¿Son las arenas de grano fino a medio?	X		

CONCLUSIÓN

El departamento de Escuintla es susceptible en toda la extensión a sufrir licuefacción, principalmente dentro del área de la planicie costera del Pacífico.

RECOMENDACIONES

1. Ante cualquier proyecto urbano (obra civil de cualquier tamaño o función) es necesario tomar en cuenta que el terreno es susceptible a sufrir licuefacción, la cual puede ocasionar severos daños a las estructuras en el caso de no estar bien fundamentadas.
2. Se sugiere capacitar a las oficinas técnicas encargadas de autorizar y supervisar obras locales o regionales y educar a la población con respecto a este tema.
3. Los constructores deben tomar siempre como referencia toda la información que el código AGIES incluye sobre el tema.

APÉNDICE 2

Tabla de clasificación de suelos por departamento

Tabla A-3. **Tabla de grupos y subgrupos de suelos por departamento del área de estudio**

Departamento	GRUPO – Suelos de	Subgrupo - suelos
San Marcos Quetzaltenango	I. las montañas volcánicas II. la altiplanicie central III. del declive del Pacífico IV. del litoral del Pacífico V. Clases misceláneas de terreno	A. Bien drenados de textura pesada B. Mal drenados de textura pesada C. arenosos
Suchitepéquez	I. las montañas volcánicas II. del declive del Pacífico III. del litoral del Pacífico IV. Clases misceláneas de terreno	A. Bien drenados de textura pesada B. Mal drenados de textura pesada C. arenosos
Retalhuleu	I. del declive del Pacífico II. del litoral del Pacífico III. Clases misceláneas de terreno	A. Bien drenados de textura pesada B. Mal drenados de textura pesada C. arenosos
Escuintla	I. del declive del Pacífico II. del litoral del Pacífico III. Clases misceláneas de terreno	A. Bien drenados de textura pesada B. Arenosos bien drenados C. Mal drenados de textura pesada D. Arenosos mal drenados
Santa Rosa	I. de la altiplanicie central II. del declive del Pacífico III. del litoral del Pacífico IV. Clases misceláneas de terreno	A. Bien drenados de textura pesada B. Arenosos bien drenados C. Mal drenados de textura pesada D. Arenosos mal drenados
Jutiapa	I. la altiplanicie central II. del declive del Pacífico III. del litoral del Pacífico	A. Bien drenados B. Mal drenados

Fuente: elaboración propia, con base en información contenida en: *Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala*, p.59 - 120.

ANEXOS

ANEXO 1

LISTADO DE AMENAZA SÍSMICA POR MUNICIPIO

Referencia: Código AGIES NSE 2-10. Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección. Páginas 55 – 63.

Nomenclatura

I_0 = Índice de sismicidad

S_{CR} = Ordenada espectral de periodo corto del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés

S_{1R} = Ordenada espectral de periodo 1 segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés

No.	Municipio	Departamento	I ₀	S _{CT}	S _{1r}
1	Catarina	San Marcos*	4	1.50 g	0.55 g
2	El Quetzal		4	1.50 g	0.55 g
3	El Rodeo		4	1.50 g	0.55 g
4	El Tumbador		4	1.50 g	0.55 g
5	La Reforma		4	1.50 g	0.55 g
6	Malacatán		4	1.50 g	0.55 g
7	Ocós		4	1.65 g	0.60 g
8	Pajapita		4	1.50 g	0.55 g
9	San Pablo		4	1.50 g	0.55 g
10	Sipacapa		4	1.30 g	0.50 g
11	Coatepeque	Quetzaltenango	4	1.50 g	0.55 g
12	Colomba		4	1.50 g	0.55 g
13	Flores Costa Cuca		4	1.50 g	0.55 g
14	Génova		4	1.50 g	0.55 g
15	Champerico	Retalhuleu	4	1.65 g	0.60 g
16	El Asintal		4	1.50 g	0.55 g
17	Nuevo San Carlos		4	1.50 g	0.55 g
18	Retalhuleu		4	1.65 g	0.60 g
19	San Andrés Villa Seca		4	1.65 g	0.60 g
20	San Martín Zapotitlán		4	1.65 g	0.60 g
21	San Sebastián		4	1.65 g	0.60 g
22	Santa Cruz Muluá		4	1.65 g	0.60 g
23	Cuyotenango	Suchitepéquez	4	1.65 g	0.60 g
24	Mazatenango		4	1.65 g	0.60 g
25	Patulul		4	1.65 g	0.60 g
26	Río Bravo		4	1.65 g	0.60 g
27	San Gabriel		4	1.65 g	0.60 g
28	San José El Ídolo		4	1.65 g	0.60 g
29	San Juan Bautista		4	1.65 g	0.60 g
30	San Lorenzo		4	1.65 g	0.60 g
31	San Miguel Panán		4	1.65 g	0.60 g
32	Santa Bárbara		4	1.65 g	0.60 g
33	Santo Domingo Suchitepéquez		4	1.65 g	0.60 g

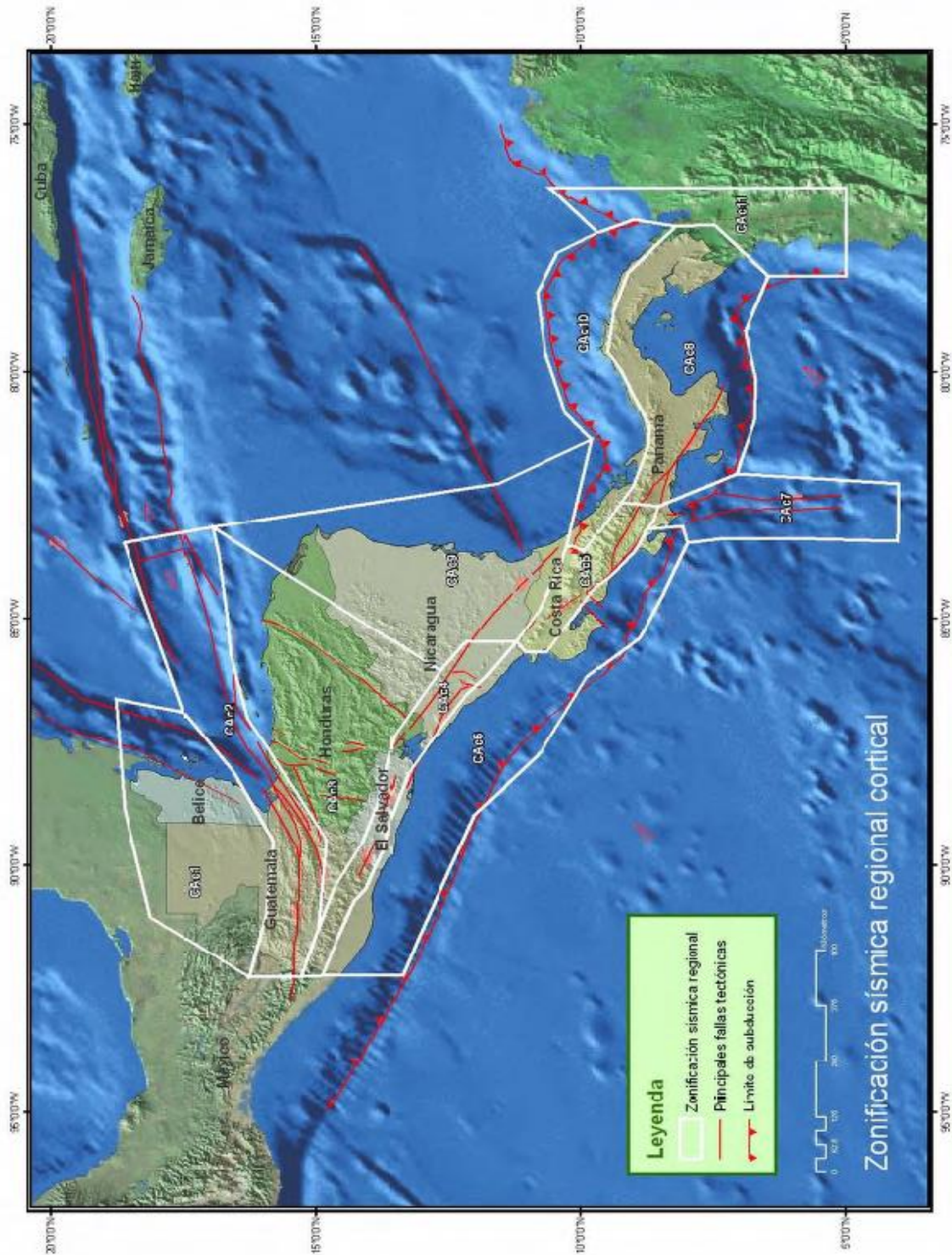
No.	Municipio	Departamento	I ₀	S _{CT}	S _{1r}
34	Escuintla	Escuintla	4	1.65 g	0.60 g
45	Guanagazapa		4	1.65 g	0.60 g
36	Iztapa		4	1.65 g	0.60 g
37	La Democracia		4	1.65 g	0.60 g
38	La Gomera		4	1.65 g	0.60 g
39	Masagua		4	1.65 g	0.60 g
40	Nueva Concepción		4	1.65 g	0.60 g
41	San José		4	1.65 g	0.60 g
42	San Vicente Pacaya		4	1.65 g	0.60 g
43	Santa Lucía Cotzumalguapa		4	1.65 g	0.60 g
44	Siquinalá		4	1.65 g	0.60 g
45	Tiquisate		4	1.65 g	0.60 g
46	Barberena	Santa Rosa	4	1.65 g	0.60 g
47	Chiquimulilla		4	1.65 g	0.60 g
48	Cuilapa		4	1.65 g	0.60 g
49	Guazacapán		4	1.65 g	0.60 g
50	Oratorio		4	1.65 g	0.60 g
51	Pueblo Nuevo Viñas		4	1.65 g	0.60 g
52	San Juan Texcuaco		4	1.65 g	0.60 g
53	Santa María Ixhucatán		4	1.65 g	0.60 g
54	Taxisco	4	1.65 g	0.60 g	
55	El Progreso	Jutiapa	4	1.30 g	0.50 g
56	Comapa		4	1.50 g	0.55 g
57	Jalpatagua		4	1.65 g	0.60 g
58	Pasaco		4	1.65 g	0.60 g

*Municipio La Blanca, San Marcos no aparece en este listado por ser localidad declarada Municipio según Decreto 1-2014 del 23 de Enero de 2014 y la tabla contiene información de la última actualización del Código AGIES en el 2010.

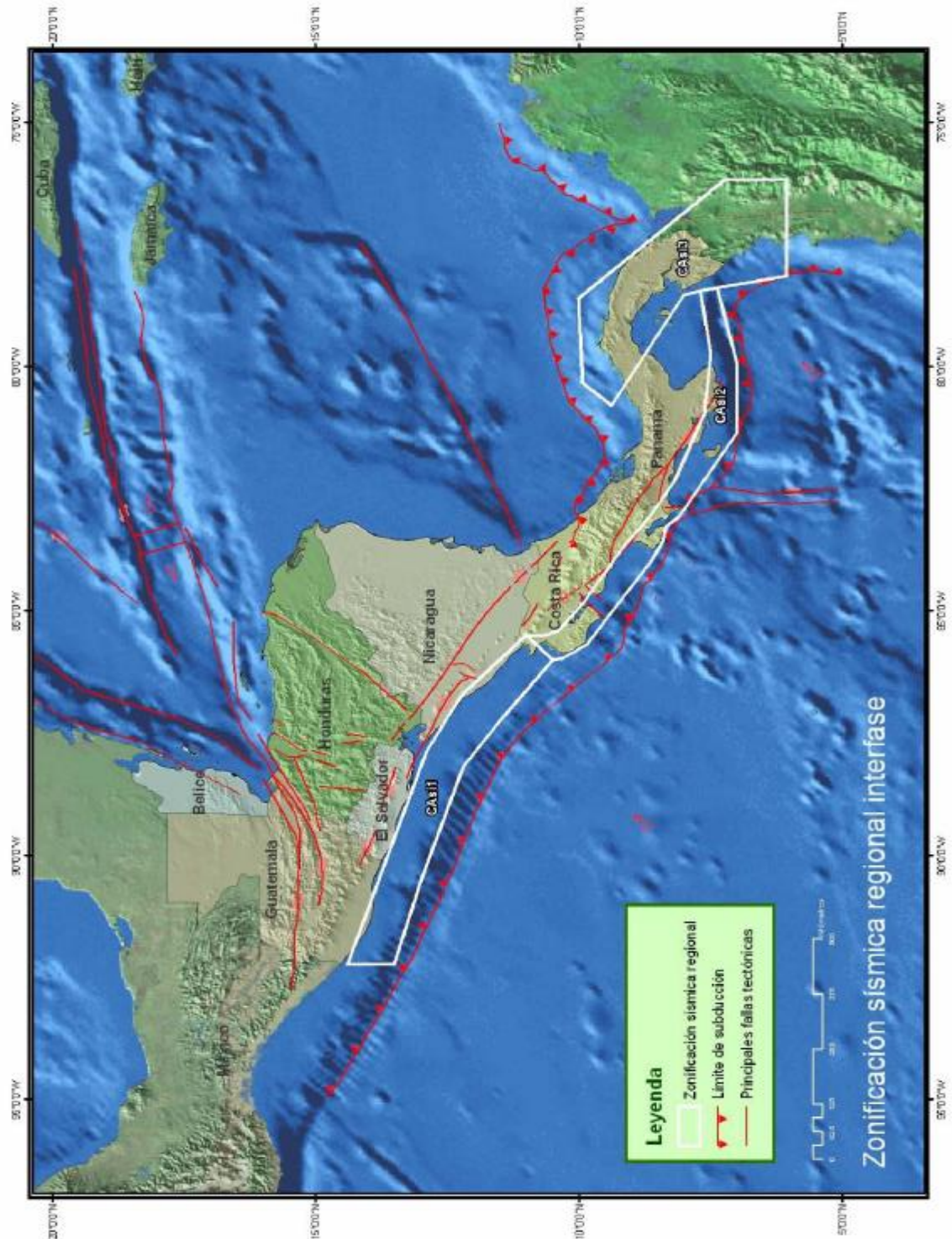
ANEXO 2
MAPAS DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA A DETALLE

Referencia: Proyecto RESIS II. Evaluación de la amenaza sísmica en Centro América. Abril 2008.

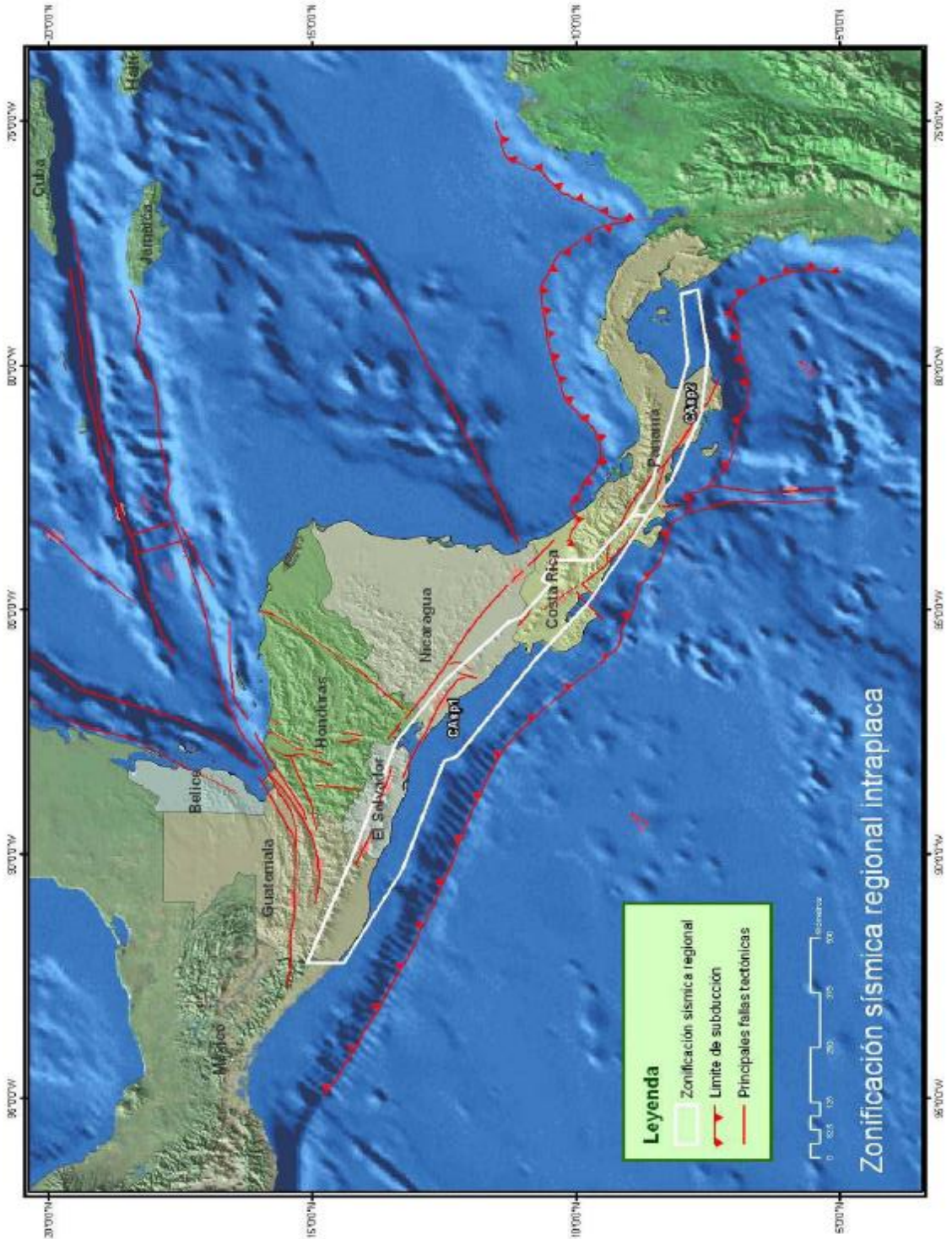
Zonas corticales superpuestas a la batimetría y tectónica de la región



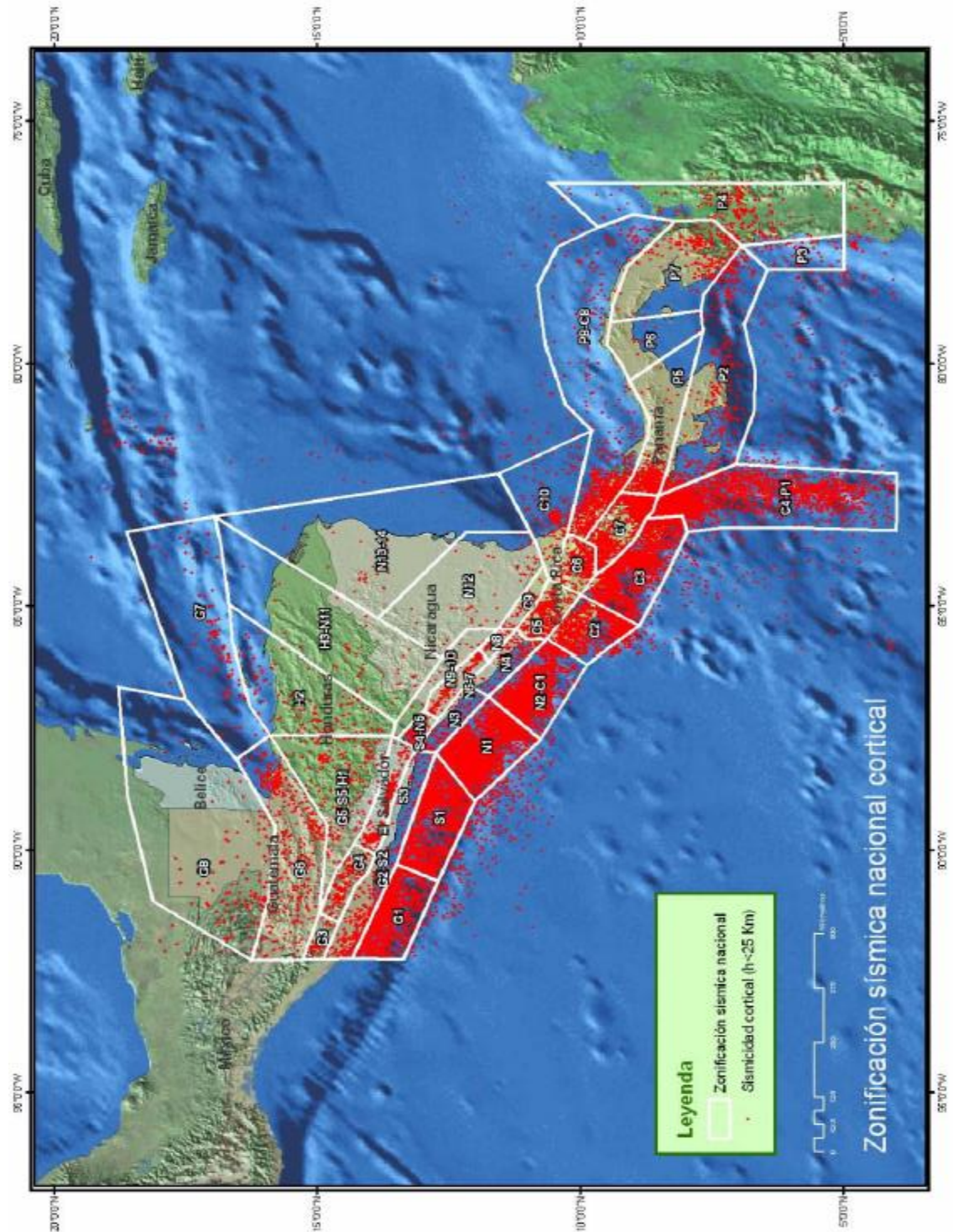
Zonas de subducción interfase superpuestas a la batimetría y tectónica de la región



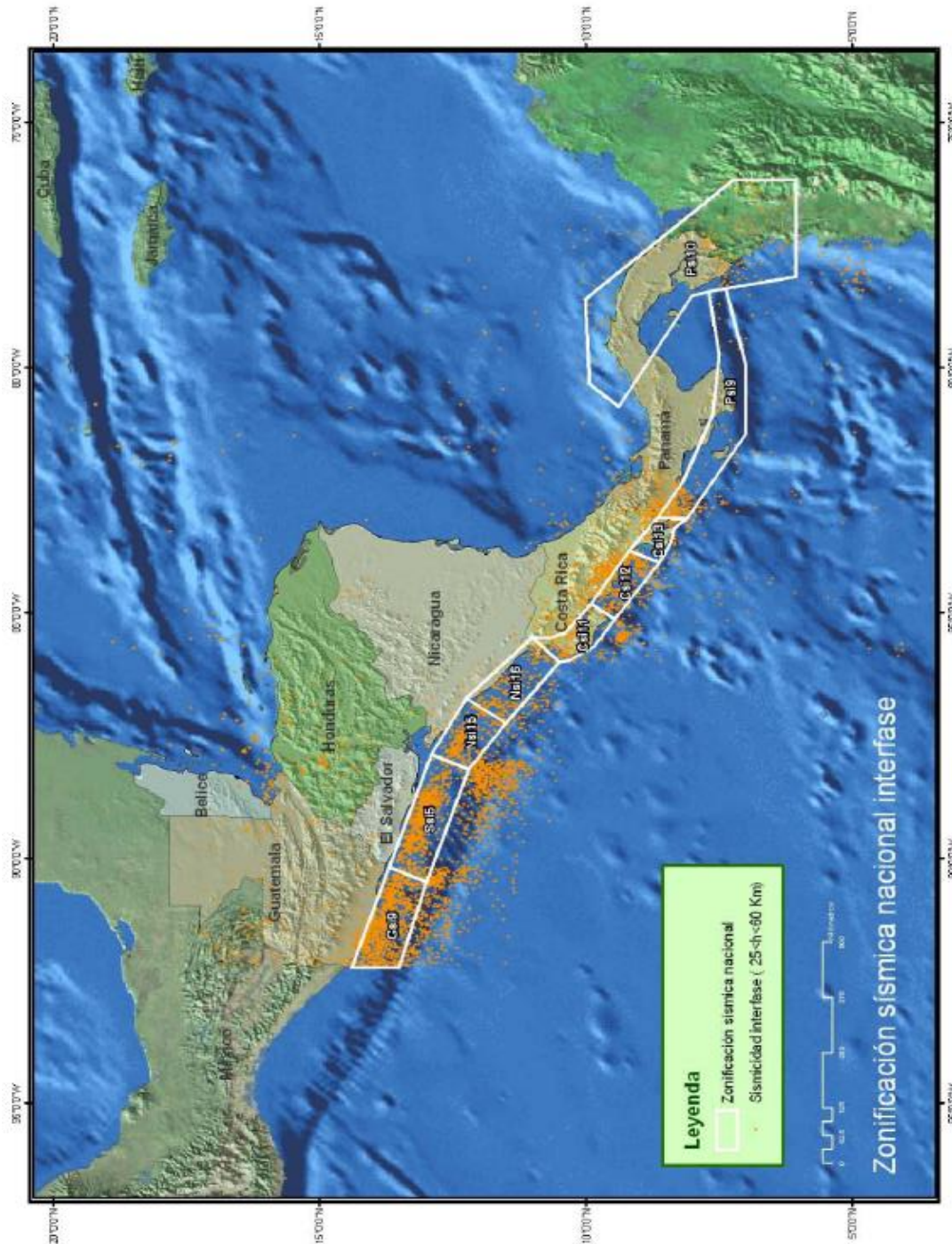
Zonas de subducción intraplaca superpuestas a la batimetría y tectónica de la región



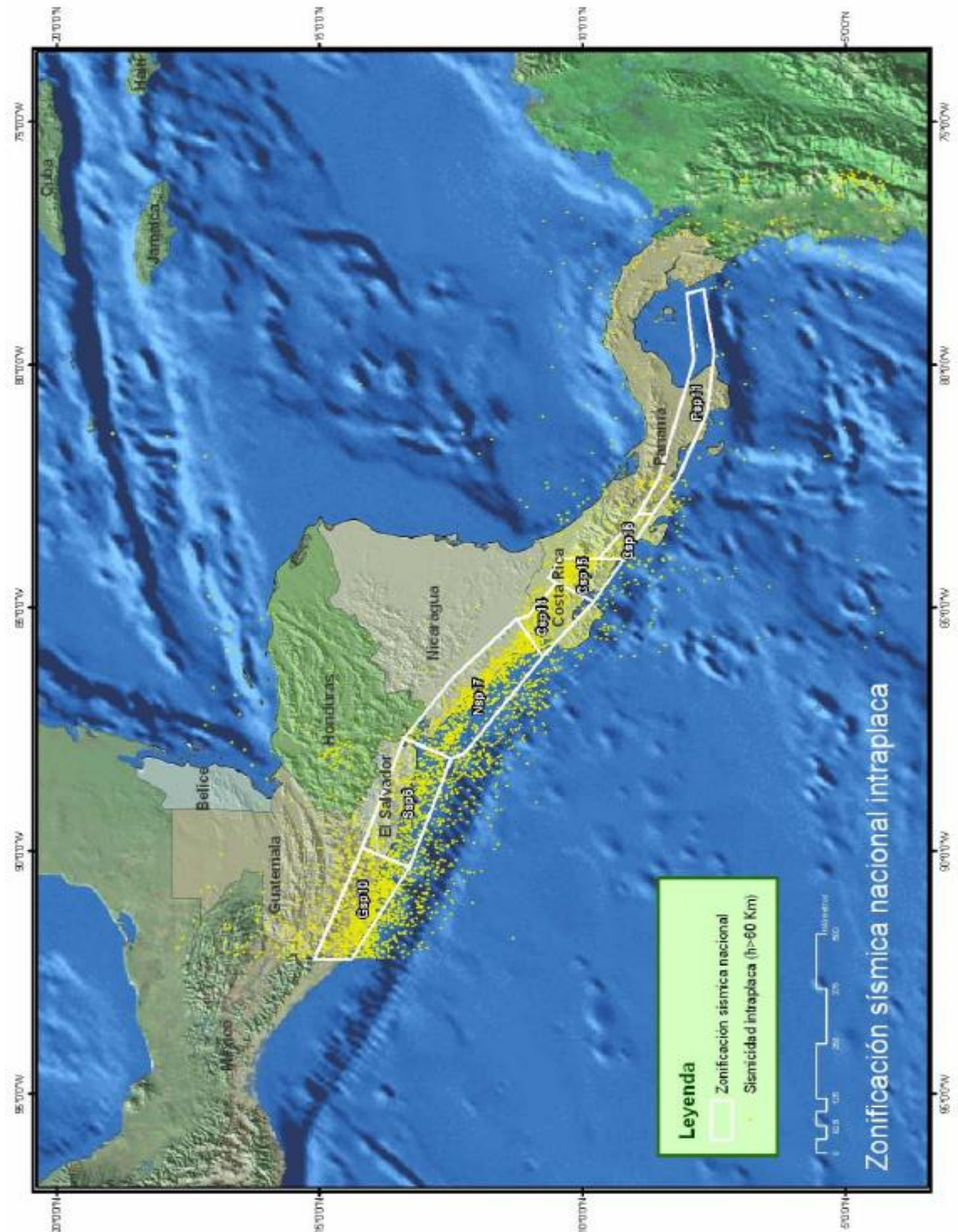
Zonas corticales superpuestas a la sismicidad superficial, con epicentros de sismos para profundidades $h < 25$ km



Zonas de subducción interfase superpuestas a la sismicidad intermedia superficial, con epicentros de sismos para profundidades $25 < h < 60$ km



**Zonas de subducción intraplaca superpuestas a la sismicidad profunda,
con epicentros de sismos para profundidades $h > 60$ km**



ANEXO 3
NOMENCLATURA DE LOS GRUPOS DE SUELOS

Referencia: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S)

Disponible en <http://www.unilibresoc.edu.co/mecsuelos/htm/cap5/figura3.htm>

DIVISIONES PRINCIPALES		SIMBOLOS			DENOMINACIONES USUALES	
		Letras	Anchurados	Color		
Suelos de grano grueso Más de la mitad es retenido en tamiz No. 200	Gravas y suelos gravillosos. Más del 50% de la fracción gruesa retenida por tamiz No. 4.	GW		ROJO	Gravas o gravas arenosas bien gradadas	
		GP			Gravas o gravas arenosas pobremente gradadas	
		GM		AMARILLO	Gravas limosas. Mezclas de grava-arena-limo	
		GC			Gravas arcillosas. Mezclas de grava-arena-arcilla	
	Arenas y suelos arenosos. Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por tamiz No. 4.	Arenas limpias (pocos o sin finos)	SW		ROJO	Arenas o arenas gravillosas bien gradadas
			SP			Arenas o arenas gravillosas pobremente gradadas
		Arenas con finos (bastantes finos)	SM		AMARILLO	Arenas limosas. Mezclas de arena y limo
			SC			Arenas arcillosas. Mezclas de arena-arcilla
Suelos de grano fino Más de la mitad pasa tamiz número 200	Suelos de limos y arcillas. Límite líquido 30	ML		VERDE	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas o limos arcillosos con ligera plasticidad	
		CL			Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravillosas, arcillas arenosas, arcillas pobres	
		OL			Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
	Suelos de limos y arcillas. Límite líquido 30	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenas finas diatómicas o micáceas, limos elásticos	MH		AZUL	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenas finas diatómicas o micáceas, limos elásticos
			CH			Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasosas
		Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos		OH		Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos
		Suelos orgánicos fibrosos		Pt		Naranja