



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica

**SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO
VILLALOBOS, MUNICIPIO DE VILLA CANALES, DEPARTAMENTO
DE GUATEMALA**

Inga. Brenda Luzelly Zeledon Franco

Asesorado por MSc. Ing. Julio Roberto Luna Aroche

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO
VILLALOBOS, MUNICIPIO DE VILLA CANALES, DEPARTAMENTO
DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

INGA. BRENDA LUZELLY ZELEDON FRANCO

ASESORADO POR: MSc. ING. JULIO ROBERTO LUNA AROCHE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magali Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Dario Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Julio Roberto Luna Aroche
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magali Herrera López

AGRADECIMIENTOS A:

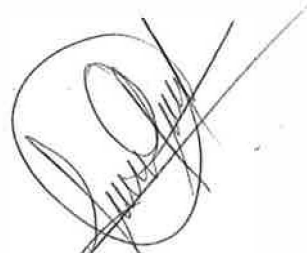
Dios	Por ser mi guía en cada paso, dejarme caer para aprender y siempre permitir levantarme.
Mi madre	Por su apoyo incondicional, por ser mi madre, te amo.
Profesionales	MSc. Ing. Julio Roberto Luna Aroche y MSc. Ing. Armando Fuentes Roca, por su valiosa colaboración en la asesoría para la realización del presente, y brindarme siempre la motivación para su culminación, a ambos gracias por su paciencia, enseñanzas, tiempo dedicado, amistad y profesionalismo en todo momento.
Ing. Civil Alfredo Beber Aceituno	Por su amistad, apoyo y enseñanzas interminables, para formarme mejor profesional cada día.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa formadora.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación para optar al grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería Geotécnica titulado:

**SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO
VILLALOBOS, MUNICIPIO DE VILLA CANALES, DEPARTAMENTO
DE GUATEMALA**

Tema que me fuera aprobado por la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 13 de noviembre de 2012.

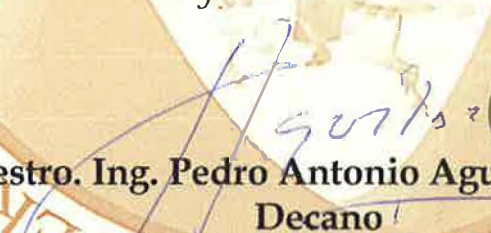
A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'B' and 'Z' intertwined, with several diagonal lines crossing through them.

Brenda Luzelly Zeledon Franco
Ingeniera Civil

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 Postgrado, al Trabajo de Tesis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica titulado: **"SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO VILLALOBOS, MUNICIPIO DE VILLA CANALES, DEPARTAMENTO DE GUATEMALA"** presentado por la Ingeniera Civil **Brenda Luzelly Zeledon Franco**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"


Maestro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, noviembre de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística al Trabajo de Tesis titulado **"SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO VILLALOBOS, MUNICIPIO DE VILLA CANALES, DEPARTAMENTO DE GUATEMALA"** presentado por la Ingeniera Civil Brenda Luzelly Zeledon Franco, correspondiente al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, noviembre de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

En mi calidad como Asesor de la Ingeniera Civil **Brenda Luzelly Zeledon Franco** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Tesis titulado **"SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO VILLALOBOS, MUNICIPIO DE VILLA CANALES, DEPARTAMENTO DE GUATEMALA"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Maestro. Ing. Julio Roberto Luna Aroche
Asesor(a)

Maestro en Ciencias con Especialidad en Geología

Guatemala, noviembre de 2018.

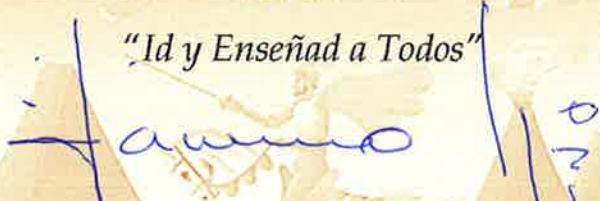
Cc: archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2018-039

Como Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Tesis titulado "SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO VILLALOBOS, MUNICIPIO DE VILLA CANALES, DEPARTAMENTO DE GUATEMALA" presentado por la Ingeniera Civil Brenda Luzelly Zeledon Franco.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Maestro. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador(a) de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, noviembre de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XII
RESUMEN.....	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. DINÁMICA DE SUELOS.....	1
1.1. Comportamiento dinámico del suelo.....	1
1.1.1. Vibraciones.....	1
1.1.2. Propagación de ondas sísmicas.....	3
1.1.2.1. Características de las ondas.....	3
1.1.2.2. Tipos de ondas.....	3
1.1.2.3. Velocidad de propagación de ondas.....	4
1.1.3. Clasificación de ondas sísmicas.....	4
1.1.3.1. Ondas de cuerpo o internas.....	5
1.1.3.2. Ondas superficiales.....	6
1.1.4. Magnitud de terremotos.....	7
1.1.5. Intensidad de terremotos.....	9
1.1.5.1. Energía de un terremoto.....	9
1.1.6. Amplificación sísmica.....	9
1.1.7. Densificación.....	10

2.	LICUEFACCIÓN.....	11
2.1.	Licuefacción.....	11
2.1.1.	Antecedentes de ocurrencia de licuefacción en suelos	12
2.2.	Susceptibilidad de Licuefacción.....	14
2.2.1.	Criterios de susceptibilidad	14
2.2.1.1.	Suelos no cohesivos	15
2.2.1.2.	Suelos con presencia de finos	16
2.3.	Parámetros para determinar el potencial de Licuefacción	16
2.4.	Evaluación de potencial de Licuefacción	18
2.5.	Efectos de Licuefacción.....	19
3.	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	23
3.1.	Delimitación del área.....	20
3.1.1.	Descripción del área	24
3.1.2.	Desarrollo urbano del área	28
3.1.3.	Antecedentes de ocurrencia de la licuefacción en el sector de estudio	33
3.1.3.1.	Comunidad La Playa.....	35
3.1.3.2.	Comunidad El Sauzal	40
3.1.4.	Situación del área de estudio hasta el año 1978 y efectos.	42
3.2.	Características geológicas e hidrológicas del área	46
3.2.1	Geología superficial	46
3.2.2	Hidrología del área de estudio	47
4.	ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO VILLALOBOS.....	51
4.1.	Descripción de los factores condicionantes y/o activadores en el área.....	51
4.1.1.	Actividad sísmica por efectos del tectonismo de la zona	52

4.1.2.	Complejo volcánico Fuego-Acatenango-Pacaya.....	53
4.1.3.	Otras fuentes sísmicas.....	55
4.1.4.	Formación Geológica-Graben de la Ciudad de Guatemala..	56
4.1.5.	Procesos morfo-tectónicos, sedimentación.....	56
4.2.	Metodología de evaluación de propiedades del suelo por ensayos de laboratorio	56
4.2.1.	Granulometría	57
4.2.2.	Límites de Atterberg	58
4.2.3.	Gravedad específica	58
4.2.4.	Ensayo de columna resonante.....	58
4.3.	Metodología de evaluación de propiedades del suelo por ensayos de <i>in situ</i>	59
4.3.1.	Reflexión o refracción sísmica	59
4.3.2.	<i>Down-hole</i>	59
4.3.3.	<i>Up-hole</i>	60
4.3.4.	Ensayo de penetración estándar (SPT)	60
4.3.5.	Ensayo de penetración de Cono (CPT)	61
4.3.6.	Ensayo de piezo-cono (CPTU).....	62
4.4.	Determinación de susceptibilidad del fenómeno de Licuefacción en el delta del río de Villalobos de acuerdo a parámetros de evaluación .	62
4.4.1.	Edad del depósito	62
4.4.2.	Origen del suelo	64
4.4.3.	Distribución del tamaño de los granos	67
4.4.4.	Profundidad de las aguas subterráneas.....	73
4.4.5.	Densidad.....	77
4.4.6.	Peso del recubrimiento y profundidad del suelo.....	78
4.5.	Análisis de resultados	79

5. SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO	
VILLALOBOS MUNICIPIO DE VILLA CANALES	81
5.1. Zonificación de la susceptibilidad del fenómeno de licuefacción	81
5.2. Identificación de potencial de licuefacción de acuerdo a la evaluación	82
5.3. Alternativas de mejoramiento de suelo con potencial de ocurrencia al fenómeno de licuefacción	84
5.4. Resultados obtenidos	86
CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXO 1: RESUMEN DE ENSAYOS Y GRÁFICAS.....	101
ANEXO 2: MAPAS	113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Asentamiento de vivienda, después del terremoto del año 2012.....	13
2. Esparcimiento lateral de suelo, después del terremoto del año 2012.....	14
3. Mapa de localización de la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal.....	25-113
4. Mapa de ubicación de la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal	27-114
5. Vistas aéreas del área de estudio, (a) 1969; , (b) 2002; (c) 2008; (d) 2012, delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal.....	30
6. Tasa de crecimiento territorial de la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa al Norte 1969-2012.....	32
7. Vista aérea de la formación del delta de río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal, después del terremoto del año 1976	34
8. Colapso de vivienda por diferenciales verticales	37
9. Grieta debido a la propagación lateral de esfuerzos inducidos por sismos	37
10. Desplazamientos laterales del suelo.....	38
11. Grieta debido a la propagación lateral	39
12. Colapso de vivienda por diferenciales laterales y verticales	41
13. Colapso de pisos de concreto.....	41
14. Vista aérea de la formación del delta de río Villalobos, comunidades La Playa y el Sauzal, después del terremoto del año 1976, y hundimientos antiguos.....	43

15. Vista aérea cauce de río y planicie de formación aluvial reciente del área de estudio, delta del río Villalobos	63
16. Reconocimiento visual en campo de la planicie de formación del sector de estudio: delta del río Villalobos, comunidad El Sauzal al Sureste	65
17. Planicie de formación aluvial reciente en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa al Noreste.....	65
18. Planicie de formación aluvial reciente en la zona de estudio: delta del río Villalobos, E-1, comunidad El Sauzal	66
19. Relleno aluvial en la zona de estudio: delta del río Villalobos; delta del río Villalobos comunidad El Sauzal al Sureste.....	66
20. Estratigrafía del suelo existente y en formación, en zona de estudio: delta del río Villalobos. E-2, comunidad El Sauzal.....	68
21. Estratigrafía del suelo existente y en formación, en zona de estudio: delta del río Villalobos. E-3, comunidad El Sauzal.....	68
22. Estratigrafía del suelo existente y en formación, en zona de estudio: delta del río Villalobos. E-4, comunidad La Playa	69
23. Estratigrafía del suelo existente y en formación, en zona de estudio: delta del río Villalobos. E-6, comunidad La Playa	70
24. Afloramiento de aguas subterráneas, delta del río Villalobos, comunidad El Sauzal al Sureste	77
25. Afloramiento de aguas subterráneas, delta del río Villalobos, comunidad La Playa al Norte.....	78
26. Mapa de Susceptibilidad al fenómeno de licuefacción en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal	87-115
27. Curva de velocidad de infiltración por el modelo de Lewis-Kostiakow de la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad El Sauzal	102
28. Curva de velocidad de infiltración por el Modelo de Lewis-Kostiakow de la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa.....	103

29. Prueba de infiltración-balance hídrico en el área de estudio, delta del río Villalobos, comunidad La Playa al Norte.....	104
30. Datos acumulados anuales de precipitación, prueba de <i>Spearman Rank Order Correlation</i> en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal de los años 1977-2012.....	106
31. Mapa geológico del área de estudio	116
32. Descripción geológica del área de estudio	117
33. Ubicación de estaciones para muestreo de estratigrafía en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal	118
34. Localización de placas tectónicas en Guatemala	119
35 Localización de fallas geológicas en el área de estudio.....	120
36. Sismicidad registrada en la República de Guatemala a junio de 2012.....	121
37. Influencia volcánica y caracterización sísmica del área de estudio	122
38. Unidades geotécnicas y sitios de registro en ciudad de Guatemala.....	124
39. Ubicación de pozos de inspección en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y El Sauzal.....	125
40. Variación de parámetros hidrológicos en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y El Sauzal.....	126

TABLAS

I. Tasa de crecimiento territorial de la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa al Norte 1969-2012.....	31
II. Resumen estadístico de tasa de crecimiento territorial de la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa al Norte 1969-2012.....	31
III. Resumen de datos de suelos en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal, año 1978-1981-1995.....	45

IV. Eventos localizados de sismicidad registrada del 2007-01-01 al 2012-06-30 localizados en la República de Guatemala.....	54
V. Eventos localizados de sismicidad registrada del 2007-01-01 al 2012-06-30 localizados en la región central de Guatemala.....	55
VI. Resumen de ensayos de laboratorio en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y EL Sauzal	72
VII. Resumen de niveles freáticos de la zona estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y El Sauzal.....	74
VIII. Nomenclatura de áreas susceptibles en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y El Sauzal.....	78
IX. Datos de prueba de infiltración balance-hídrico por el método de Lewis-Kostiakov en la zona estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y El Sauzal.....	101
X. Datos acumulados de precipitación pluvial estación metereológica Compuertas Amatitlán en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y El Sauzal del año 1977-2012	105
XI. Análisis granulométrico: comunidad El Sauzal E-1	106
XII. Análisis granulométrico: comunidad El Sauzal E-3.....	108
XIII. Análisis granulométrico: comunidad La Playal E-4	109
XIV. Análisis granulométrico: comunidad La Playal E-6.....	110
XV. Resumen de análisis de contenidos de humedad en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playal y El Sauzal.....	111

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a_s	Aceleración sísmica
cm/año	Centímetros por año
gpm	Galones por minuto
h	Altura / profundidad
<i>in situ</i>	En el lugar / en el sitio
km	Kilómetro
km²	Kilómetros cuadrados
lt/s	Litro por segundo
M_L	Magnitud original
M_b	Magnitud ondas de cuerpo
M_s	Magnitud ondas superficiales
M_w	Magnitud de momento
MM	Escala modificada de Mercalli
m³	Metros cúbicos
m³/año	Metros cúbicos por año
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetros
N	Número de golpes en campo por SPT
N_{60}	Valor corregido de N obtenido por ensayo SPT

NF	Nivel freático
pH	Potencial de hidrógeno
%	Porcentaje
s	Segundos
T	Período de duración
ton/año	Toneladas por año

GLOSARIO

- Aluvión** Material detrítico transportado y depositado por una corriente de agua repentina provocando inundaciones, compuesto por material no consolidado de arcilla o limo, gravas de granos variados, acumulándose principalmente en los canales de las corrientes, planicies inundables y en los deltas de ríos.
- Amenaza sísmica** Es una condición latente derivada de la posible ocurrencia de un sismo de cierta magnitud, distancia y profundidad, que causa daño a la población, bienes, infraestructura, ambiente y economía.
- Anegamiento** Inundación de un terreno agrícola ya sea por un aumento del nivel freático (capa superior del agua subterránea) o por una irrigación excesiva.
- Asentamiento** Es una forma de inestabilidad caracterizada por deformaciones verticales relativamente cortas a lo largo de la pendiente de una masa coherente de materiales poco consolidados o capas de roca, donde el movimiento se genera principalmente por sismos, absorción excesiva de agua, socavamiento en bases por incrementos de cargas verticales.

Delta	Planicie de acumulación de origen sedimentario aluvial generalmente de formación reciente, de tipo abanico o triangular con dedos cortos que constituye la forma principal de antiguas desembocaduras de un río.
Bloques de falla	Son dos porciones de roca separadas por el plano de falla; el bloque que se haya por encima del plano de falla se denomina bloque colgante y al que se encuentra por debajo, bloque yacente.
Densificación	Se produce normalmente en depósitos de arena suelta, cuando el agua intersticial puede drenar fácilmente, generando el reordenamiento de las partículas del suelo por la variación en el índice de vacíos.
Deposición	Proceso en donde las fuerzas responsables del transporte de sedimentos ya no son suficientes para superar las fuerzas de las partículas de peso y fricción, y el sedimento se estaciona a través de la gravedad.
Desplazamiento	Es la distancia neta en que se ha movido un bloque respecto del otro; producido cuando la resistencia al corte de las rocas es superada por la magnitud de los esfuerzos, generando la ruptura y desplazamiento a lo largo de la falla, pudiendo ser laterales y/o verticales.

Detrítico	Roca sedimentaria formada por materiales clásticos, restos de otras rocas transportados por el viento, el agua o los glaciares.
Epicentro	Punto de la superficie terrestre más próxima al hipocentro, donde se genera un tercer tipo de ondas llamadas superficiales, siendo este, las que producen destrozos mayores en un terremoto.
Estabilidad	Capacidad del suelo para resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas.
Falla	Es una discontinuidad que se forma por la fractura en las rocas de la corteza terrestre, a lo largo de la cual, ha habido movimiento de uno de los lados respecto del otro por esfuerzos tectónicos actuantes en la corteza.
Forúnculo	Se conoce a la ebullición de material licuado, proveniente del subsuelo, compuesto por arenas, limos, gravas y agua, principalmente se observan seguido de una actividad sísmica, y brotan en la superficie en forma de volcanes de arena, en el peor de los escenarios pueden llegar a derribar edificios y viviendas junto con levantamientos de cimientos de una construcción.
Fluido	Sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante.

- Fluido intersticial** Fluido existente en los vacíos del esqueleto del suelo y que ejerce una presión llamada intersticial.
- Graben** Es un sistema que se ubica entre dos fallas geológicas que forman una estructura cóncava o bien una curva que se hunde hacia dentro.
- Hipocentro** Punto del interior de la tierra donde se origina un terremoto, a profundidades de 10 a 20 km el terremoto es superficial, de 20 a 70 km, intermedio y de 70 a 700 km profundo.
- Lacustre** Pertenece al que habita y se desarrolla en las superficies de lagos y en sus cercanías.
- Licuefacción** Fenómeno que ocurre comúnmente en arenas, limos sueltos poco plásticos, gravas de variado tamaño, generalmente en material no consolidado con presencia de agua, o en estado saturado, inducido principalmente por terremotos, intensidad sísmica recurrente, actividades de explotación minera, uso de maquinaria mecánica-hidráulica; provocando la pérdida de la resistencia al corte del suelo, transformándolo en un estado licuado, donde la resistencia y la rigidez de un depósito de suelo se reducen, debido a un aumento de la presión de poro.

Mercalli	Escala que evalúa la intensidad de un terremoto por medio del daño a personas, viviendas y edificios, depende de la fuerza del terremoto, distancia al epicentro, y la naturaleza de los suelos, se denota de Grado I a Grado XII.
Nivel freático	Lugar geométrico de los puntos donde la presión del agua es la atmosférica, debajo de él las presiones son positivas (agua freática) y por encima negativas (agua capilar).
Presión intersticial	Presión producida por el fluido existente en el esqueleto del suelo, y/o la presión ejercida entre los espacios vacíos y llenos de la estructura de los poros.
Presión de poro	Corresponden al peso de la columna de agua sobre el elemento.
Polución	Contaminación intensa y dañina del agua, aire o medio ambiente, producida por los residuos de procesos industriales o biológicos.
Richter	Escala que evalúa la magnitud de un terremoto, a partir del análisis de los sismogramas identificando la cantidad de energía sísmica liberada desde el hipocentro del terremoto, se denota de 1 a 9 o más.

Sedimentación	Proceso por el cual, el suelo transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río o bien en planicies para formar embalses, canales artificiales.
Sismo	Movimiento del terreno provocado por la repentina liberación de la energía acumulada a lo largo de una fractura en las rocas.
Suelo saturado	Suelo que se caracteriza por tener todos sus vacíos ocupados por agua.
Subducción	Zona donde se intercepta una placa oceánica y continental, la oceánica es más densa de manera que se introduce debajo de la continental penetrando en el manto y fundiéndose, produciendo terremotos muy fuertes y erupciones volcánicas que pueden crear arcos insulares.
Tensión superficial	Fuerza atractiva ejercida en la superficie de separación entre materiales en diferentes estados físicos (sólido/líquido, líquido/gas).
Vetiver	Planta herbácea resistente a la sequía, contaminación y salinidad, estéril no invasiva, forma barreras contra la erosión, cortavientos, pantallas acústicas, visuales y anti polución, por medio de sus raíces absorbe % de nitrógeno y fósforo que llegan las aguas.

RESUMEN

Actualmente, la planicie de formación geológica de depósitos sedimentarios en las riberas del delta del río Villalobos, ha dado origen a estructuras geológicamente definidas, principalmente sedimentos sueltos no consolidados, arenas finas saturadas, limos y gravas con contenido de material orgánico de espesores variados. Según la ubicación del área de estudio, la influencia del margen continental activo del bloque de la zona de subducción, el sistema de fallas y la cadena volcánica, son los responsables de accionar movimientos cíclicos variables en los suelos, junto con la presencia de agua o mantos superficiales, han provocado el quiebre de la estructura y por consiguiente la pérdida de propiedades de resistencia al corte y rigidez, debido al aumento de presión de poro, ha originado condiciones inestables y escenarios de la manifestación del fenómeno de licuefacción, siendo visibles sus efectos destructivos, desde asentamientos diferenciales a drásticos.

La información recabada y el desarrollo experimental contribuyeron a la caracterización de las columnas estratigráficas predominantes en el sector, junto con el uso de mapas de la zona, que reflejan las amenazas sísmicas e hidrogeológicas; para culminar con la realización de la zonificación del sitio para la reducción de riesgos, por medio de un mapa, que denota áreas susceptibles ante el fenómeno de licuefacción. Útil para ampliar investigaciones geotécnicas en el sitio de estudio; generando una guía basada en información obtenida de las condiciones que se presentan en el área de estudio, obteniendo como producto final una fuente de investigación de consulta confiable.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ocurrencia del fenómeno de licuefacción en las riberas del delta del río Villalobos se ha observado con el paso del tiempo, suelos granulares, con arenas finas y limos saturados, es la columna estratigráfica típica característica del sector, generando grados de compactación bajos, formándose en suelos susceptibles; junto a ello, la influencia de activadores tales como: magnitud sísmica, zonas de fallas, conos volcánicos, minería y perforaciones profundas, han originado, que éstas formaciones de suelos posean condiciones determinantes para la manifestación del fenómeno de licuefacción; así mismo, la presencia de nivel freático superficial y la proximidad a las riberas o lechos del río o lago, tienden a cambiar las características de los suelos de su estado sólido a un estado líquido o bien suelos saturados.

Éstos factores han sido responsables de daños catastróficos en el área de estudio; la disminución de la capacidad de soporte y rigidez de los suelos, se han reflejado, por medio de asentamientos, hundimientos y desplazamientos; bajo estas condiciones, esto ha sido en su momento un suelo estable se convierte en un fluido móvil incapaz de soportar cargas; a su vez, denota un rango de características que hacen vulnerable el sitio, con el conocimiento parcial de las condiciones geotécnicas y sísmicas, se identifica un riesgo latente de ocurrencia del fenómeno de licuefacción; el cual sigue provocando inestabilidad de viviendas, puentes, presas, muros de contención, falla de pendientes, taludes, deslizamientos de tierra, daños en tuberías, carreteras, entre otros.

OBJETIVOS

General

Elaborar un mapa de la susceptibilidad del fenómeno de licuefacción en el delta del río Villalobos, municipio de Villa Canales, Departamento de Guatemala.

Específicos

1. Describir la relación de los factores condicionantes y los efectos del fenómeno de licuefacción, por medio de la elaboración de un mapa, para determinar la factibilidad de expansión urbanística en las riberas del delta.
2. Describir y analizar los distintos métodos de evaluación para la determinación de las propiedades del suelo en el área de estudio, para obtener información que orienten a identificar potenciales que generen susceptibilidad.
3. Proporcionar alternativas para mejoramiento de las características del suelo existente, para minimizar la ocurrencia del fenómeno de licuefacción.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

Para la realización de la presente investigación, se realizó de acuerdo a lo detallado a continuación:

La recopilación bibliográfica se realizó al analizar antecedentes del fenómeno en la zona de estudio, incluyen para ello, documentación desarrollada por profesionales, comprendido en tesis, simposios, artículos, libros, mapas, bases de datos y fotografías.

Se utilizaron series de mapas geológicos, fallas, registros sísmicos, influencia volcánica, mapa cartográfico que detallan características específicas representativas de influencia en el área de estudio.

Las mediciones del desarrollo experimental se realizaron en dos etapas:

Etapa 1: *in situ*, características propias de los suelos que se identificaron en el momento de la toma de muestra, tales como asentamientos históricos y continuos, desplazamientos de suelo, profundidad de infiltración, niveles freáticos y velocidad de infiltración.

Etapa 2: en laboratorio, al analizar las muestras de material del sector obtenidas a través de la perforación de pozos a cielo abierto, perforaciones por medio de sondas sonoras y barrenos, para caracterizar los suelos.

Se utilizó equipo para toma de muestras y en laboratorio tal como: 1) piocha, 2) azadón, 3) pala, 4) saca tierras, 5) cinta métrica para la determinación de profundidad de excavaciones y ubicación de nivel freático, 6) bolsas plásticas para el transporte de muestras, 7) guantes de nitrilo, 8) GPS para la ubicación por medio de coordenadas de los puntos de toma de muestras, 8) cámara digital fotográfica, 9) sonda sonora, 10) barreno muestreador, 11) toma muestra de $\frac{3}{4}$ ", 12) agua para prueba infiltración, 13) libreta de notas de registro de lecturas, 14) equipo completo de laboratorio (granulometría, límites de consistencia).

El análisis de los resultados se realizó por medio de los datos obtenidos de las características del material muestreado, afloramiento de aguas subterráneas, velocidad de infiltración, profundidad de las aguas subterráneas, el perfil del suelo y los condicionantes que afectan el área y se manifiestan continuamente en el sector.

La generación del resultado final fue un mapa por medio del procesamiento de la información, identificando las zonas con potenciales máximos, medios y mínimos del fenómeno, haciendo uso de software: AutoCAD, gvSIG.

INTRODUCCIÓN

En el presente se muestran los resultados de delimitar el área de estudio en las riberas del delta del río Villalobos, ubicado en el municipio de Villa Canales, debido a la caracterización de los suelos existentes, cuyos depósitos de formación reciente de arenas sedimentarias, gravas parcial y/o totalmente saturadas han manifestado la ocurrencia del fenómeno de licuefacción de acuerdo a las evidencias físicas e investigativas en el área.

Basados en estudios previos, junto con la aplicación de metodologías de evaluación tales como: caracterización del área por medio de mapas multitemáticos, procedimientos experimentales de laboratorio e inspecciones visuales de la ocurrencia continua del fenómeno y sus efectos, se procedió a zonificar el sector de estudio.

De acuerdo a lo anterior, se unificó la información y el resultado fue la elaboración de un mapa, en el cual se indican las áreas susceptibles a la manifestación del fenómeno de licuefacción, tomando en cuenta, factores activadores, efectos tanto históricos y actuales en la zona, lo que contribuye a la identificación de zonas vulnerables a la expansión urbanística y conjunto a ello, se proporcionan mejoras de suelo para minimizar el riesgo de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

1. DINÁMICA DE SUELOS

1.1. Comportamiento dinámico del suelo

La naturaleza dinámica de los suelos está influenciada por la respuesta de éstos frente a cargas cíclicas, estabilidad sísmica de muros de contención, licuefacción, prospección del subsuelo por análisis de propagación de ondas, fundaciones de máquinas y vibraciones en obras viales, entre otros; respuesta controlada en gran medida por las propiedades del suelo; como la susceptibilidad de un depósito de suelo para amplificar el movimiento depende de las propiedades dinámicas, siendo el módulo de corte y el amortiguamiento, principales parámetros para modelar la respuesta sísmica del suelo, relacionados con propiedades de carácter más físico, como el índice de poros, densidad relativa y la velocidad de las ondas de corte (Rodríguez, 2005).

1.1.1. Vibraciones

Al movimiento de una partícula que oscila alrededor de una posición de equilibrio se le conoce como vibración, estudiadas y analizadas, con el objeto de conocer la estructura de la corteza terrestre y de predecir el comportamiento y los efectos de movimientos sísmicos. Las actividades humanas que generan cierto tipo de vibraciones, dan lugar a un sistema elástico desplazado de una posición de equilibrio, debido a la acción de fuerzas recuperadoras.

Los terremotos y las ondas sísmicas producen vibraciones en las partículas del suelo, por lo que es importante presentar los conceptos básicos de la teoría que rige el movimiento de los sistemas vibrantes (Díaz, 2006).

Díaz (2006) clasifica las vibraciones de acuerdo al tipo de movimientos generados por estas.

Vibraciones libres. Cuando un sistema vibra debido a una excitación instantánea, el movimiento se mantiene por la acción de las fuerzas recuperadas y periódicas, vibra libremente, solo si existen condiciones iniciales de energía cinética o potencial, como la deformación inicial de un resorte, la energía se disipa por amortiguación y casi siempre es despreciable, aun cuando la energía es disipada durante la vibración.

Vibraciones forzadas. Cuando un sistema de vibraciones libres es sometido a una fuerza periódica, definida como una fuerza máxima y una frecuencia angular forzada del movimiento.

Vibraciones amortiguadas. Cuando un sistema vibratorio es sometido a la pérdida de energía, por fuerzas de rozamiento, directamente proporcional y opuesto a la velocidad del movimiento, forman parte del comportamiento interno del material amortiguado, ligado con las vibraciones lineales, definiéndose cuando los componentes básicos de un sistema que aparte de ser amortiguado tienen un comportamiento lineal.

1.1.2. Propagación de ondas sísmicas

Las ondas sísmicas tienden a propagarse en los depósitos de suelos, éstas viajan a través de los diferentes tipos de materiales que los componen, los cuales a su vez dejan pasar el movimiento y lo transforman, aumentando las frecuencias de oscilaciones, condicionando a las estructuras existentes, al coincidir las frecuencias provocadas por la atenuación de perturbaciones inducidas por el medio. (Troncoso, 1992).

1.1.2.1. Características de las ondas

Se clasifican de acuerdo a su dirección de vibración, proporción y medio de propagación, tales como unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales, longitudinales, transversales, mecánicas y electromecánicas.

1.1.2.2. Tipos de ondas

Según la dirección de vibración de las partículas.

- **Longitudinales.** Las partículas vibran en la misma dirección donde se propaga la onda. Ej., el sonido, ondas sísmicas. Se propagan en medios con resistencia a la compresión y dilataciones.
- **Transversales.** Las partículas vibran perpendicularmente a la dirección donde se propaga la onda. Ej., la luz, onda de una cuerda, crestas y valles.

Según la dimensión de propagación de la onda.

- **Unidimensionales.** Las que se propagan en una sola dimensión. Ej., vibración de una cuerda.
- **Bidimensionales.** Las que se propagan en dos dimensiones. Ej., onda en la superficie del agua.
- **Tridimensionales.** Las que se propagan en tres dimensiones. Ej., luz, sonido.

Según el medio que necesitan para propagarse.

- **Mecánicas.** Necesitan propagarse a través de la materia. Ej., el sonido, olas del mar.
- **Electromagnéticas.** Sin medios para propagarse, al vacío. Ej., la luz, calor radiante.

1.1.2.3. Velocidad de propagación de ondas

Depende de la densidad del medio y de sus propiedades elásticas; generando fuerzas y deformaciones asociadas a la teoría de la elasticidad, los sólidos tienen la propiedad de resistir distintos cambios de tamaño y al ser eliminadas fuerzas externas, recuperan su condición no deformada (Rosales, 2001).

1.1.3. Clasificación de ondas sísmicas

Ondas sísmicas. Ondas elásticas consistentes en la propagación de perturbaciones temporales del campo de tensiones; con intensidades variadas, se propagan a través de las rocas en todas direcciones desde el foco. Existen ondas sísmicas de cuerpo o internas y ondas superficiales.

1.1.3.1. Ondas de cuerpo o internas

De acuerdo a Rosales (2001), las ondas de cuerpo o internas, viajan a través del interior de la tierra y siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la Tierra; éstas transmiten los sismos preliminares de un terremoto, pero poseen poco poder destructivo, estas se dividen a su vez en ondas primarias y ondas secundarias y se clasifican a continuación.

Primarias (ondas P). Parte del grupo de ondas longitudinales, las cuales se propagan a través de líquidos, sólidos y gases, oponiéndose a cambios de volumen cuando son comprimidos y recuperan su forma elásticamente.

Se propagan a grandes velocidades, genera que sean registradas primeramente desde cualquier distancia donde se ubique el movimiento y/o foco, haciendo vibrar las partículas en el mismo sentido de las ondas, se comprimen y dilatan en su curso.

Secundarias (ondas S). Conocidas como ondas transversales o de corte, las cuales no son capaces de resistir esfuerzos de corte, vibran en sentido perpendicular al de su propagación, con velocidades menores que las ondas P.

Las ondas S tienen una amplitud mayor que las ondas P, aunque no se pueden exceptuar las ondas superficiales que tienen amplitudes mayores que las ondas internas, puede causar destrucciones muy grandes en los terrenos.

1.1.3.2. Ondas superficiales

Cuando las ondas generadas en el foco de la tierra (ondas de cuerpo), alcanzan la superficie, son influenciadas por esta discontinuidad, formándose ondas de superficie, dividiéndose en ondas *Rayleigh* y ondas *Love* (Beles, 1975).

Ondas *Rayleigh* (ondas R). Ondas que generan vibración de partículas con movimientos verticales en forma elíptica, esto se desarrolla a lo largo de la dirección a la onda.

Su amplitud disminuye exponencialmente con la profundidad, siendo el suelo el medio elástico semi-infinito ideal para su desarrollo, donde su velocidad de propagación es un 70 % de la velocidad de las ondas S con amplitudes mayores a las ondas de cuerpo y períodos más largos, propagándose en discontinuidades del medio o en interfaces de un medio a otro; se generan a partir de la exploración petrolera por dinamita, y las producidas por vehículos llamados vibradores (Rosales, 2001).

Ondas *Love* (ondas L). Ondas que necesitan para desarrollarse, capas superficiales con propiedades mecánicas ligeramente diferentes de las capas más profundas.

Se propagan con vibraciones horizontales en sentido perpendicular al de su propagación y carecen de movimiento vertical, su velocidad de propagación es un 90 % de la velocidad de las ondas S y es ligeramente superior a la velocidad de las ondas *Rayleigh* (Rosales, 2001).

1.1.4. Magnitud de terremotos

El sistema desarrollado por Richter en 1935, determina las magnitudes de los terremotos de acuerdo a logaritmos de máxima amplitud de las ondas de registro en los sismógrafos, con el objeto de que todas las estaciones sísmicas obtengan la misma magnitud para un terremoto sin importar su ubicación.

La magnitud de un terremoto está directamente relacionada con la cantidad de energía liberada durante un movimiento, se miden amplitudes máximas por medio de sismogramas, proporcionando un número que indica el tamaño de dicha amplitud y por lo tanto de la cantidad de energía liberada.

Los grandes terremotos se registran con amplitudes miles de veces superiores a los temblores débiles, el aumento de 10 veces en la amplitud de onda, corresponde a un aumento de 1 en la escala de magnitud y no diferencia de manera adecuada los terremotos que tienen magnitudes muy altas, ya que estos terremotos tienen amplitudes de onda casi iguales, por lo que la escala de Richter se satura a este nivel. Actualmente, las más comunes son la magnitud local (M_L), magnitud de ondas superficiales (M_s), magnitud de ondas internas (M_b) y magnitud de momento sísmico (M_w), dependiendo generalmente de las características del sismo y de la distancia de los instrumentos al epicentro (INSIVUMEH, 2012).

Magnitud local (M_L). La primera escala de magnitudes sísmicas definida por Richter en 1935, se conoce como magnitud original, orientada a terremotos superficiales y locales, aplicable para sismos en los que los instrumentos se encuentran a una distancia menor de 600 km con respecto al epicentro.

De este modo, la magnitud es un número, característico de cada terremoto e independiente de la localización de la estación de registro (USGS, 2012).

Magnitud de ondas internas (M_b). Su valor se obtiene a partir de la amplitud máxima, observada en los sismogramas, de las ondas de cuerpo u ondas P, con períodos de oscilación de 1.00 s; tiende a saturarse a magnitudes de 6.5 - 6.8; por lo cual, no es posible determinar M_b para sismos con magnitud superior a estos valores (USGS, 2012).

Magnitud de ondas superficiales (M_s). Con el objeto de medir sismos generados a grandes distancias, con ondas superficiales *Rayleigh*, de largo período ($T \sim 18-22$ s); en terremotos moderados a fuertes, con ubicación de foco superficial e instrumentación menor de 1000 km del epicentro, se satura a magnitudes de 8.3 – 8.7; (USGS, 2012).

Magnitud de momento sísmico (M_w). La magnitud de momento sísmico es la más utilizada para determinar la magnitud de los terremotos grandes, debido a que no corre el riesgo de saturación, con base en la amplitud de las ondas sísmicas define el tamaño del sismo en términos del proceso físico de ruptura y de las dimensiones de la zona, en función directa de las propiedades físicas de la roca y dimensiones del área que sufre la ruptura, analizando ondas sísmicas de períodos muy largos ($T > 20$ s). (USGS, 2012).

1.1.5. Intensidad de terremotos

La intensidad de terremotos está asociada de acuerdo a daños sufridos de edificaciones y consecuencias tales como desbordamiento de laderas, aberturas en suelos, licuefacción y la escala de percepción de las personas en el sitio afectado. En Guatemala, se utiliza la escala modificada de Mercalli (MM), y en Europa se utiliza la Escala Macrosísmica Europea (EMS 98). La intensidad de un terremoto varía con la cantidad de energía liberada (magnitud) y se encuentra condicionada por la proximidad al epicentro, características geológicas, calidad y naturaleza de edificaciones, asciende desde un movimiento poco sensible (Grado I), hasta un terremoto que produce una destrucción total (Grado XII), (Díaz, 2006).

1.1.5.1. Energía de un terremoto

La energía que produce un terremoto proviene del movimiento de las placas tectónicas, donde la energía cinética debida al movimiento de una placa se transforma en movimientos en el suelo por medio del calor interno de la tierra, seguido de múltiples transformaciones tectónicas en zonas donde la concentración de fuerzas generadas por los límites de las placas dan lugar a movimientos de reajuste en el interior y en la superficie de la Tierra.

1.1.6. Amplificación sísmica

Se conoce al período natural de los suelos que concuerda con los de las ondas sísmicas, los cuales producen resonancia y un aumento en la amplitud de vibraciones (Santibáñez, 2006).

Cuando las ondas sísmicas se debilitan al aumentar la distancia de recorrido, la resonancia entre las vibraciones intensas y el suelo amplifican notablemente las aceleraciones en períodos largos y está asociado a restos de lechos de lagos antiguos formado de sedimentos blandos (Benito, 1999).

1.1.7. Densificación

Se produce cuando el agua intersticial drena con facilidad, reacomodando las partículas del suelo, a partir de la variación del índice de vacíos, dando lugar a cambios de volumen del terreno; ocurre en arenas sueltas, donde cabe mencionar que la tensión–deformación junto con las variaciones de volumen son distintas para arenas sueltas y para arenas densas.

Las densas se comprimen inicialmente, pero éstas se dilatan para deformaciones mayores, mientras que las sueltas se comprimen para cualquier nivel de deformación (Santibáñez, 2006).

En depósitos de formación de suelos recientes, al ser afectados por vibraciones sísmicas sufren cambios en su estructura, a su vez, la rigidez del suelo puede condicionar la velocidad de propagación de las ondas, en movimientos sísmicos de gran magnitud, las deformaciones unitarias alcanzan valores entre 0.1 y 0.001, causando densificación del suelo reduciendo la resistencia al corte, generando subsidencia, asentamientos en las cimentaciones, flotación de obras subterráneas, fallas de flujo, y deslizamientos (Troncoso, 1992).

2. LICUEFACCIÓN

2.1. Licuefacción

Generalmente en áreas donde predominan suelos granulares saturados, las vibraciones producidas por: intensidad sísmica recurrente, explotación minera, uso de maquinaria mecánica-hidráulica, generan el fenómeno conocido como licuefacción o licuación de suelos.

Las vibraciones del suelo generan pérdida de la resistencia al corte, transformándose de un estado sólido a un estado licuado; se observa en estructuras bajo tierra, tuberías, tanques de almacenamiento, alcantarillas, pudiendo flotar hacia la superficie, y las estructuras superficiales tienden a presentar asentamientos (Tarbuck y Lutgens, 2000).

La licuefacción se le atribuye a las ondas sísmicas, principalmente las de corte, en suelos granulares con presencia agua o bien niveles freáticos superficiales; formando depósitos saturados, donde la estructura se modifica, debido al reordenando de las partículas, produciendo incrementos de presión de poro bajo condiciones no drenadas, la fuerza de contacto entre partículas es muy pequeña o casi nula, denotando un rango de características en donde la resistencia y la rigidez del depósito de suelo se reducen en su totalidad y por consiguiente éste se comporta como un líquido. (Johansson, 2000).

La presión intersticial causada por la licuefacción hace fluir el agua rápidamente a la superficie, durante y después de un terremoto.

El flujo intersticial aumenta con rapidez llevando partículas de arena a través de las grietas hasta la superficie, donde afloran en forma de volcanes de arena o forúnculos de arena, debido a la alta frecuencia de los ciclos de carga y descarga sísmica, a su vez, impiden que el agua encerrada en los poros de un suelo drene y se produzcan cambios de volumen y por ello se generan incrementos de presiones en el agua (Kramer y Stewart, 2004).

2.1.1. Antecedentes de ocurrencia de licuefacción en suelos

El fenómeno de licuefacción se inició a estudiar por los efectos producidos a partir de los terremotos del año 1964 en Niigata, Japón y Alaska.

En Niigata, el terremoto ocasionó desplazamientos laterales y decremento de la capacidad de soporte de los suelos. Los terremotos ocurridos en Guatemala, (1976 y 2012), Colombia (1979), Chile (1985), California (1989) y Northridge (1994), Kobe (1995), Turquía (1999) y Taiwán (1999), afectaron zonas de costa donde el fenómeno evidenció su manifestación.

En Guatemala, después del terremoto del 07 de noviembre de 2012, la influencia de propiedades geológicas, geotécnicas y topográficas de los estratos superficiales, propiciaron efectos de la propagación de las ondas sísmicas en los distintos tipos de suelos, manifestándose el fenómeno en ciertos sectores en donde se ubicaban mantos acuíferos superficiales < 5m. (Flores, 2012).

Figura 1. **Asentamiento de vivienda, después del terremoto del año 2012**



Fuente: Seminario Lecciones repetidas del terremoto del 07 de noviembre de 2012. AGIES, CESEM. Flores, O. 2012. Guatemala.

La evidencia geológica asociada a terremotos históricos ha contribuido al estudio, modelación y descripción del fenómeno de licuefacción, con el propósito de identificar las áreas vulnerables que han sufrido manifestaciones y así mismo realizar la evaluación del peligro sísmico potencial en determinadas áreas (Zeballos, 2002).

Figura 2. **Esparcimiento lateral, después del terremoto del año 2012**



Fuente: Seminario Lecciones repetidas del terremoto del 07 de noviembre de 2012. AGIES, CESEM. Flores, O. 2012. Guatemala.

2.2. Susceptibilidad a la licuefacción

2.2.1. Criterios de susceptibilidad

En el año 2004, Kramer y Stewart determinaron que un suelo puede ser evaluado de acuerdo a la utilización de criterios detallados a continuación:

Criterios históricos. La manifestación del fenómeno de licuefacción se presenta normalmente en áreas donde se ha tenido historial de ocurrencia, las condiciones del sitio determinan características que contribuyen a evidenciar la susceptibilidad del área.

Criterios geológicos. En suelos de planicies fluviales, eólicos, abanicos aluviales en estado saturados, los depósitos de suelos jóvenes son más susceptibles de licuefacción que los depósitos más antiguos.

Criterios basados en la composición del suelo. Las arenas uniformemente clasificadas, normalmente compuestas de partículas redondeadas tienden a ser más susceptibles, contrario a las arenas con partículas angulares. Los finos plásticos tienden a disminuir la susceptibilidad de licuefacción.

Criterios basados en el estado del suelo. La ocurrencia de licuefacción se asocia a los suelos que poseen facilidad a comprimirse bajo condiciones de carga cíclicas constantes, influenciados por las variaciones de densidades en el área de estudio junto con las tensiones efectivas que posea.

2.2.1.1. Suelos no cohesivos

La licuefacción se refiere principalmente a suelos no cohesivos o granulares, la actividad sísmica recurrente y de larga duración; suelos saturados con densidades bajas, pierden su resistencia debida el exceso de presión de poros y a la reducción de tensiones efectivas.

Brandes en el año 2003 confirma que suelos no cohesivos con valores $(N_1)_{60} > 30$ (resistencia a la penetración estándar corregida) poseen densidades óptimas para no presentar licuefacción.

2.2.1.2. Suelos con presencia de finos

Kramer y Stewart en el 2004, exponen los siguientes criterios, adoptados por Seed e Idriss posteriormente, en los cuales indican, que los suelos compuestos de finos poseen comportamientos similares a las arenas al ser sometidos a cargas sísmicas.

1. Fracción de arcilla (finos menores de 0,005 mm) $\leq 15\%$
2. Límite líquido, LL $\leq 35\%$
3. Contenido de humedad natural, $w \geq 0.9 LL$
4. Índice de liquidez, LI ≤ 0.75

Si un depósito de suelo se encuentra dentro de estos criterios, se debe de tomar en cuenta para el análisis de potencial de licuefacción.

2.3. Parámetros para determinar el potencial de licuefacción

La Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2003), en la sección de reducción del daño sísmico para construcciones, define siete parámetros, que asocian a los criterios anteriores para determinar el potencial a la susceptibilidad de un suelo a licuarse.

Edad del depósito. Los suelos no cohesivos jóvenes, normalmente cuentan con propiedades mecánicas que los hacen carecer de características adecuadas para soportar cargas.

Depósitos de suelos formados en planicies cuentan con mayor riesgo de licuarse, frente a vibraciones fuertes las cuales afectan su estructura.

Origen del suelo. Los depósitos formados en las costas o riberas, poseen más probabilidad de licuarse, al igual que los depositados por procesos fluviales, conocidos como rellenos artificiales, éstos cuentan con bajos porcentajes de compactación, sin descartar que los sedimentos densos tienen menor probabilidad de licuarse; se estima que el riesgo es mayor entre los primeros 50 metros de costa y se va reduciendo, según la relación de las condiciones existentes y conforme se ingrese al terreno.

Distribución del tamaño de los granos. Las arenas limpias uniformemente clasificadas, poseen alta probabilidad de licuarse volviéndose más densas. Los suelos limosos con contenidos de gravas, tienden a ser susceptibles al ser afectados por movimientos cíclicos constantes.

Profundidad de las aguas subterráneas. La licuefacción se puede observar en áreas donde la ubicación de los niveles freáticos o aguas subterráneas es próxima a la superficie (3 a 6m), en planicies de formación jóvenes, el almacenamiento subterráneo por la sucesión de épocas secas y húmedas, cuerpos de agua conectados a acuíferos o mantos, recargas naturales, entre otras, aumentan la probabilidad de ocurrencia de licuefacción.

Densidad. Los suelos pierden su densidad óptima cuando están sujetos a cargas cíclicas, aumentando la presión de poros, seguidamente éstos se llenan de agua donde el suelo pierde su resistencia y finalmente se licua.

El incremento de densidad se obtiene al reducir el contenido de aire en los vacíos del suelo, y el contenido de humedad permanece constante, reduciendo la posibilidad de que se produzca la licuefacción.

Peso del recubrimiento y profundidad del suelo. Los pesos que poseen los recubrimientos o bloques superficiales de los depósitos de suelos, generan tensiones entre partículas, aumentando conforme se incrementa la presión del recubrimiento, la interacción de estas dos etapas desarrollan la subsidencia (hundimiento de la superficie), lo cual aumenta probabilidad de que ocurra la licuefacción. La licuefacción ocurre a profundidades inferiores a 3m y pocas veces ocurre a profundidades mayores de 6m.

Amplitud y duración de la vibración del terreno. Un suelo resiste una vibración ocasionada por un sismo, de acuerdo a la intensidad del movimiento y a la amplitud de la onda que lo genera, normalmente a partir de sismos >3 en escala de Richter las partículas de suelo tienen a sufrir deformaciones o transformaciones que se reflejan en la superficie desde agrietamientos hasta fallas. González de Vallejo (2004) concretamente establece que la manifestación de licuefacción puede ocurrir próxima al epicentro durante terremotos pequeños (magnitud entre $M_s > 5.0$, 5.5 o bien IV en la escala de Mercalli Modificada (MM)).

2.4. Evaluación del potencial de licuefacción

Según Arduino en el 2003 lista que, para toda evaluación de riesgo de licuefacción se debe responder a las siguientes tres preguntas:

1. ¿Es el suelo susceptible de presentar licuefacción?
2. ¿Es la carga suficientemente fuerte como para desencadenar la licuefacción?
3. ¿Causará la licuefacción un daño inaceptable?

Las respuestas a estas preguntas se relacionan con los siguientes temas:

1. Susceptibilidad de licuefacción
2. Evaluación del potencial de licuefacción
3. Efectos producidos por la licuefacción

Kramer y Stewart (2004) coinciden que la caracterización pueden compararse para determinar el potencial de licuefacción del suelo, partiendo de la capacidad de los suelos de soportar las cargas producidas por las cimentaciones, relacionándose directamente con su resistencia. De acuerdo a la exploración de campo, si un depósito de suelo ha sido determinado como susceptible (caracterización del suelo existente, tipo, contenido de humedad, nivel freático, etc.), y el segundo paso en el desarrollo de una evaluación de riesgo de licuefacción es considerar el principal potencial que posee el suelo para que dé inicio la licuefacción la carga sísmica a la que el suelo está sometido.

2.5. Efectos de la licuefacción

Los asentamientos diferenciales en depósitos de suelos y cimentaciones, estructuras subterráneas y de contención, destrucción de estructuras elevadas, como puentes, presas, terraplenes; son efectos particulares que se observan por el fenómeno de licuefacción, conjunto a ello va acompañado de desplazamientos o fallas del terreno, Troncoso en el año 2000 lista los distintos efectos.

Fallas de flujo. La ocurrencia de un sismo posterior a un período de lluvias, puede provocar el deslizamiento de masas de suelo saturadas o fluidos viscosos, en forma de corrientes de suelo, con un gran poder destructivo debido a la baja resistencia al corte y saturación, derivado por el aumento de la presión de poro y deformaciones, llegando al punto de suelos suspendidos en agua o licuados, provocando a su vez destrucción total de las estructuras formadas por suelos, como taludes de presas, muros, terraplenes, entre otros (Suárez, 1998).

Deslizamientos. Se desarrolla a lo largo de una o varias superficies de falla, de una o varias masas de suelos; la presión de poros en la superficie de falla genera la reducción de la resistencia al corte; pueden ser traslacionales y rotacionales. Los desplazamientos laterales se relacionan a bloques de suelo superficiales de gran tamaño, por licuación de estratos inferiores, principalmente por la acción de las fuerzas de inercia y las gravitacionales ocasionadas por un terremoto; el movimiento se extiende por varios metros en superficies libres, laderas, planicies, provocando rompimiento de suelo y a su vez, escarpes, y hundimiento de bloques (Suárez, 1998).

Asentamientos y volcanes de arena. Los asentamientos principalmente están ligados a la disipación de presión de poro y a efectos de consolidación de las partículas de suelo justo después de la ocurrencia de movimientos sísmicos, y en presencia del nivel freático a poca profundidad, tiende a posibles erupciones de volcanes de arena, con flujos de agua acompañados de sedimentos que se elevan a la superficie, siendo ésta, la manifestación más común del fenómeno de licuefacción.

Pérdida de la capacidad de soporte. En estructuras de gran tamaño, como edificios, presas y obras subterráneas, la licuefacción provoca pérdida de resistencia al corte y por consiguiente la capacidad de soporte de éste, produciéndose deformaciones, y en presencia de agua, tiende a producirse flotación de elementos, generando volcamientos de las estructuras, generalmente en estratos de arena (Cosillo, 2012).

Oscilaciones del terreno. En planicies, cuando ocurre licuefacción, los estratos profundos tienden a desacomodarse y con ello los estratos superiores, generando oscilaciones manifestando por medio de ondas, produciendo abertura o fracturas y cierre de fisuras del terreno (Santibáñez, 2006).

3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Delimitación del área

Guatemala presenta condiciones muy variables, debido a la diversidad de tipos de suelo, rocas, ambientes tectónicos, altitud y climas; considerando que está ubicada en una zona sísmica, le contribuye las formaciones de aluviones, en las cuencas geológicas del Pacífico y Atlántico, así como en los lagos Izabal, Amatitlán y Atilán (Ochaeta, 1974).

El elemento estructural más impresionante del mapa de la ciudad de Guatemala, es la depresión del lago de Amatitlán, la cual es formada por la compleja subsidencia del área triangular definida por la intersección de la convergencia hacia el sur del graben de la ciudad de Guatemala y la falla de Jalpatagua; es fundamentalmente de origen tectónico, y el vulcanismo dentro de ésta, se interpreta como consecuencia del tectonismo. Por estas razones, la depresión es llamada Depresión Vulcano-Tectónica (Cáceres, 2008).

Al lago de Amatitlán lo alimentan las descargas de un complejo de ríos, siendo uno de ellos el río Villalobos, que pertenece a la cuenca del lago de Amatitlán, formado de la unión de los ríos tributarios Molino y San Lucas, éstos alimentados por el río Platanitos a la altura del kilómetro 12.5 de la ruta CA-9 al Pacífico, formando el depósito de aluvión más característico por el arrastre de sedimento de las aguas del río en mención; formando planicies en las riberas del río, área de estudio conocido como delta del río Villalobos (García, 2002).

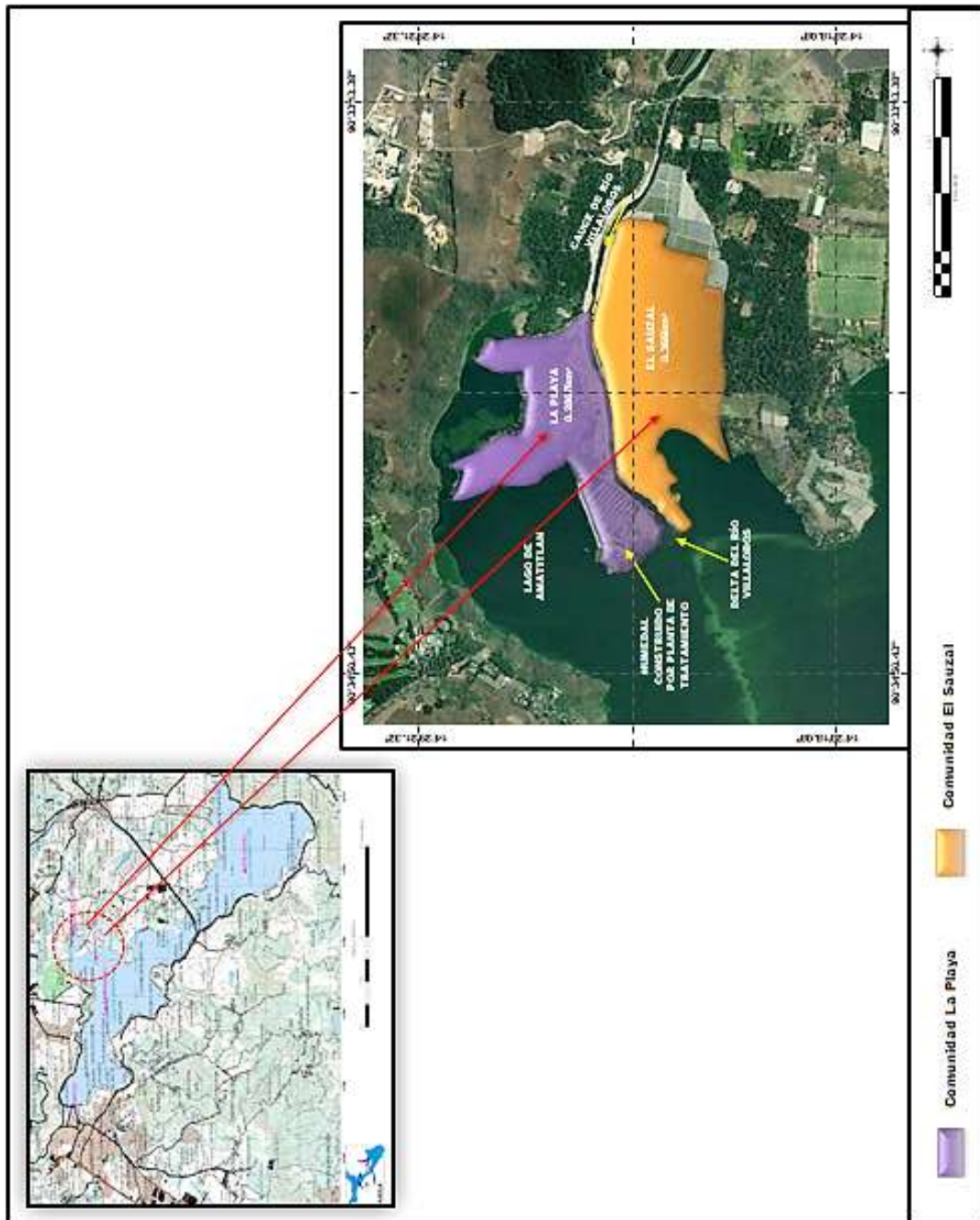
3.1.1. Descripción del área

El delta del río Villalobos es una planicie de acumulación aluvial (Qa) de formación reciente, la cual sufre una estrangulación de aproximadamente 500m de longitud en las inmediaciones de la población de Villa Canales, con el tiempo ésta formación fue direccionando el cauce del río Villalobos y formando a sus costados, planicies de acumulación sedimentaria, transportada por las aguas del río en mención; sedimentos de composición variada de suelos, cenizas volcánicas, arenas, y gravas, lo cual ha contribuido a la formación de lo que hoy ocupa un área aproximadamente de 16.68 km² y desemboca a distintas direcciones al lago de Amatitlán.

Para efectos del presente, se delimitó y se estudió el área compuesta por las comunidades de La Playa y El Sauzal, ubicadas en la desembocadura del río Villalobos en el departamento de Villa Canales con dirección N-E; la constante deposición de sedimento ha ido formando lóbulos de aluvión, que actualmente ocupan un área aproximadamente de 1.50km², con dirección al N-E del lago de Amatitlán (ver, Anexo 2), comunidades que han sido afectadas por el fenómeno de licuefacción, recurrentemente, desde el terremoto de 1976, hasta el día de hoy.

El delta alcanza planicies adyacentes, en sentido oriente y occidente; en el siguiente mapa, se denotan las áreas de estudio, las cuales conforman el delta y que pertenecen al aluvión en formación (Qa), el cual desemboca en el lago de Amatitlán, actualmente localizado en las coordenadas 14.479188N, 90.574313O, respectivamente (IGN, 2012).

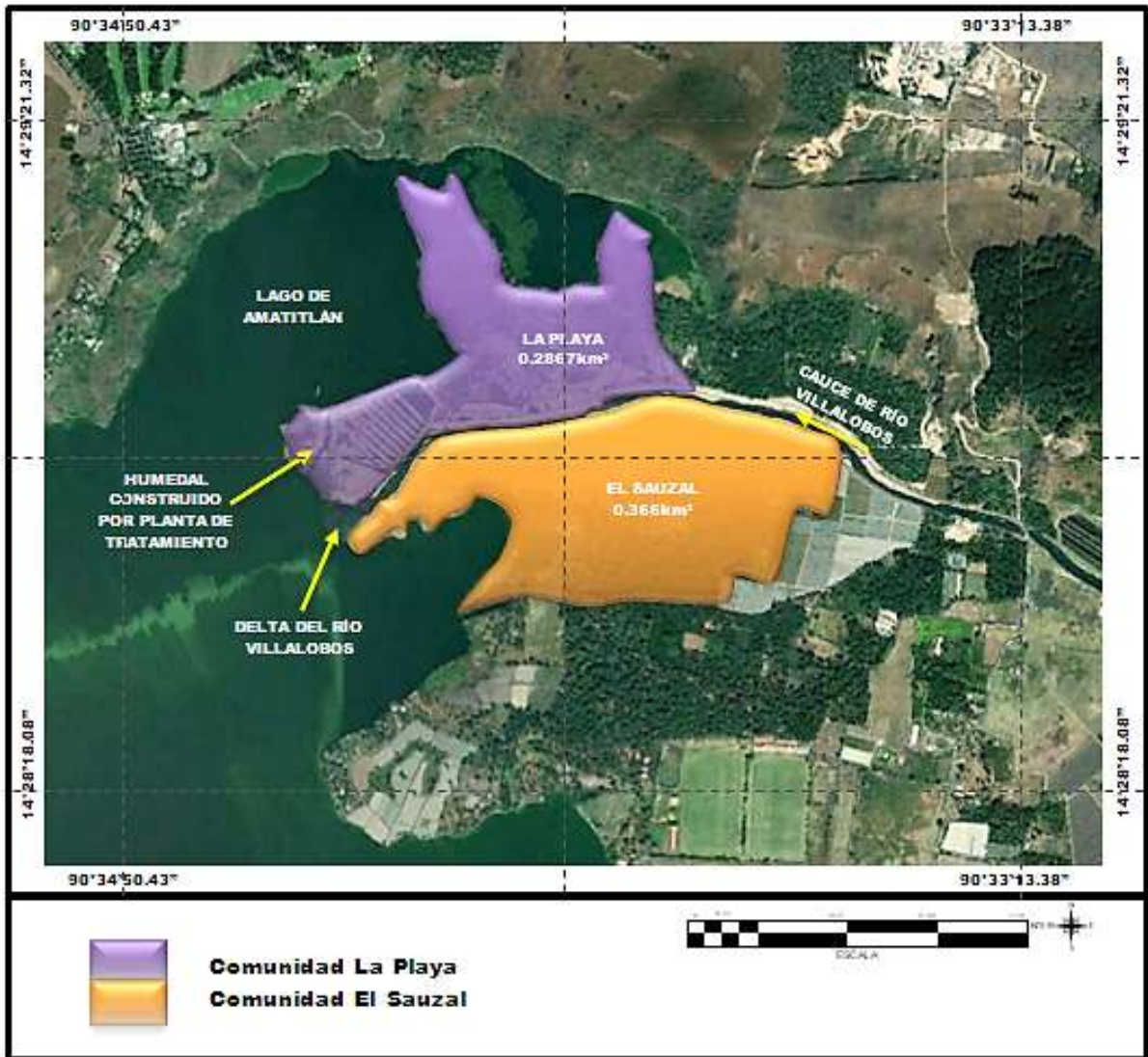
Figura 3. **Mapa de localización del área de estudio, delta del río Villalobos, comunidades La Playa y EL Sauzal**



Fuente: Ortofoto, Instituto Geográfico Nacional, IGN. Adaptado por la autora en formato gvSIG (julio, 2012).

De acuerdo a los antecedentes de ocurrencia del fenómeno de licuefacción registrados en investigaciones de Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. en 1978, se analizaron las áreas ubicadas en la desembocadura del delta del río Villalobos, el cual con el tiempo ha formado la planicie de sedimento arrastrado por las corrientes del mismo río, caracterizando así, la unidad de estudio, ubicada en las comunidades denominadas La Playa y El Sauzal (ver, Anexo 2).

Figura 4. **Mapa de ubicación del área de estudio, delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal**



Fuente: Ortofoto, Instituto Geográfico Nacional (IGN). Elaboración propia en formato gvSIG (julio, 2012).

3.1.2. Desarrollo urbano del área

Actualmente las comunidades establecidas están en un área aproximadamente 1.50km², conformándole las comunidades de La Playa y El Sauzal, siendo La Playa, la más poblada, con un registro de 53 viviendas, y El Sauzal con 16; generalmente áreas de uso agrícola con un 80 % del área destinado para el cultivo de la caña de azúcar y un 20 % entre café y otras plantas (Municipalidad de Villa Canales, 2012).

Los márgenes del río próximos al delta, están en un 85 % deforestado y erosionado. Actualmente la diversidad en calidad y cantidad de los desechos orgánicos sólidos y efluentes vertidos es tal, que las planicies en formación se han incrementado; hoy por hoy, el río Villalobos recibe continuamente las descargas residuales de tipo doméstico, industrial, agrícola y hospitalario, y parte de los desechos provenientes del sur de la ciudad capital, así como de los municipios de San Miguel Petapa, Villa Canales, Villa Nueva y Mixco. El depósito de sedimentos en la zona de desfogue del río Villalobos (delta) anualmente cobra un área considerable del Lago de Amatitlán de 10,000 m², pese al grado de contaminación presente en el sitio, estas áreas han seguido poblándose en los últimos años (García, 2002).

Dentro de las obras que ha realizado la Autoridad de Rescate del lago de Amatitlán (AMSA) para recuperar las riberas del río Villalobos, se han desarrollado proyectos de diques y pozos de saneamiento a lo largo del río y algunas áreas que conforman el delta del río Villalobos; la descarga de drenajes, sin embargo, sigue siendo la principal causa de polución, junto al arrastre de sedimentos provenientes de éstos, dando lugar a la continua formación del aluvión.

La siembra del vetiver colocada en la desembocadura de las aguas del río Villalobos, consumen por medio de sus raíces, hasta un 50 % de nitrógeno y fósforo del lago de Amatitlán, junto con las ninfas controladas que se hallan en ese punto.

Las comunidades han ido estableciéndose a raíz de la necesidad de vivienda en la zona en mención, la cual ha tenido un avance significativo, debido a la acumulación de sedimentos de formación reciente, depositado en las riberas de la planicie.

Las siguientes imágenes satelitales muestran el crecimiento territorial de la zona de estudio, delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal 1969-2012 (Unidad de Catastro, Municipalidad de Villa Canales, 2012).

Figura 5. **Vista aérea del área de estudio, delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal, para los años 1969, 2002, 2008, 2012**



Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN). adaptado por la autora, en formato gvSIG (julio, 2012).

El avance territorial ha variado de acuerdo a las condiciones geomorfológicas del sitio, así como de la diversidad climatológica presente en el sector de estudio. Se realizó una tabla que abarca años disponibles para su medición (1969-2002-2008-2012).

Tabla I. Tasa de crecimiento territorial de la zona de estudio, delta del río Villalobos, comunidades la Playa y el Sauzal del año de 1969 al 2012

Escenario Tendencial en km ²				
Año	La Playa (área en km ²)	El Sauzal (área en km ²)	Total (área en km ²)	% Tasa de Crecimiento
1969	0.3298	0.4767	0.8065	
1978	0.3184	0.4592	0.7776	-3.58%
2002	0.3562	0.4325	0.7887	1.43%
2008	0.3253	0.4198	0.7451	-5.53%
2012	0.3638	0.4279	0.7917	6.25%

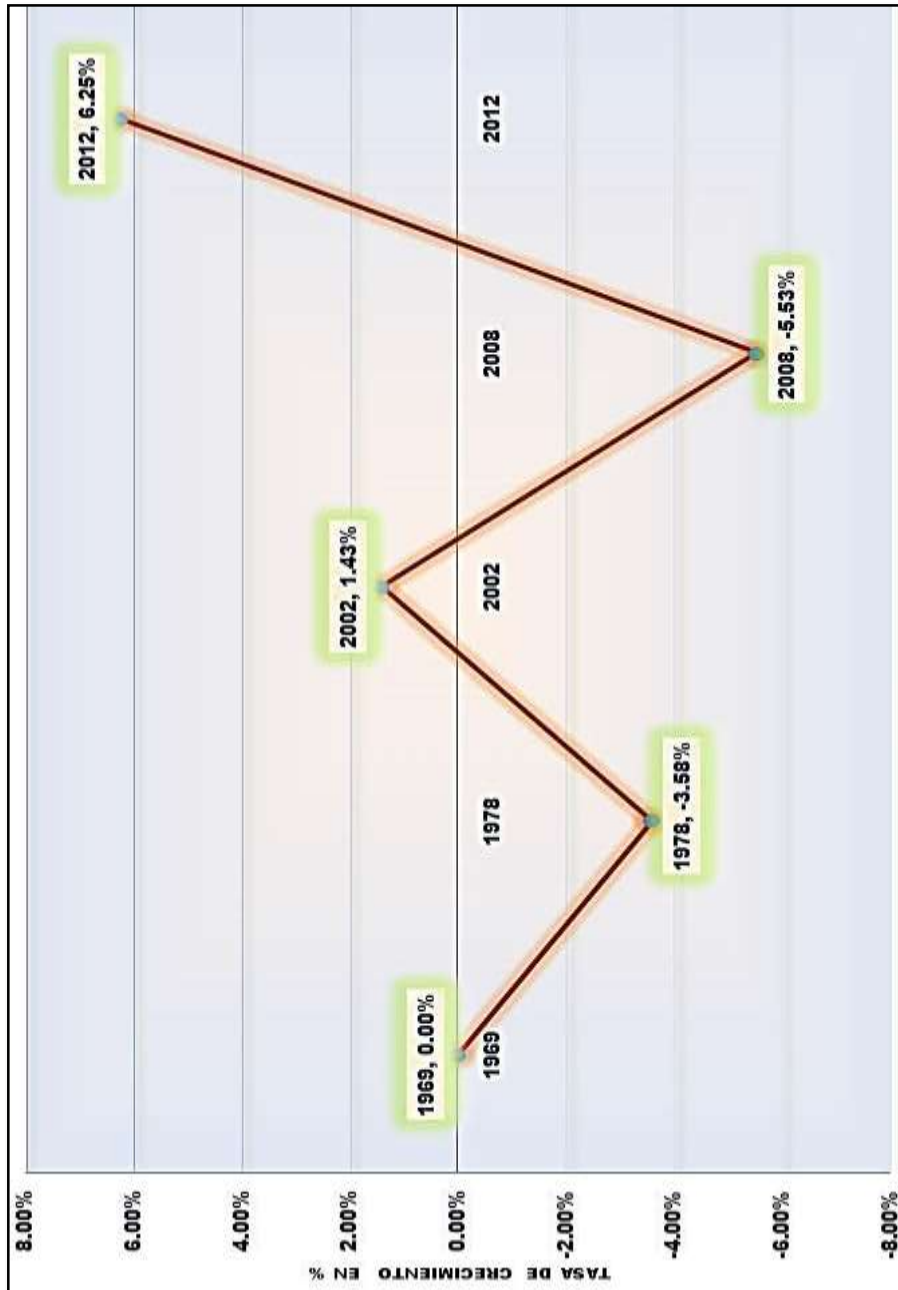
Fuente: IGN (Instituto Geográfico Nacional), Unidad de Catastro, Municipalidad de Villa Canales, 2012. Elaboración propia (julio, 2012). (ver Figura 6).

Tabla II. Resumen estadístico de tasa de crecimiento territorial y proyección de crecimiento

Variable	Valor	AÑO	% Tasa de crecimiento
Media	0.005423338	2015	-0.32
Error típico	0.002298796	2018	-0.11
Mediana	0.003783926	2021	0.1
Desviación estándar	0.004597592	2023	0.24
Varianza de la muestra	2.11E-05	2025	0.38
Curtosis	2.921174362		
Coefficiente de asimetría	1.693200625		
Rango	0.010141436		
Mínimo	0.001992032		
Máximo	0.012133468		
Suma	0.021693351		
Cuenta	4		

Fuente: IGN (Instituto Geográfico Nacional), Unidad de Catastro, Municipalidad de Villa Canales, 2012. Elaboración propia (julio, 2012).

Figura 6. **Gráfica de tasa de crecimiento territorial de la zona de estudio, delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal 1969-2012**



Fuente: IGN (Instituto Geográfico Nacional), Unidad de Catastro, Municipalidad de Villa Canales, 2012. Elaboración propia (julio, 2012).

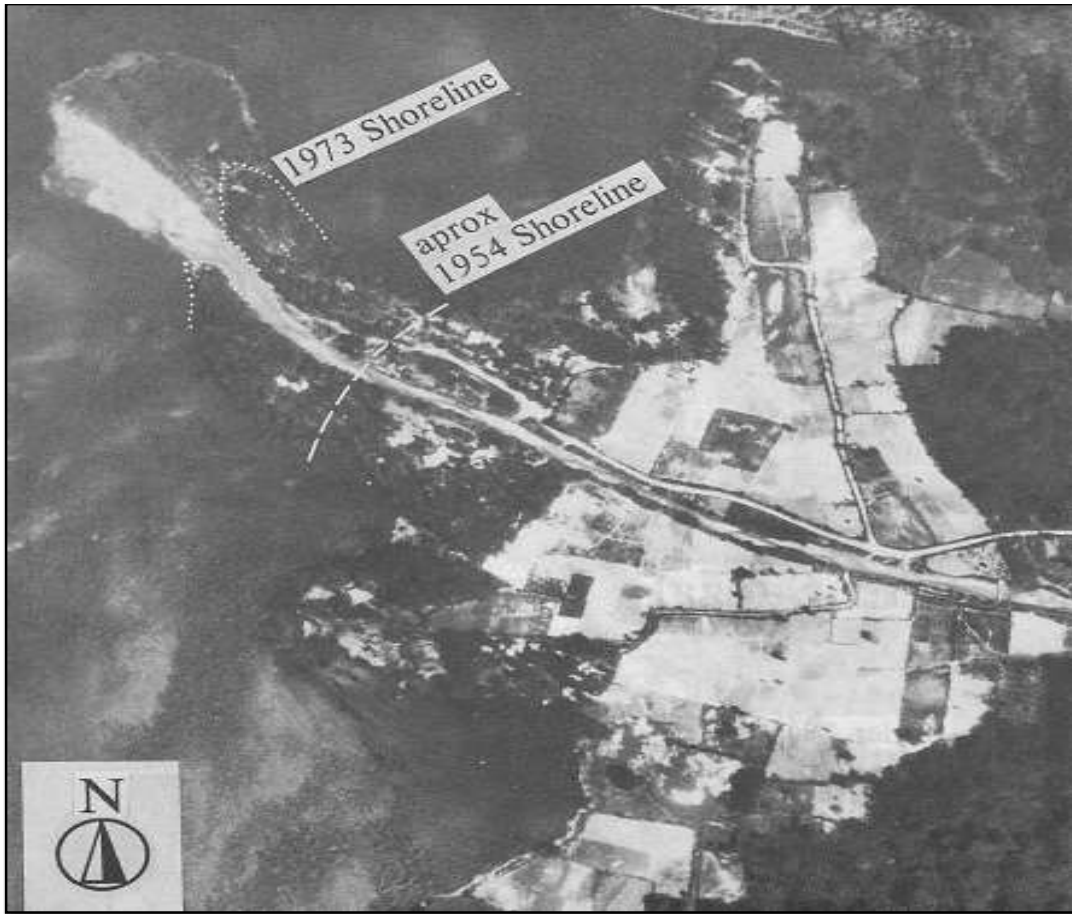
3.1.3. Antecedentes de ocurrencia de la licuefacción en el área de estudio

A consecuencia del terremoto del año 1976, el sistema de fallas de Mixco y Jalpatagua se reactivaron dramáticamente, generando desplazamientos verticales de más de 0.20 m, hundimientos del sur al este del Valle de Guatemala; fallas que fueron reactivaciones de antiguos planos de fracturación, generando desplazamientos progresivos de arriba hacia abajo en una serie de estratos de cenizas volcánicas del bloque de fallamientos (INSIVUMEH, 2012).

La manifestación del fenómeno de licuefacción se reflejó a gran magnitud, causando daños estructurales en las comunidades de La Playa y El Sauzal ubicadas en la acumulación triangular, entre los brazos de la desembocadura del río Villalobos (delta), en ese entonces en formación por sedimentos transportados; comunidades destruidas en un 90 % y el otro 10 % seriamente dañada. Agrietamientos debido a diferenciales laterales, con mayor intensidad en la zona La Playa y en un grado menor en El Sauzal y en algunas áreas aledañas; según registros de la comunidad, aproximadamente 1.00 km² se vio gravemente afectada.

En el Simposio del año de 1978, Rosenfeld publica la siguiente fotografía donde se muestra una vista aérea, después del terremoto del año 1976; la cual refleja la formación del delta del río Villalobos, para el año en lista; en el lado noreste del lago de Amatitlán al sur 21.00 km de la ciudad de Guatemala.

Figura 7. **Vista aérea de la formación del delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal, después del terremoto del año 1976, mayo 1978**



Fuente: Hoose, S. N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012. Guatemala.

Mientras que la pérdida de vidas y bienes en la ciudad capital, se incrementaban, la manifestación de licuefacción en el sitio de estudio era sólo una pequeña porción de las totales en todo el territorio guatemalteco, la concentración de los daños fue intensa, la liberación de ondas sísmicas provocó agitaciones severas en los suelos de formación joven, lo cual dejó la zona de estudio susceptible a sufrir más daños graves en futuros eventos sísmicos.

La mayoría de las casas en ambas comunidades eran de estructuras de adobe y de ladrillo, la intensidad de los movimiento del terremoto dañó a ambas comunidades (La Playa y El Sauzal) considerando que el terremoto presentó $M_s = 7.5$ con desplazamiento horizontal de más de 3.00m. en algunas partes a lo largo de la falla de Mixco consistentes en informes del INSIVUMEH, del año de 1976. En las inmediaciones del delta del río Villalobos para el año de 1976, las fallas observadas se reflejaban muy poco entre la vegetación densa (plantaciones de banano y café) siendo difícil caracterizarlas; sin embargo en los sitios donde eran visibles a altitud después del terremoto, fueron catalogadas como áreas inhabitables; actividades agrícolas posteriores destruyeron y alteraron pruebas de la manifestación del fenómeno de licuefacción en los campos (Villagrán, 1995).

3.1.3.1 Comunidad La Playa

Según registros de informes elaborados en el Simposio Internacional sobre el terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976 y el proceso de reconstrucción, se catalogó el estado de susceptibilidad de la región central del Valle de Guatemala por Hoose, S. N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. en 1978.

Derivado de ello, se examinó el sitio de estudio; de las 32 casas en la comunidad de La Playa en ese entonces, 29 fueron dañadas fuertemente por desplazamientos diferenciales laterales, verticales y afloramiento de volcanes de arena; la zona conformaba en ese entonces, el lóbulo más reciente de formación del delta del río Villalobos; una separación total de 9.60 m de 3 grupos de grietas del suelo paralelas, se midió dentro de una larga diagonal de 33.00 m, con una pendiente de expansión de 3.2 % lateral y 1.8°O hacia el lago de Amatitlán, con grietas de 1.00 m de profundidad en el mismo recorrido.

3 viviendas fueron dañadas por una falla reflejada hacia la superficie, 14 por desplazamientos laterales y 12 por desplazamientos verticales, causando grietas y separación de las cimentaciones y pisos.

Entre los daños presentados se observaron deformaciones de paredes, inclinaciones y separaciones de esquinas de las edificaciones. Estos daños se discuten de acuerdo a los siguientes términos.

- Estructuras de mampostería con cimentaciones perimetrales: asentamientos diferenciales del suelo y desplazamientos laterales.
- Estructuras de marcos de madera, cimentaciones de pilotes: ebulliciones de arena y el esparcimiento lateral.
- Muros de contención, caminos rurales y pavimentos: subsidencia, re-direccionamiento, desplazamientos laterales.

En la figura 8, se ilustra una vivienda construida de ladrillo reforzado, agrietada por desplazamiento lateral, una de las esquinas de la parte frontal de la vivienda, incluyendo la chimenea se inclinó categorizado el suceso debido a la licuación de la arena, (de acuerdo a su composición estratigráfica); en viviendas de bloques de concreto armado como se muestra en la Figura 9, agrietamientos en dirección diagonal (45°), de 1.50 m de ancho, de la vivienda fueron severamente interrumpidos por ebulliciones de suelo en forma de volcanes de arena, elevó y agrietó el piso de concreto, separándose a lo largo de fracturas, por propagación diferencial lateral, y asentamientos diferenciales de 0.50 m hasta 1.20 m (Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012. Guatemala).

Figura 8. **Colapso de vivienda, propagación lateral por diferencial vertical causado por la licuación del suelo**



Fuente: Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012. Guatemala

Figura 9. **Grieta por propagación lateral de esfuerzos inducidos por sismos y desplazamiento verticales**



Fuente: Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012. Guatemala

En estructuras de madera sobre pilotes de hormigón, la capa de arena superficial fue expulsada por grietas y cajas de registro, como se muestra en la figura 10; desplazamientos laterales se ilustran en la figura 11, los cuales sustancialmente dañaron viviendas y cultivos, provocando grietas en el suelo, de gran tamaño entre 1.00 a 1.70m en dirección al noreste; edificaciones seriamente dañadas se ubicaban en las orillas del lago.

Figura 10. **Desplazamiento lateral de suelo en vivienda apoyada por pilotes de madera, al noreste del delta del río Villalobos**



Fuente: Hoose, S. N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012. Guatemala.

Figura 11. **Grieta por propagación lateral de esfuerzos inducidos por sismos, desplazamientos diferenciales verticales, en comunidad La Playa, después del terremoto del año 1976, abril 1976**



Fuente: Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012. Guatemala.

A 12.00 m al cauce del río Villalobos, muros de contención de concreto armado fueron interrumpidos por grietas reflejadas en la superficie del suelo, causados por desplazamientos laterales. Al norte del río Villalobos, grietas en paredes con desplazamientos horizontales; rampas para botes, caminos y patios también fueron dañados por las grietas expuestas a la superficie del suelo, todo esto, debido a los desplazamientos laterales; re-direccionando conjuntamente el cauce del río en las inmediaciones del delta (Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. Autorizada, 2012. Guatemala).

3.1.3.2. Comunidad El Sauzal

Se identificaron cambios notables en la configuración de la línea de costa de El Sauzal; desplazamientos laterales fueron frecuentes, pero no muy abundantes y graves como en La Playa; aunque en la comunidad de El Sauzal se manifestaron estos efectos, los daños podrían haber sido graves de haber viviendas en las zonas afectadas por los márgenes laterales y hundimientos. En la comunidad, 8 viviendas fueron destruidas en su totalidad, la falta de suelo consolidado en el área, ya tenía historial de colapso, el cual se presentó por hundimientos del lóbulo del delta en el año 1922-1928, según informes de los habitantes del sitio esto ya había cambiado considerablemente la configuración de la línea de costa, seguido, con la agitación del terreno para el terremoto de 1976, afectó de nuevo la costa, modificada por las grietas en el suelo, debido a los desplazamientos laterales y las ebulliciones de arena.

El agrietamiento ocurrido en la zona de El Sauzal, provocó separaciones de suelo entre los 0.05m y 0.10m, la mayoría de las fracturas eran extensionales y las grietas provocadas por el movimiento vertical y horizontal eran paralelas a la tendencia de las fracturas de mayor tamaño con profundidades de 0.15m y 0.22m. Se manifestaron pequeños volcanes de arena fluida, dispersos por toda la zona de El Sauzal, similares a los descritos en La Playa.

En la figura 12 y 13, se observa, cómo el agua del cauce del río Villalobos ingresó a las viviendas, formando crestas de elevación del terreno, producido por los diferenciales laterales y verticales, provocando el levantamiento de las estructuras y dejando inhabitables las edificaciones. (Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012. Guatemala).

Figura 12. **Colapso de vivienda, crestas por diferenciales laterales y verticales, consecuencia de la subsidencia del suelo**



Fuente: Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012. Guatemala

Figura 13. **Colapso de pisos de concreto destruidos, comunidad El Sauzal, después del terremoto del año 1976, abril 1976**



Fuente: Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012. Guatemala

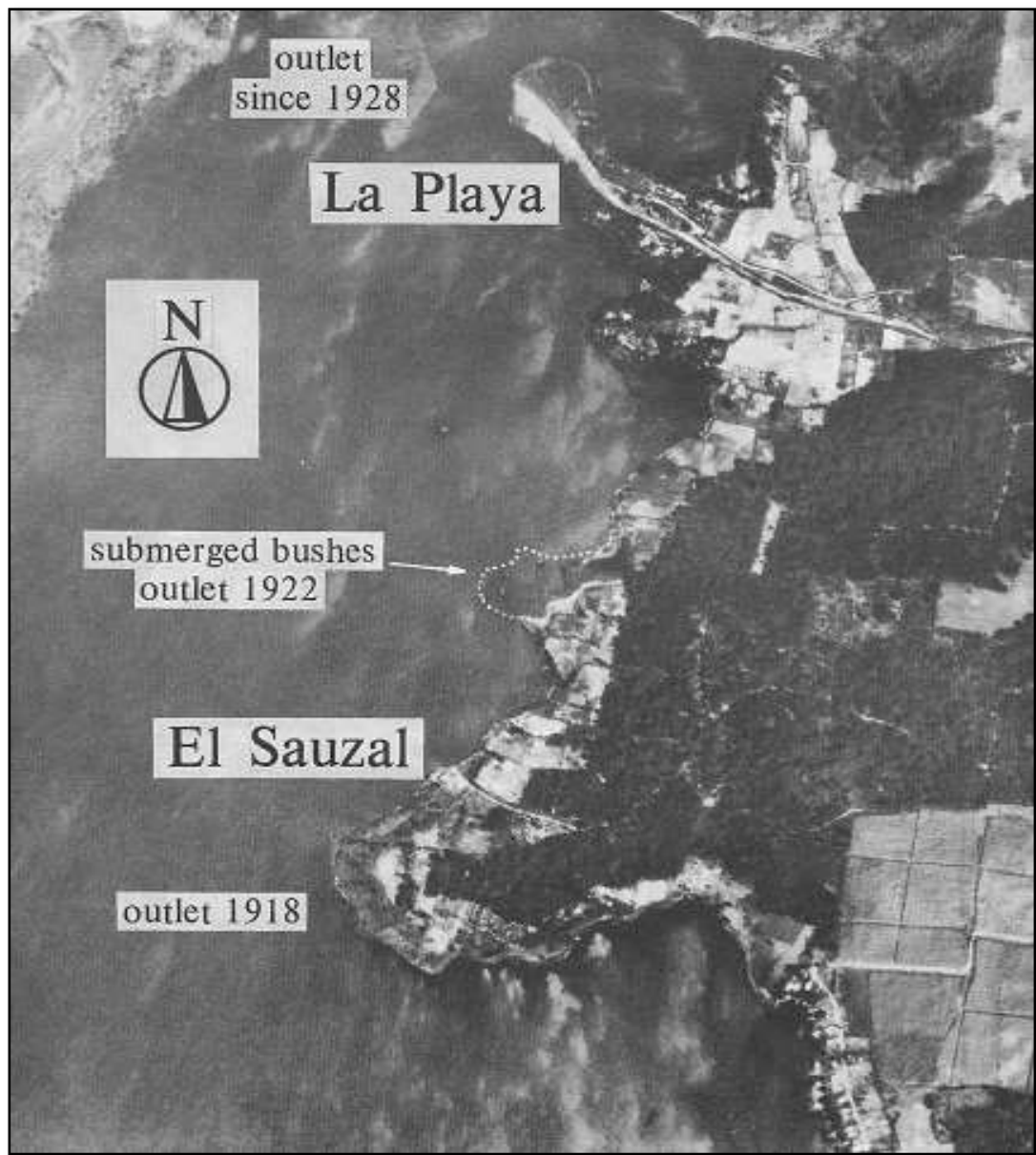
1 vivienda de ladrillo ubicada sobre una serie de grietas de 0.50 m a 0.70 m de ancho, no presentó prácticamente ningún daño, grietas de aproximadamente 13 mm de ancho en una pared. Se tiene informes por el propietario, que antes de construirse la vivienda, la piedra pómez superficial fue excavada a una profundidad de 2.00 m y se reemplazó con un material basáltico, y un muro de contención fue construido en el lado frontal de la vivienda que vista hacia el lago y la rampa para botes.

La cimentación de la vivienda fue construida con concreto armado y los muros con ladrillo reforzado; probablemente se habría visto seriamente dañada, si no fuese por las precauciones que el propietario tuvo en la construcción en general. El propietario informó que el nivel del lago en su casa subió a 1.00m de altura de lo normal para esa época del año (Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012. Guatemala).

3.1.4. Situación del área de estudio hasta el año 1978 y efectos producidos

Las fotografías aéreas mostraban desde la altitud, aberturas de suelo en el lóbulo más activo del delta, en La Playa, éstas eran de hasta 100.00 m de largo, los lados de las fracturas eran generalmente verticales y mostraban poca evidencia de agua socavada. El nivel freático en el sitio según sondeos, se encontraba entre 0.80 m a 1.22 m de profundidad con respecto a la superficie. Grietas de profundidades de 1.25 m a 2.00 m con frecuencia de 1.50 m en longitudes de hasta 45.00 m con fondos arenosos irregulares, algunos de los cuales contenían pequeños volcanes de arena.

Figura 14. **Vista aérea de la formación del delta de río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal, después del terremoto del año 1976, e indicación del área de hundimientos de años anteriores, mayo, 1978**



Fuente: Hoose, S. N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012.
Guatemala.

En el área de El Sauzal se tienen registros de abertura de grietas de 1.00 m a 1.30 m, algunas con fisuras de propagación lateral, llenándose al nivel de la superficie circundante, por agua y arena, ésta cambió considerablemente y algunas grietas expulsaban arena en sentido longitudinal.

El agua subterránea fue expulsada, lo cual provocó la ampliación de las fisuras, convirtiéndolas en grietas de gran tamaño, provocando subducción en algunos sitios.

Las erupciones de arena a lo largo de las fisuras, orificios ovalados y circulares también se observaron con mucha frecuencia, hasta mucho tiempo después que cesaran las réplicas; el lóbulo central del delta, en la comunidad de La Playa tuvo un aumento total para el año de 1978 de 1.60 m de ancho y una extensión de 5.10 m.

Los informes realizados de acuerdo a los muestreos, resumen los estratos de suelo, con porcentajes de compactación por debajo del 45 %, con una deformación de acuerdo a la acción cíclica > 28 %; el perfil estratigráfico mostraba arenas y gravas de granulometría variable, arcillas en un 30 % con un contenido de humedad denotados en rangos porcentuales, alcanzando valores del 82 %, esto denotaba que la estructura compuesta de suelo se quebró por la agitación repentina del terremoto y los sismos posteriores (Seed, H. B., Arango, I., Chan, C.K., Gómez-Masso, A., Ascoli., R.G. 1981, Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978, Trad. autorizada, 2012. Guatemala).

Las viviendas en la comunidad de La Playa, eran principalmente vacacionales y en gran parte no estaban ocupadas al momento del terremoto, de ser así el impacto de pérdidas humanas sería mayor.

Por otro lado, la comunidad de El Sauzal era un área en su mayoría agrícola, resultó con destrozos en pocas viviendas y cultivos, sin embargo no se tuvo informe de víctimas mortales (Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. 1978. Trad. autorizada, 2012 Guatemala).

Tabla III. **Resumen de datos de muestras de suelo en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal 1978-1981-1995**

Fecha de lectura	Nombre Muestra	% Compactación	% Contenido de Arcillas	% Humedad	Deformación Cíclica	Observaciones
sep -78	1	33	11	78	-	Arena mal gradada color gris muy oscura
	2	28	15	87	-	
sep -78	3	23	18	89	-	Arena mal gradada color gris muy oscura - acuifero a 14.5 pies
	4	37	16	78	-	
sep -78	3	23	14	84	-	Arena mal gradada color gris muy oscura - acuifero a 14.5 pies
	4	37	19	86	-	
abr -95	AM - 1	-	14	-	28	Nivel freático superficial - gravas mal graduadas, arenas y material orgánico
	AM - 2	-	11	-	35	
abr -95	AM - 3	-	19	-	39	Nivel freático superficial - material orgánico
	AM - 4	-	14	-	23	

Fuente: Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. (1978)., *Liquefaction-caused ground failure during the February 4, 1976, Guatemala Earthquake, Proc. Int. Symposium on the February 4, 1976, Guatemala*, y Seed, H. B., Arango, I., Chan, C.K., Gomez-Masso, A., Ascoli., R.G. (1981), *Earthquake-induced liquefaction near Lake Amatitlán*. Adaptado por la autora (julio, 2012).

3.2. Características geológicas e hidrológicas del área

3.2.1 Geología superficial

Las subsidencias en la época terciaria formaron depresiones escalonadas en la zona, dando lugar a la formación del graben que se extiende a 40.00 km en dirección NE-SO.

Delimitado al E-O por las fallas preexistentes del sistema Santa Catarina Pinula y Mixco, al sur, convergiendo en una estructura de colapso en forma concéntrica conocida como la Caldera de Amatitlán. La topografía se caracteriza por ser irregular y quebrada en un 65 %; con pequeños valles, con alturas van desde 1,150 hasta 2,565 msnm, con suelos permeable, a consecuencia de la naturaleza litológica y estructural de las formaciones geológicas presentes en la parte baja de la cuenca hidrográfica del río de Villalobos (Ochaeta, 1974).

El valle aluvial sufre una estrangulación de aproximadamente 500.00 m en las inmediaciones de la población de Villa Canales, encontrando inmediatamente la depresión vulcano-tectónica del actual lago de Amatitlán, acumulado de sedimentos aluviales (Qa) transportados por las aguas del río y lacustres con flujos de ceniza y lava basáltica y tobas. Geológicamente el área está limitada en sus flancos por formaciones volcánicas, afloramientos terciarios y cuaternarios, con orientación NW-SE de origen ígneo de rocas plutónicas sin dividir e intercaladas y depósitos de flujo y cenizas esparcidos sobre la extensa zona del delta, los sedimentos aluviales, constituyen localmente unidades hidrogeológicas con régimen erosivo y trasladado por procesos de deslizamientos por gravedad.

El historial geológico ha condicionado la estructura granulométrica del aluvión, su composición y geometría, formando así, el delta en mención, el cual desemboca en un área que suele tomar una forma triangular.

Depósitos cuaternarios. Roca volcánica de coladas de lava, rellenos de cenizas y pómez, no consolidados; paleosuelos intercalados, sedimentos fluvio-lacustres de granitos, láminas estratificadas de arcilla, limocalcario y diatomitas.

Depósitos terciarios. Tobas soldadas de composición riolítica o dacítica, conglomerados y areniscas de grano grueso, limonitas tobacias, intercolaciones de tipo fluvial, sedimentos estratificados bien clasificados.

Depósitos cretácicos. Pequeños afloramientos de calizas y arcillas al sur de la actual divisoria continental de aguas, depende del movimiento tectónico post-cretácico, sistema de fallas de rumbo Noroeste u Oeste.

Depósitos recientes. Los aluviones en la cuenca se encuentran en los valles de mayor área, en su mayoría en la desembocadura del río Villalobos, mostrando superficies de formación de material poco consolidado; estos tienen fondos anchos y planos, en donde se acumulan arenas, gravas y limos.

Se delimitó el área de las comunidades de La Playa y El Sauzal, ubicadas en la formación del delta del río Villalobos, el cual representa la mayor acumulación de sedimentos aluviales, con profundidades actualmente de hasta 30.00m; en el fondo se conocen sedimentos lacustres y deltaicos que llegan a alcanzar profundidades hasta 100.00m, con una amplitud máxima de cauce de 2.50km de radio, cubriendo una superficie de 17.00km² (Ochaeta, 1974).

3.2.2 Hidrogeología del sector

La cuenca del río Villalobos se encuentra dentro del sistema montañoso, formado por la faja volcánica que atraviesa al país y principalmente se compone de rocas terciarias y cuaternarias. El cuerpo hídrico como tal, lo constituye un caudal característico, en un volumen regular de 773.00 litros por segundo (lt/s).

El río Villalobos conduce al lago un promedio de 500.00 millones de metros cúbicos de agua (m³) por año: la erosión a causa de la deforestación, conduce miles de metros cúbicos (m³) de materia, formando a su paso planicies de inundación de depósitos aluviales, generando áreas del delta tipo abanico con dedos cortos que representan antiguas desembocaduras del río (García, 2002).

Las perforaciones de pozos en las áreas de estudio (La Playa y El Sauzal) y en el pueblo de Amatitlán, (ver Anexo 2) y los registros de exploraciones muestran secuencia de depósitos fluviales antiguos, debido a que las costas del lago de Amatitlán las forman flancos paralelos de sedimento antiguo y una serie de domos del complejo volcánico del Volcán de Pacaya.

La presencia de manantiales calientes es generado por una falla profunda de rumbo N40°O a N70°O; al lado norte del flanco hay presencia de afloramientos de lavas, formado por la convergencia del graben de Guatemala y las 2 fallas de rumbo NO del sistema Mixco-Jalpatagua (ver Anexo 2).

La alimentación de esta unidad hidrogeológica proviene principalmente de la precipitación que desciende directamente sobre ella, de la escorrentía subterránea proveniente del valle aluvial del río Villalobos y sus afluentes, debido al estrangulamiento que se manifiesta en su cauce.

Los niveles freáticos superficiales y aguas arriba (ver Anexo 1 y Anexo 2), tienden a aumentar esta condición, lo cual mejora ventajosamente las características del acuífero para su explotación, así como las infiltraciones del río y los canales que derivan en época seca, junto con los caudales de los ríos, El Bosque y Tuluja.

En cuanto a las pérdidas del afluyente hídrico, la más importante corresponde a la evapotranspiración, las cuales son producidas por la diversidad de explotaciones agrícolas que casi en un 80 % corresponde al cultivo de la caña de azúcar y un 20 % entre café y otras plantas (García, 2002).

Clima. En su climatología, hay predominancia de vientos de NE-SE, donde la temperatura media anual de la cuenca es estable (21°C - 26°C). La época más lluviosa es en los meses de junio a septiembre. La altura sobre el nivel del mar (msnm), varía desde los 1188 a 2400 msnm, ambos puntos ubicados en el municipio Amatlán (García, 2002).

Calidad de agua. Sus aguas registran altísimos índices de contaminación, por las descargas domiciliarias e industriales de la zona metropolitana, sobre todo, en época de invierno, ya que arrastran desechos sólidos, lodo, basura domiciliar y ripio. Es así como la calidad de los recursos hídricos para diversos usos se ve afectada en diferente grado; las causas del deterioro incluyen entre otras: la descarga a los cursos de aguas superficiales de líquidos cloacales y pluviales, provenientes de las industrias con nulo o escaso tratamiento.

El aporte del arrastre de suelo con contenido de plaguicidas, fertilizantes, vertido de desechos orgánicos pecuarios y otras sustancias, cuyas aguas experimentan cambios físicos y químicos, afectando no sólo la calidad del agua del lago sino también a las distintas comunidades que en ellos viven.

Un 70 % del recurso hídrico del lago de Amatitlán es utilizado para riego, consumo humano (aguas domésticas) y consumo industrial (aguas de proceso); en algunas ocasiones es irrigada hacia las alcantarillas municipales o simplemente es descargada hacia los diferentes ríos tributarios de la cuenca, los cuales no poseen un tratamiento.

A nivel general se establece que un 95 % de las aguas domésticas y de proceso no tienen un tratamiento previo para ser descargadas a los diferentes ríos (García, 2002).

4. ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO VILLALOBOS

4.1. Descripción de los factores condicionantes y/o activadores en el área de estudio

En el capítulo III, se detalló la recopilación de la información disponible del área de estudio, antecedentes de ocurrencia del fenómeno, el desarrollo y/o avance territorial del sector, caracterización geológica e hidrológica predominantes en el mismo; en el desarrollo de este capítulo se adicionan a estos, los condicionantes sísmicos, los cuales son factores que determinan la manifestación del fenómeno de licuefacción y para ello es necesaria la descripción de cada uno de ellos, los cuales proporcionan información adicional que caracterizan el área de estudio.

Para la descripción de estos factores se definen las amenazas sísmicas del área, tales como: magnitud de terremotos (M_L) y por consiguiente la intensidad sísmica (Escala Mercalli Modificada, MM) por el tectonismo de la zona, influencia indirecta de zonas de subducción, sistemas de fallas y la cadena vulcano-tectónica; éstos, responsables directos e indirectos de accionar movimientos cíclicos variables en los suelos; junto con el ambiente geológico y la intervención del ser humano por medio de procesos mecánicos, minería, perforaciones profundas, explosiones, etc. generadas en la proximidad a los sectores ubicados en las riberas del delta del río Villalobos, definiendo así, el comportamiento de los suelos, transformando sus características mecánicas (ver Anexo 1, resumen de resultados de laboratorio).

4.1.1 Actividad sísmica por efectos del tectonismo de la zona

El tectonismo en el territorio guatemalteco es el resultado de la interacción de tres placas tectónicas, Norteamérica, Cocos y Caribe, por lo que la amenaza sísmica está determinada por la actividad constante de estas fuentes, las cuales tienen lugar en los márgenes de dichas placas (ver Anexo 2).

Zona de subducción: Principal fuente de sismos asociada al límite de placas de Cocos y Caribe, cabe distinguir la zona de subducción superficial ($h = 50.00$ km), localizada a unos 120.00 km de la costa, donde la placa de Cocos comienza a sumergirse bajo la placa del Caribe, y otra de subducción intermedia ($h > 50.00$ km), localizada bajo el continente, y profunda de hasta 250.00 km; ésta representa la fuente de los mayores terremotos históricos ocurridos en Centroamérica, incluyendo Guatemala y es la única fuente que tiene dimensiones laterales suficientes para generar un terremoto de magnitud $M_w = 8.0$ y la más alta frecuencia de eventos de $M_w > 7.0$ (magnitud de momento) en toda la región (Benito, B., *et al.*, 2000).

Zonas de fallamientos: El sistema de fallas Chixoy-Polochic-Motagua, se extiende desde la costa del Caribe hasta la frontera con México, asociada al límite de placas Norteamérica-Caribe y alineadas paralelamente en dirección ENE-WSW, (ver Anexo 2), registro de terremotos por ruptura en ellas, con desplazamientos promedio hasta de 1.20 m. Algunos ejemplos son, el sismo de 1976, de $M_w = 7.50$, en la falla de Motagua, y el de 1816 en Chixoy-Polochic, de M_w estimada entre 7.50 y 7.80 (Villagrán, 1995).

Sistema de fallas de Jalpatagua: Esta falla se extiende desde el lago de Amatitlán hasta El Salvador, 30 micro fallas se localizan en la microcuenca del río Villalobos, su mayor densidad de sismos se localiza en la zona cercana a Cuilapa, debido a la presencia de fallas secundarias y conos volcánicos en los alrededores de esta ciudad.

Eventos registrados a 150.00 km de radio de $M_w = 6.90$ de magnitud, en territorio salvadoreño y sismos de $M_w = 6.30$ a 5.00 km del volcán Tecuamburro, se asocian a la Depresión de Honduras, donde se presentan pequeños segmentos de fallas normales, formando graben en forma de escalonada. Estos movimientos son poco frecuentes, sin embargo representan una fuente de amenaza para la zona limítrofe de Guatemala, excluyendo el área norte de la república. (Bommer, *et al.*, 1998, INSIVUMEH, 2012). (ver Anexo 2).

Sistema de fallas Mixco-Pínula: Este sistema, también referido como graben de la Ciudad de Guatemala, posee una alta sismicidad, concentrándose la mayoría, principalmente al occidente, sobre el sistema de fallas de Mixco. El valor del sismo más alto registrado ha sido de $M_L = 5.20$ en la escala de Richter (ver Anexo 2).

4.1.2. Complejo volcánico Fuego-Acatenango-Pacaya

La mayor sismicidad tiende a presentarse al norte de los volcanes, asociada a la actividad de éstos. En éstos sistemas no se tiene registro de ocurrencia de sismos que sobrepasen los movimientos $M_L = 4.20$, con frecuencia moderada sin descartar su peligrosidad, sobre todo por la cercanía a las riberas del río Villalobos.

El volcán de Fuego tiene registros de movimientos de magnitud $M_L < 6.50$, causando gran destrucción, debido a que tienen foco superficial (profundidad menor que 25.00 km) y sus epicentros coinciden con centros de población; poseen potencial sísmico variable, generando terremotos de diferentes magnitudes y recurrencia provocando el debilitamiento del suelo en la zona (ver Anexo 2), la atenuación varía entre las distintas zonas, y los movimientos que se generan en ellas, son de características bien diferenciadas, tanto en amplitud, frecuencia y duración (Cáceres, 2008).

Tabla IV. **Resumen de sismicidad registrada del 2007-01-01 al 2012-06-30, localizados en toda la República**

Año	Magnitud Promedio (M_L)	Agencia	Región	Cantidad de Movimientos
2007	3.89	GUA	Toda Guate	523
2008	3.92	GUA	Toda Guate	731
2009	3.94	GUA	Toda Guate	665
2010	3.95	GUA	Toda Guate	521
2011	3.86	GUA	Toda Guate	407
2012	3.95	GUA	Toda Guate	209
NOTACIÓN:				
Tiempo	Hora en la que ocurrió el evento en el hipocentro (GMT)			
Lat. N	Latitud Norte			
Long. W	Longitud Oeste			
Prof	Profundidad del hipocentro (km)			
ST	Número de estaciones utilizadas para la localización del evento			
RMS	Raíz Cuadrada del promedio o \sum de los cuadrados de los residuales.			
Mag	Magnitud en la escala de Richter (M_L sismos < 6.9)			
Age	Agencia que reportó el evento (GUA estación central, Guatemala)			
Región	Región donde se localizó el epicentro			

Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, (INSIVUMEH, Documento electrónico, Sección de Sismología). Adaptado por la autora (julio, 2012).

Tabla V. **Resumen de sismicidad registrada del 2007-01-01 al 2012-06-30, localizados en región central**

Año	Magnitud Promedio (M _L)	Agencia	Región	Cantidad de Movimientos
2007	3.55	GUA	Central	67
2008	3.58	GUA	Central	73
2009	3.32	GUA	Central	300
2010	3.54	GUA	Central	52
2011	3.25	GUA	Central	583
2012	3.47	GUA	Central	27
NOTACIÓN:				
Tiempo	Hora en la que ocurrió el evento en el hipocentro (GMT)			
Lat. N	Latitud Norte			
Long. W	Longitud Oeste			
Prof	Profundidad del hipocentro (km)			
ST	Número de estaciones utilizadas para la localización del evento			
RMS	Raíz Cuadrada del promedio o $\sqrt{\sum}$ de los cuadrados de los residuales.			
Mag	Magnitud en la escala de Richter (M _L sismos < 6.9)			
Age	Agencia que reportó el evento (GUA estación central, Guatemala)			
Región	Región donde se localizó el epicentro			

Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, (INSIVUMEH, Documento electrónico, Sección de Sismología). Adaptado por la autora (julio, 2012).

4.1.3. Otras fuentes sísmicas

La minería no es una actividad muy esparcida en Guatemala, por lo que riesgos de licuefacción en túneles no han sido registrados; teniendo en cuenta las diversas amenazas sísmicas que afectan la zona de estudio, se estableció una metodología basada en la definición de los distintos escenarios y la contribución de cada una de las fuentes sísmicas a la susceptibilidad y peligrosidad reflejada en la vulnerabilidad existente del sitio de estudio.

Los sismos menores a $M_L = 3.0$, no se consideran peligrosos, sin embargo de acuerdo a los registros es notoria la afectación al área de estudio la cantidad de sismos de magnitud moderada ($M_L = 3.0$ a 4.0) y son considerados activadores de vibraciones constantes.

4.1.4. Formación Geológica-Graben de la ciudad de Guatemala

El graben de la ciudad de Guatemala es una depresión de aproximadamente 15.00 km de ancho y al menos de 40.00 km de largo, limitado por un sistema de fallas con orientación N-S; al oeste por el sistema de fallas de Mixco y al este por el sistema de fallas de Santa Catarina Pínula. Después del terremoto del año de 1976, se activaron una serie de fallas secundarias en la zona occidental de la capital, siendo éstas, las fallas de Mixco y Jalpatagua, susceptibles a sufrir desplazamientos por sismos y por lo tanto, las más peligrosas; sin descartar la falla de Pínula; los sistemas de fallas de ambos lados del graben de Guatemala, convergen hacia el complejo del volcán Pacaya, intersecándose con el sistema de Jalpatagua, con un rumbo de N70W, constituye el borde del lago de Amatitlán hacia el Norte (Cáceres, 2008).

4.1.5. Procesos morfo-tectónicos, sedimentación

Los procesos tectónicos registrados hasta el día de hoy, cuentan con historial que caracteriza el área de estudio, en donde, la manifestación del fenómeno de licuefacción se ha presentado en episodios consecutivos; la subsidencia tectónica, la cual se traduce en el descenso de la superficie terrestre producida por las fallas geológicas en el terreno.

Activadores que han generado deformaciones del suelo, reflejando graves daños a las viviendas, obras subterráneas e infraestructura en general en ambas comunidades de estudio. Toda la evidencia de la manifestación del fenómeno de licuación, tales como la ebullición de pequeños volcanes de barro y arena, la expulsión violenta de agua del suelo, agrietamiento y asentamientos diferenciales debido a la acción sísmica, son los efectos más relevantes de la ocurrencia de dicho fenómeno, las cuales fueron evidenciados en ambos sitios; tanto en la comunidad de La Playa como en El Sauzal.

4.2. Metodología de evaluación de propiedades por medio de ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio permiten realizar investigaciones profundas y estudiar la influencia de ciertos parámetros en las propiedades del suelo. Para la obtención de información del sitio, es necesario obtener porciones de suelos, en distintos puntos para determinar características y propiedades que contribuyen a determinar la susceptibilidad al fenómeno de licuefacción, los cuales se describen a continuación (Troncoso, 1992).

4.2.1. Granulometría

Permite determinar la distribución de las partículas del suelo de acuerdo a su tamaño, con el fin de analizar tanto de su origen como sus propiedades mecánicas; el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños, se resumen por una escala granulométrica, o bien una curva, la cual permite visualizar la tendencia homogénea o heterogénea que tienen los tamaños de grano (diámetros) de las partículas, características de cohesión, permeabilidad altura de ascenso capilar y facilidad de drenaje (Cosillo, 2012).

4.2.2. Límites de Atterberg

Tiene como objetivo, determinar los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro, la cohesión del terreno y su contenido de humedad, para ello se forman pequeños cilindros de espesor con el suelo, y se definen tres límites: límite líquido, plástico y de contracción, pero fundamentalmente el rango de humedades para el cual, el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad), o bien, la propiedad que presenta los suelos hasta cierto límite sin romperse (Cosillo, 2012).

4.2.3. Gravedad específica

Se utiliza para cálculos de curvas granulométricas, compresibilidad y potencial de expansión. Los valores de la gravedad específica son necesarios para calcular la relación de vacíos de un suelo y es utilizada en el análisis hidrométrico para graficar la recta de saturación máxima en el ensayo de compactación, válido en muestras saturadas o secas (Cosillo, 2012).

4.2.4. Ensayo de columna resonante

Consiste en someter una muestra cilíndrica de suelo, que actúa como una columna, a una carga armónica torsional o longitudinal (amplitud y frecuencia) por medio de un sistema electromagnético.

Inicialmente la frecuencia de carga tiene un valor bajo y se aumenta progresivamente hasta que la amplitud de deformación alcanza un valor máximo (Rodríguez, 2005).

4.3. Metodología de evaluación de propiedades en ensayos

in situ

Se basan en mediciones en el sitio de estudio, por ondas de propagación o sondeos dinámicos: los más comunes son aquellos destinados a medir el módulo de corte (G), es decir la pendiente de la curva tensión-deformación, a niveles de deformación, donde el suelo se comporta como material elástico.

4.3.1. Reflexión o refracción sísmica

Se generan ondas mediante un impacto en la superficie determinando la velocidad de las ondas desde esa fuente hasta uno o varios receptores ubicados a distintas distancias, sobre la superficie del terreno. Aplicando leyes de reflexión o refracción de ondas, se pueden determinar las velocidades medias de los estratos más superficiales.

4.3.2. *Down-hole*

Se utiliza para tomar medidas de tiempos de viaje de ondas sísmicas internas desarrolladas a partir la energía de la fuente generadora (emisor = superficie) la cual está constituida por una placa firmemente anclada en la superficie del terreno, sobre la cual impacta un émbolo pesado y el paso de las ondas generadas de corte “s” se capta en un instrumento receptor (receptor = interno) apoyado contra la pared dentro de un sondaje; las limitaciones del ensayo son el grado de alteración del suelo cuando se realiza el sondeo, el contacto entre la camisa del sondeo y el suelo a sus alrededores, fluidos en el sondeo, ruido sísmico y nivel freático, las lecturas de velocidad tienden a poseer cierto error para profundidades que superan los 60 m (Aponte, 2011).

4.3.3. *Up-hole*

Mide tiempos de viaje de ondas, donde los instrumentos son instalados en la superficie (receptor = superficie) y las ondas se generan mediante cargas explosivas detonadas dentro de un sondaje cercano (emisor = interno) permite conocer las velocidades de ondas bajo estados de poca magnitud, debido a la baja energía de los eventos generadores y a las largas distancias a que se ubican los receptores (Aponte, 2011).

4.3.4 *Ensayo de penetración estándar SPT (Estandar Penetration Test)*

Es el método más usado en las exploraciones de suelos, de realización rápida, mide la resistencia a la penetración del terreno, por medio de la hincada dinámica de un toma muestras que tiene una forma normalizada.

Mediante golpes de una masa de 63.50 kg se libera en caída libre desde 0.76 m de altura, confiable para suelos granulares (arenas y gravas), donde el objetivo de la prueba es conocer el número de golpes necesarios para introducir el muestreador 0.45 m en 3 intervalos de 0.15 m, tomando el número de golpes para hincar los 0.30 cm finales como valor "N". Este "N" es indicador de la resistencia del material muestreado; proporcionando una muestra representativa del suelo, obteniendo un índice útil de fuerza relativa y compresibilidad del suelo, capaz de penetrar en capas densas, gravas y rellenos artificiales de suelo; orientado a la evaluación del potencial de licuefacción de materiales granulares incoherentes, proporciona el comportamiento real del suelo durante un terremoto lo que no se puede simular en el laboratorio.

Refleja la densidad del suelo, el esfuerzo y efectos de deformación con el paso del tiempo, tensiones efectivas horizontales, los cuales influyen en la resistencia a la licuefacción, pero difíciles de obtener con muestras inalteradas, no proporciona datos continuos, como en intervalos de 5.00 pies y los estratos delgados pueden no ser valorados. (Cosillo, 2012).

4.3.5 Ensayo de penetración de cono CPT (*Cone Penetration Test*)

Utilizado generalmente en suelos con granulometría fina o suelos blandos (cohesivos) sirve para determinar el perfil estratigráfico del terreno, parámetros geotécnicos de las capas atravesadas, la capacidad portante del terreno y asentamientos frente a sollicitaciones externas, para partículas menores que el tamaño de la punta de cono.

Existen puntas mecánicas y eléctricas. Consiste en hincar una barra con punta cónica a una velocidad determinada, permitiendo medir, por medio de celdas de carga, dos parámetros importantes, la resistencia de punta y la resistencia a la fricción lateral.

Entre las ventajas del empleo de esta técnica es la información continua del suelo evaluado (1 o 2 cm), no altera considerablemente el terreno al momento de la toma de muestras y se logra obtener una mayor cantidad de datos en un mismo tiempo. (Delgado, 2008).

4.3.6. Ensayo de piezo-cono (CPTU)

Utilizada para medir presiones intersticiales (presión de agua o presión de poro) y resistencia no drenada, en la punta del cono hincado, a través de un medio poroso (roca), por medio de un transductor de presiones que van generando durante la hinca, una bomba de vacío y aceite de silicona, introduciendo una pieza de forma cónica a velocidad constante, con un penetrómetro hidráulico y varillas metálicas estandarizadas, obteniendo por medio de sensores: resistencia de punta, resistencia lateral, presiones neutras, transmitidas en tiempo real a la superficie y propiedades a través de correlaciones: estratigrafía, densidad relativa, resistencia drenada, parcialmente drenada y no drenada, ángulo de fricción efectiva de arenas, consolidación del suelo, equilibrios hidrostáticos, historial de tensiones, coeficiente de permeabilidad (Rodríguez, 2005).

4.4. Determinación de la susceptibilidad al fenómeno de licuefacción en el delta del río Villalobos, de acuerdo a parámetros de evaluación

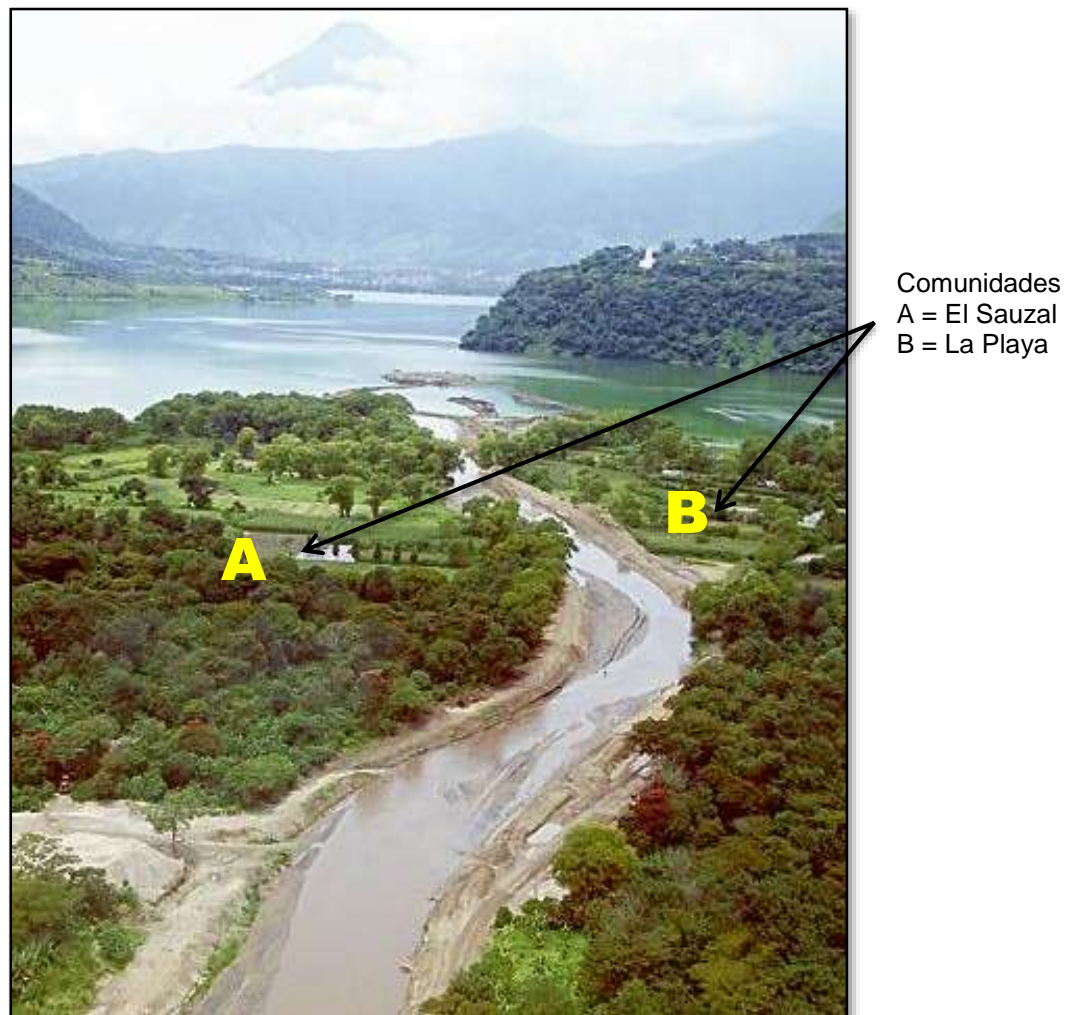
Se realizó de acuerdo a los parámetros de evaluación de la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2003), los cuales se describen a continuación (ver capítulo II, sección 2.3)

4.4.1 Edad del depósito

El depósito de suelos en el área de estudio, tanto para la comunidad de La Playa como para El Sauzal, se consideran de formación reciente.

Débiles, poco cohesivos; hasta antes del año 1976, año de ocurrencia de uno de los terremotos más catastrófico en el territorio nacional ($M_s = 7.5$), ya registraba incrementos de depósitos aledaños a las riberas del río Villalobos, el cual se extendió a gran velocidad aumentando el área en formación, contribuyendo a las desviaciones del cauce del río (ver figura 15).

Figura 15. **Vista aérea del cauce y planicie de formación aluvial reciente del área de estudio, delta del río Villalobos**



Fuente: AMSA. Adaptada por la autora. (septiembre, 2011).

Se estima que la edad de la formación del delta es menor de 155.00 años, se catalogan suelos relativamente jóvenes, que hoy por hoy continúan formando segmentos de suelos de bajos grados de compactación y contribuyen al aumento de formación de áreas en los sectores en mención, los cuales se consideran suelos con mayor probabilidad de ocurrencia a licuarse.

4.4.2. Origen del suelo

El origen de la formación de los suelos identificados en el área de estudio, se debe al transporte o arrastre que da lugar a la deposición de sedimentos constantes por procesos fluviales, siendo sedimentos sueltos poco consistentes de masa orgánica compuesta, transportando desechos provenientes de descargas domiciliarias e industriales locales y de la zona metropolitana; aguas que registran altísimos índices de contaminación, sobre todo en época de invierno arrastran desechos sólidos, lodo, basura domiciliar y ripio.

En las siguientes fotografías, se ilustran los suelos, en las planicies de rellenos de formación recientes no compactados, paralelas al cauce del río Villalobos, Comunidad El Sauzal y La Playa respectivamente.

Figura 16. **Recopilación del reconocimiento visual de campo actual de la planicie de formación aluvial reciente, comunidad El Sauzal al SE, delta del río Villalobos**



Fuente: propia, (junio, 2012).

Figura 17. **Planicie de formación aluvial reciente, comunidad La Playa al NE, delta del río Villalobos**



Fuente: propia, (junio, 2012).

Las descargas contienen líquidos cloacales y pluviales, éstas se mezclan con el suelo transportado por gravedad, suelos que sufren cambios físicos y químicos, afectando sus propiedades físicas y mecánicas.

Figura 18. **E-1, estratigrafía del suelo existente, delta del río**

Villalobos



Fuente: propia, (junio, 2012).

Figura 19. **Relleno aluvial, El Sauzal al SE, delta del río Villalobos.**



Fuente: propia, (junio, 2012).

4.4.3. Distribución del tamaño de los granos

El tamaño de los sedimentos arrastrados, han formado depósitos de suelos de graduación variada, parcial y/o totalmente saturados, por el viento y cursos de agua; formando entonces una columna de sedimento que ha condicionado la estructura granulométrica del aluvión, su composición y geometría.

El material de relleno es de granos con dimensiones variadas (10mm a 60mm), bloques, polvo de rocas, gravas finas y arenas de basaltos, cenizas, andesitas, limos de pómez y cierta presencia de arcillas, intercaladas en formas de bandas o capas de estructura clasificadas, representando antiguos lechos del río, ésta composición hace susceptible la columna estratigráfica.

Investigación exploratoria: Como parte del desarrollo experimental de la investigación, se ubicaron 6 puntos para la identificación de la columna estratigrafía del suelo en dichas áreas de estudio (ver Anexo 2), de los cuales por limitación de permisos de accesos, únicamente fue posible muestrear en las estaciones E-1, E-3, E-4 y E-6. (ver tabla VI, resumen de ensayos de laboratorio, Anexo 1 y Anexo 2).

Figura 20. **E-2, estratigrafía del suelo existente y en formación, en el área de estudio, delta del río Villalobos, comunidad El Sauzal**



Fuente: propia, (junio, 2012).

Figura 21. **E-3, estratigrafía del suelo existente y en formación, en el área de estudio, delta del río Villalobos, comunidad El Sauzal**



Fuente: propia, (junio, 2012).

Se realizó una exploración geotécnica de acuerdo a los alcances de la investigación, obteniendo para ello, muestras alteradas con promedios de profundidad de exploración determinados por la ubicación del nivel freático (ver tabla VI), para obtener información específica de cada sitio de estudio por medio de ensayos de laboratorio (ver Anexo 2).

Figura 22. **E-4, estratigrafía del suelo existente y en formación, en el área de estudio, delta del río Villalobos, comunidad La Playa**



Fuente: propia, (junio, 2012).

Se realizaron ensayos de granulometría (ASTM D-422), límites de Atterberg (ASTM D-4218), gravedad específica (ASTM D-8549), prueba de infiltración, ver resumen, Anexo 1).

El tamaño y la distribución de los granos se observan en las fotografías, están definidos por capas de material no consolidados, desechos plásticos, material orgánico, por arrastre o transporte recientes a la planicie.

Figura 23. **E-6, estratigrafía del suelo existente y en formación, en el área de estudio, delta del río Villalobos, comunidad La Playa, al Noreste**



Fuente: propia, (junio, 2012).

En la tabla VII, se resumen las características de cada uno de los suelos evaluados. En E-1, E-4 y E-6 se caracterizaron los suelos como arenas mal graduadas graduada con poco o nada de finos de color gris variado (SP) considerado un suelo limpio de arenas.

En E-3 como arenas mal graduadas con poco componente limoso de color gris oscuro o bien arenas limosas con mezclas de arenas y limos (SM), con fracciones finas sin plasticidad, características de suelos con contenidos limosos inorgánicos, polvo de roca y arenas (SP, SM). Se descarta la presencia de gravas; los perfiles denotan contenidos de arenas en un promedio dado en porcentajes, del 98.76 % y porcentaje de finos entre 0.95 % y 1.72 %. (ver tabla VI).

Por la naturaleza de la columna estratigráfica de los suelos evaluados, no se identificaron límites de consistencia, debido a que las partículas de los suelos carecen de características de cohesión y por ende, las partículas no tienden a juntarse ni adherirse, siendo una condición muy particular de suelos friccionantes como las arenas.

El análisis de la información obtenida denotan que los suelos muestreados no cuentan con una apropiada distribución de granos, ya que los coeficientes de uniformidad están entre los rangos < 15 , los diámetros medios oscilan entre $0.05 < D_{50} < 1.0\text{mm}$, careciendo de propiedades de compactación entre las partículas debido al contenido de finos $< 5\%$ adicional a esto, el respaldado de los informes de investigaciones realizadas en 1978 por Hoose, Wilson, y Rosenfeld, la composición granulométrica de los suelos existentes, denotan poca o casi nula, la probabilidad de ser compactados y por su composición aumenta la susceptibilidad a ser licuados.

Tabla VI. **Resumen de ensayos de laboratorio en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y El Sauzal**

TIPO DE ENSAYO:	Granulometría, % Humedad, Densidad, Límites de Atterberg	Fecha:	20 de mayo del 2013
Proyecto:	LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN DELTA DE VILLALOBOS	Tipo de Medición:	Pozo artesanal a cielo abierto
Estación o Muestra:	E-1, E-3, E-4, E-6	Peso de Tara:	Variable
Comunidad	El Sauzal		
Estación	E-1	E-3	E-6
Clasificación SUCS	SP	SM	SP
Descripción del suelo	Arena mal graduada color gris variado	Arena con poco componente limoso de color gris oscuro	Arena mal graduada color gris claro
Profundidad de toma de muestra	1.50 metros	1.25 metros	1.25 metros
Profundidad de nivel freático	1.19 metros	0.92 metros	0.97 metros
Porcentaje de finos	1.72%	1.57%	1.59%
Porcentaje de arenas	98.28%	98.42%	98.41%
Porcentaje de gravas	0.00%	0.00%	0.00%
Coefficiente de Uniformidad Cu	2.5	2.68	2.84
Coefficiente de Curvatura Cc	1.23	1.02	0.77
Porcentaje de humedad	20.60%	19.86%	20.60%
Gravedad Específica	2.63	2.67	2.62
Densidad natural	1.61 g/cm ³	1.66 g/cm ³	1.72 g/cm ³
Densidad saturada	1.98 g/cm ³	2.11 g/cm ³	2.17 g/cm ³
Límites de consistencia	sin límites / no cohesión	sin límites / no cohesión	sin límites / no cohesión
	La Playa		
	E-4		
	SP		
	Arena mal graduada color gris oscuro		
	1.25 metros		
	1.12 metros		
	0.95%		
	99.95%		
	0.00%		
	2.18		
	0.77		
	21.16%		
	2.65		
	1.66 g/cm ³		
	1.98 g/cm ³		
	sin límites / no cohesión		

Fuente: Propia y Municipalidad de Villa Canales. Adaptado por la autora (mayo, 2013).

4.4.4. Profundidad de las aguas subterráneas

El desarrollo de las mediciones de niveles de profundidad de aguas subterráneas *in situ*, se detalla en cuatro etapas:

Etapa 1: Se tomaron lecturas de niveles freáticos a nivel de superficie por medio de pozos artesanales existentes (diámetros varios y barreno helicoidal) en ambas comunidades, ubicando niveles freáticos estáticos a profundidades medidas en metros. Su representación P1, P2, P3, pertenecen a las observaciones mensuales de la subcuenca 22, ubicada en el municipio de Amatitlán, lecturas realizadas en un periodo continuo de 4 meses, de los cuales se determinaron promedios de profundidades de niveles freáticos de P1, P2, P3, de 1.83m, 0.93 m, 5.39 m respectivamente. (ver tabla VI, tabla VII).

Etapa 2: Las profundidades de las tomas de muestras de suelo para su caracterización se determinaron por la ubicación del nivel freático de cada pozo (ver tabla VII, Anexo 1 y Anexo 2), llegando a alcanzar un promedio de toma de muestra de 1.33m sobre la superficie. Se halló nivel freático superficial a una profundidad promedio de 1.05 m, con porcentajes de humedad entre 19.86 % a 21.16 %

Con la información recabada de las profundidades promedio del nivel freático de los pozos existentes y las obtenidas para su caracterización, se determinó que los niveles freáticos se encuentran ubicados a profundidades menores de 5.00 m, tanto para la comunidad de La Playa como en El Sauzal, valores que determinan condiciones desencadenantes de exposición de agua mezclada con arena hacia la superficie, al ser sometidos a vibraciones o agitación del suelo, lo cual contribuye a afloramientos de agua subterránea.

Tabla VII. **Resumen de niveles freáticos de la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal**

Identificación de Pozo:		1		La Playa		2		La Playa		3		El Sauzal					
Nivel de Lectura:	Nivel Estático:	Comunidad:	Nivel Dinámico:	Comunidad:	Nivel Dinámico:	Comunidad:	Nivel Dinámico:	Comunidad:	Nivel Dinámico:	Comunidad:	Nivel Dinámico:	Comunidad:	Nivel Dinámico:				
1190 msnm	X			1192 msnm	X			1195 msnm	X								
Tipo de Medición:		Pozo artesanal		Pozo artesanal		Pozo artesanal		Pozo artesanal		Pozo artesanal		Pozo artesanal					
Equipo utilizado:	Ubicación de Pozo:	Sonda sonora calibrada tubería 3/4"		Sonda sonora calibrada tubería 3/4"		Sonda sonora calibrada tubería 3/4"		Sonda sonora calibrada tubería 3/4"		Sonda sonora calibrada tubería 3/4"		Sonda sonora calibrada tubería 3/4"					
	14.48388N	90.569163O		14.47848N	90.584219O			14.47288N	90.561769O								
Fecha de Lectura:		Nivel Freático (metros)		Promedio (metros)		Fecha de Lectura:		Nivel Freático (metros)		Promedio (metros)		Fecha de Lectura:		Nivel Freático (metros)		Promedio (metros)	
ABRIL	20/04/2012	1.51	1.45	20/04/2012	0.72	0.81	20/04/2012	4.87	4.85	MAYO	16/05/2012	5.79	6.06	JUNIO	22/06/2012	6.55	5.72
	21/04/2012	1.32	1.45	21/04/2012	0.89	0.81	21/04/2012	4.76	4.85		17/05/2012	6.18	6.06		23/06/2012	5.29	5.72
	22/04/2012	1.53	1.45	22/04/2012	0.83	0.81	22/04/2012	4.92	4.85		18/05/2012	6.22	6.06		24/06/2012	5.33	5.72
MAYO	16/05/2012	1.53	1.71	16/05/2012	0.97	1.02	16/05/2012	5.79	6.06	JULIO	20/07/2012	4.85	4.92	% promedio de profundidad del nivel freático	5.39		
	17/05/2012	1.74	1.71	17/05/2012	0.99	1.02	17/05/2012	6.18	6.06		21/07/2012	4.98	4.92				
	18/05/2012	1.87	1.71	18/05/2012	1.11	1.02	18/05/2012	6.22	6.06		22/07/2012	4.92	4.92				
JUNIO	22/06/2012	1.88	1.98	22/06/2012	0.85	0.9	22/06/2012	6.55	5.72	% promedio de profundidad del nivel freático	5.39						
	23/06/2012	1.95	1.98	23/06/2012	0.92	0.9	23/06/2012	5.29	5.72								
	24/06/2012	2.12	1.98	24/06/2012	0.94	0.9	24/06/2012	5.33	5.72								
JULIO	20/07/2012	1.98	2.17	20/07/2012	0.93	0.97	20/07/2012	4.85	4.92								
	21/07/2012	2.11	2.17	21/07/2012	1.02	0.97	21/07/2012	4.98	4.92								
	22/07/2012	2.41	2.17	22/07/2012	0.97	0.97	22/07/2012	4.92	4.92								
% promedio de profundidad del nivel freático		1.83		% promedio de profundidad del nivel freático		0.93		% promedio de profundidad del nivel freático		5.39							

IGN (Instituto Geográfico Nacional), Unidad de Catastro, Municipalidad de Villa Canales, 2012.

Adaptado por la autora (julio, 2012).

Cabe mencionar que el agua subterránea brota a la superficie (ver figura 23), si a ello le agrega la contribución de las recargas naturales que se deslizan en las planicies por medio de escorrentía y la precipitación pluvial (ver tabla IX, tabla X, prueba de infiltración *in situ*), estos procesos alimentan los acuíferos en formación, generando superficies las arenas lavadas, pómez y cenizas volcánicas, que resultan ser conductores perfectos de fluidos en toda la columna estratigráfica, conformados a su vez por oquedades o vacíos en su estructura, lo cual facilita la elevación de presión de poro y provoca la saturación de las capas de suelo, generando porcentajes de humedad altos y valores de compactación bajos.

No obstante la velocidad de drenaje que está relacionada con la conductividad hidráulica del suelo, propicia condiciones de drenaje más rápido en los suelos arenosos en comparación con los suelos arcillosos y por ende la velocidad de infiltración o de colación (permeabilidad) de agua es mucho mayor que en suelos arcillosos o cohesivos.

Etapa 3: Se realizaron 2 pruebas de infiltración por medio del balance hídrico mediante el método Lewis-Kostiakov (*in situ*) haciendo uso de la ecuación de Kostiakov-Lewis (1932) en la cual se calculó la tasa de infiltración expresada en términos de una potencia decreciente de tiempo, por medio de un modelo exponencial. Con este método es posible determinar propiedades de los suelos como velocidad de infiltración, tasas de infiltración, antecedentes de contenidos de humedad y condiciones superficiales del suelo (Cosillo, 2012).

Dicho modelo está determinado por la variación de altura *vrs.* variación del tiempo a lo que se le conoce como capacidad de infiltración. (ver tabla IX, ver figura 27-29, Anexo 1).

El modelo de la curva de cambio de altura de agua en el tiempo o bien el movimiento del agua a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo es producido por las fuerzas gravitacionales y capilares provocadas tanto por la precipitación y el escurrimiento (pérdidas) (ver Anexo 1).

Etapa 4: Se obtuvieron datos acumulados de lecturas de precipitación por medio de transmisión de datos de redes automáticas con generación de información a cada 10 minutos, unidades ubicadas en el municipio de Amatitlán; obteniendo un modelo de distribución tendencial, con el apoyo de la sección de Climatología e Hidrogeología del Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH, 2013) y de investigaciones de acuerdo a Fuentes en el 2013.

En la tabla X, se muestra el registro de datos acumulados de precipitación dadas en mm del año 1977- 2012 en la Estación Meteorológica Compuertas Amatitlán. (ver tabla X, Anexo 1).

En la figura 30 de Anexo 1 se observa el modelo representativo de la lluvia anual y la significancia de la tendencia en las series de datos, de acuerdo a Fuentes J. en el 2013, la tendencia se analiza en sentido positivo o negativo y la significancia a un nivel del 95 % de confianza (prueba de *Spearman Rank Order Correlation*); Serie Compuertas Amatitlán, con un Coeficiente Rs 0.43, (estadístico estimado 2.70 y teórico 2.03) con una tendencia significativa, la cual refleja que las lluvias van en aumento de acuerdo al comportamiento ambiental y regional de la zona de toma de lecturas.

4.4.5. Densidad

Los suelos existentes en ambos sectores de estudio, son arenas sueltas, saturadas, mal graduadas (SP y SM según SUCS) (ver resumen de ensayos tabla VI, Anexo 1); cuando el agua intersticial drena muy fácilmente, genera el reordenamiento de las partículas del suelo por la variación en el índice de vacíos y por lo tanto su densificación. Lo anterior es una de las razones por las cuales se presentan daños por el cambio de volumen del terreno soportante, principalmente asentamientos diferenciales. Es importante resaltar que las arenas sueltas presentes en el área se comprimen para cualquier nivel de deformación; éste comportamiento relaciona el índice crítico de vacíos y la densidad relativa crítica, que corresponden a la frontera entre comportamiento de compresión y de dilatación, se observa que las arenas más sueltas se densifican, el suelo pierde su resistencia y se licua.

Figura 24. **Afloramiento de aguas subterráneas, en el área de estudio, delta del río Villalobos, comunidad El Sauzal**



Fuente: propia, (junio, 2012).

Figura 25. **Afloramiento de aguas subterráneas, densificación de las arenas sueltas en el área de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa**



Fuente: propia, (junio, 2012).

4.4.6. Peso del recubrimiento y profundidad del suelo

Según la composición de los suelos existentes, las tensiones entre las partículas son casi nulas, por el peso del recubrimiento de éstos es muy bajo por su composición, espesores superficiales que oscilan de 1.00 m a 3.00 m, sedimentos sueltos poco consistentes con contenido de masa orgánica y mineral con profundidades aproximadamente de 30.00 m. En el fondo se conocen sedimentos lacustres y deltaicos alcanzando profundidades de hasta 100.00 m, con una amplitud máxima de cauce de 2.50 km de radio; depósitos influenciados en la superficie por el movimiento vertical caracterizado propiamente por la atenuación sísmica y la consecutiva actividad sísmica de la falla de Jalpatagua, lo cual dificulta la estimación real (Q_a , ver Anexo 2).

4.5. Análisis de resultados

El análisis del potencial de licuefacción se basó en la identificación de los factores activadores y/o detonantes de acuerdo a los parámetros de evaluación detallados por la Organización Panamericana de la Salud (OPS).

- De la información recabada por medio de investigaciones realizadas anteriormente y del desarrollo experimental realizado, se determinó que los suelos existentes, poseen columnas estratigráficas con contenidos mayores de 98 % de arenas, porcentaje de finos menores al 5 %, en condiciones saturadas, siendo sedimentos sueltos poco consistentes de masa orgánica compuesta.
- Los niveles freáticos reflejan profundidades medida en metros de $0.81 < NF < 6.06$. porcentajes de humedad que oscilan entre 19–25 %, hallándose en estado saturado, columnas estratigráficas no variadas, los cuales denotan alta conductividad hidráulica y fácil drenaje, condicionando el estrato a desarrollar el fenómeno.
- La intensidad de lluvia y la corriente del cauce del río que desemboca en el delta, contribuyen a modificar las propiedades de los suelos, careciendo de componentes cohesivos, y por consiguiente pesos de recubrimiento limitado para poseer características aceptables para fundaciones, debido a los bajos grados de compactación.
- Con base al soporte cuantitativo de estudios anteriores y los efectuados, se amplió la investigación del sitio, para definir una escala de riesgo; se estableció la vulnerabilidad del sector para determinar la habitabilidad y/o expansión urbanística en función de las fuentes de riesgo y los efectos, de acuerdo a ello, se estima que el 57 % del área total estudiada (1.50 km²) está entre los parámetros medios de ocurrencia del fenómeno y el 43 % restante está sujeta a la manifestación alta del fenómeno.

- Los efectos inducidos por un sismo o terremoto están en función de las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio de estudio. La amenaza sísmica regional predominante de la zona, está asociada a la manifestación del fenómeno de licuefacción, esto conlleva a determinar, que la probabilidad de ocurrencia de éste es alta, condicionando estructuras existentes, considerando ambos sitios vulnerables a experimentar pérdidas estructurales y humanas.

5. SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN EN EL DELTA DEL RÍO VILLALOBOS MUNICIPIO DE VILLA CANALES

5.1. Zonificación de la susceptibilidad del fenómeno de licuefacción

El área de estudio, comunidad de El Sauzal y La Playa; ambas comunidades ubicadas en la desembocadura del río Villalobos, área aproximadamente de 1.50 km², con dirección al N-E, del lago de Amatitlán, se delimitó con base en la cartografía existente y la generada a partir de imágenes satelitales y ortofotos.

Se unificaron testimonios históricos, recopilados y analizados de la información disponible, reconocimiento del área, criterios fisiográficos y geomorfológicos, para delimitar en cuatro franjas o zonas, que presentan potenciales activos a la manifestación del fenómeno de licuefacción.

Para la zonificación del área, se tomaron en cuenta las amenazas tanto sísmicas como hidrogeológicas, que impactan a las comunidades, considerando el análisis de resultados descrito en el capítulo IV, de acuerdo a los parámetros de evaluación para determinar el potencial de licuefacción.

5.2. Identificación de niveles de potencial de licuefacción de acuerdo a la evaluación

Alto. Se denota con el numeral romano I, y de color rojo, el área con mayor potencial de ocurrencia; siendo ésta, la zona de mayor riesgo, la cual comprende las riberas con dirección N-O del lóbulo perteneciente a la Playa, y al S-E del lóbulo central del área de El Sauzal; ambos sectores están expuestos a efectos de marea en época de lluvia, ingreso de las aguas en la planicie del aluvión, generando inundaciones, incrementando el nivel freático de ambos sectores. La deforestación es predominante, ya que no cuenta con barreras naturales de vegetación, que reduzcan el ingreso de las aguas al terreno.

La composición de los suelos de formación reciente, la conforma generalmente arenas mal graduadas, las cuales carecen de propiedades que permitan fundaciones debido a que las partículas de los suelos no poseen cohesión (no hay presencia de límites de consistencia de los suelos) y por ende las partículas no tienden a adherirse, siendo una condición muy particular de suelos friccionantes como las arenas, junto con los desechos y basura que lo conforman diariamente, siendo estratos que no poseen capacidad portante y están susceptibles a fracturarse con movimientos sísmicos continuos.

Los niveles freáticos en promedio se ubicaron a poca profundidad, oscilan entre 0.81 m y 1.83 m; los depósitos se van formando sobre lagunas de sedimentos generando estratos 100 % saturados, se cataloga el área como no apta para la expansión urbanística, debido a la susceptibilidad que tienen los suelos en manifestar efectos del fenómeno de licuefacción, en especial aquellas que se localizan en terrenos de formación más reciente a escasos 10.00 m a 15.00 m de la línea de costa hacia dentro o fondo de la formación de la planicie.

Medio. Se denota con el numeral romano II y color naranja, el área con probabilidad media de ocurrencia, siendo ésta la zona central de ambos lóbulos del aluvión, de acuerdo a la información obtenida, tanto de la estratigrafía del suelo como de la inspección del estado de las estructuras existentes. Su composición granulométrica es similar, ésta la conforman arenas mal graduadas generadas por deposición sedimentaria de capas de cenizas volcánicas, basaltos, polvo de roca, porcentajes muy bajos de arcilla. Por lo tanto, estos suelos igualmente carecen de características para adherirse.

El nivel freático superficial en el área de La Playa alcanza profundidades de 1.45 m a 2.00 m y en las zonas de El Sauzal, se tienen profundidades de 2.17 m a 4.50 m. Éstas profundidades aunque difieren de las que conforman el numeral I, no dejan de ser estratos de suelos que están a condiciones inestables.

Los depósitos de igual manera se encuentran en un estado saturado, genera el proceso de fácil reordenamiento de partículas de suelo (arenas SP, SM) y hace más eficiente la conducción de agua intersticial y por ende, la exposición a la superficie aunque quizá no con la misma velocidad que se pueda presentar en el sector I, (en donde el afloramiento de agua subterránea es inminente), generando entonces la pérdida total de resistencia de los suelos que conlleva al desarrollo del fenómeno de licuefacción.

Bajo. Se denota con el numeral romano III, y de color amarillo, las áreas con menor probabilidad de ocurrencia, no con ello se descarta la ocurrencia del fenómeno, los suelos en estos segmentos del área de estudio, poseen más edad de formación, depósitos un poco solidificados con condiciones de soporte muy superficiales, las cuales se denotan en franjas centrales intermedias entre la zona de La Playa y El Sauzal.

En un área de aproximadamente 0.25 km², se delimitó de la planicie aluvial con menor influencia de ingreso de mareas y/o inundación, los niveles freáticos son poco profundos, entre 1.00 m y 6.06 m, en promedio para ambos sitios; existe presencia de vegetación en los terrenos, sin embargo por la formación del suelo y los condicionantes propios del sector no se puede descartar a no ser licuado, considerado que las estratigrafías denotan arenas mal graduadas carentes de finos, como predomina en toda el área de estudio; este segmento ha presentado poca manifestación de los efectos de licuefacción, sin embargo no es posible descartar la ocurrencia del mismo.

5.3. Alternativas de mejoramiento de suelo con potencial de ocurrencia del fenómeno de licuefacción

Existen varios criterios para determinar la susceptibilidad de un suelo a la licuefacción, los cuales se vieron en el capítulo II, en el caso de obtener un resultado que presente dificultades para la construcción se necesita realizar una evaluación más detallada y buscar alternativas de mejoramiento de suelos.

Reducir los riesgos de licuefacción es uno de los objetivos de las técnicas de mejoramiento del suelo para evitar que se produzcan incrementos en la presión de poros durante el terremoto, mejorando la capacidad de drenaje, las cuales se describen a continuación.

Vibro-flotación. Se realiza en un área dividida normalmente en una cuadrícula con el uso de la penetración de una sonda vibrante en suelos granulares haciéndola colapsar para obtener un reordenamiento de las partículas y su densificación.

Vibro-emplazo. Con el método anterior en combinación de grava, formando columnas de rocas, mejorando drenaje, refuerzo y densificación al suelo.

Compactación dinámica. Se utilizan bolas de acero de hasta 200 toneladas a alturas mayores a 10.00 metros, en un área cuadrículada, logrando la densificación por medio del aumento de la presión de poros.

Columnas de piedra. Columnas de grava compactadas con martillos en caída libre construidas en el suelo, por vibro flotación o tubos de acero.

Inyección de grouting de compactación. Cuando hay existencia de cimentaciones se realizan mezclas de agua, arena y cemento, son inyectadas a presión para formar bulbos de presión entre las partículas que se disipan y contribuyen a la densificación del suelo.






Técnicas de drenaje. El aumento de la presión de poro se disipa muy rápidamente cuando el agua drena con libertad entre las partículas del suelo, mejorando sus condiciones de drenajes reduciendo los riesgos de licuefacción; haciendo uso drenajes verticales y sintéticos.

Cimentaciones profundas. Los pilotes hincados son recomendables en depósitos susceptibles a licuefacción, deben resistir las cargas producidas por el peso de la estructura, horizontales y laterales; el adecuado dimensionamiento de la sección, de concreto o madera, transmiten las cargas de la estructura por debajo del suelo susceptible a la licuefacción, hasta llegar a un estrato firme, también sirven para resistir cargas horizontales y momentos flectores inducidos por el sismo.

5.4. Resultados obtenidos

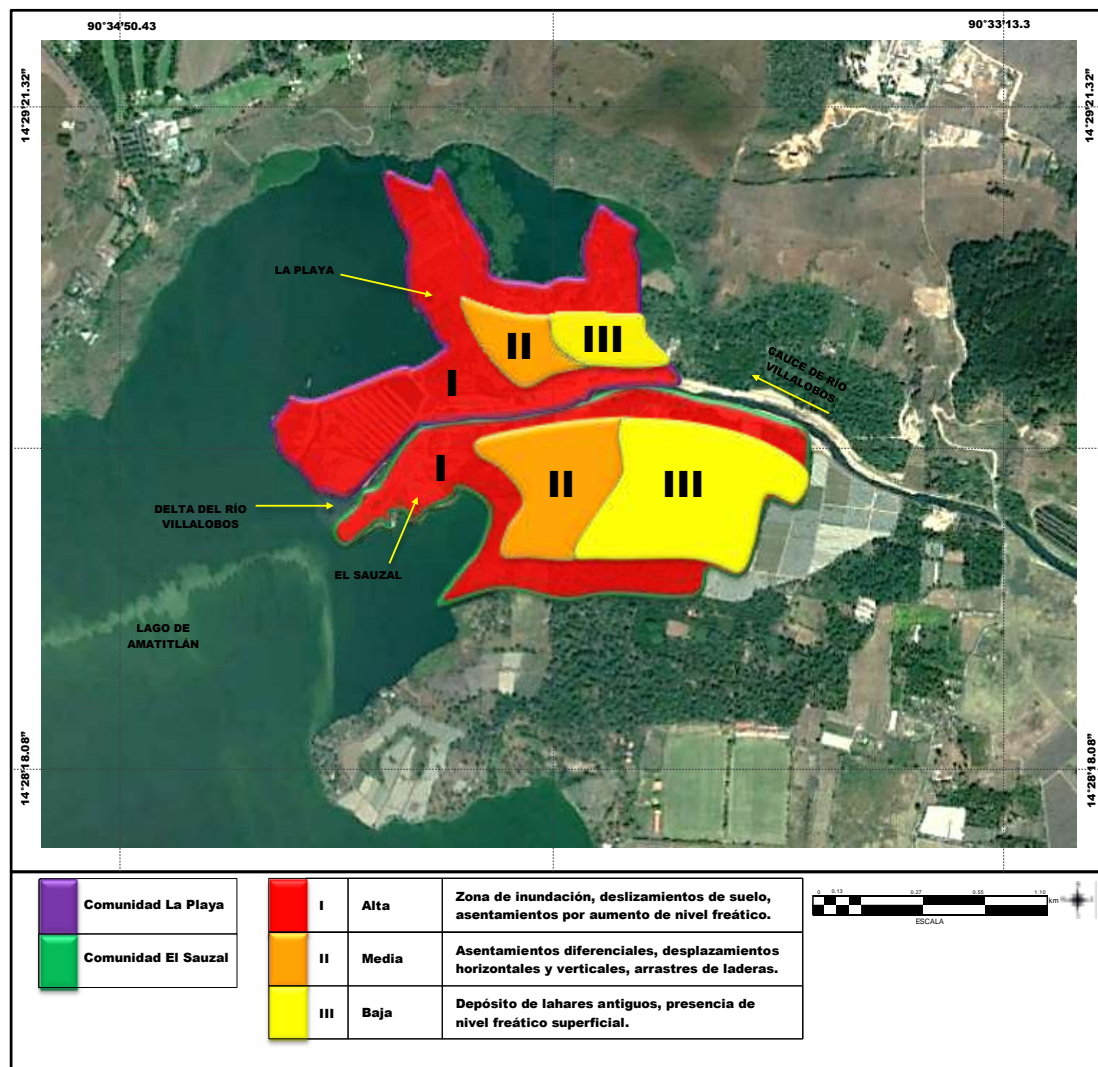
Se elaboró un mapa del sitio, identificando las áreas de riesgo que están sujetas a posibles manifestaciones del fenómeno de licuefacción, a partir de los factores identificados que predominan en la zona del delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal. Se identifica con color rojo, la zona más vulnerable o de riesgo alto; de color naranja la zona de riesgo medio, y de color amarillo, la zona de riesgo menor a la manifestación del fenómeno, el cual se detalla en el siguiente cuadro de nomenclatura para su fácil comprensión.

Tabla VIII. **Nomenclatura de indicación de áreas susceptibles para Mapa de Susceptibilidad al fenómeno de licuefacción en el delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal**

		La Playa		El Sauzal
	I	Alta	Zona de inundación, deslizamientos de suelo, asentamientos por aumento de nivel freático, ebullición de colvanes de arena. Alta susceptibilidad por agitación sísmica	
	II	Media	Asentamientos diferenciales, desplazamientos horizontales y verticales, arrastres de laderas cercadas debido a la prolongada agitación sísmica.	
	III	Baja	Depósito de lahares antiguos, presencia de nivel freático superficial.	

Fuente: elaboración propia. (mayo, 2013).

Figura 26. **Mapa de susceptibilidad al fenómeno de licuefacción en el delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal**



Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH.
Elaborado y adaptado por la autora en formato gvSIG. (mayo, 2013).

CONCLUSIONES

1. Las propiedades de los suelos evaluados se hallan en la clasificación de arenas mal graduadas (SP), y arenas mal graduadas con poco componente limoso (SW), estratigrafías con 98.76 % de arenas y finos <5 %.
2. Los suelos evaluados en las 4 estaciones de muestreo, están en estado saturado, niveles freáticos entre 0.81m < NF < 6.06m, columnas de fácil infiltración, suelos con presiones intersticiales, baja resistencia al corte y capacidad de carga, por consiguiente sensibles a la licuefacción.
3. Los sismos de igual o mayor magnitud de $M_L = 5$, con aceleraciones sísmicas entre $0.039 < a_{s(a_{max}/g)} < 0.200$ son activadores de potenciales de daño, leve a moderado, el movimiento de la zona de subducción, falla de Jalpatagua, microfallas en la cuenca y la cadena volcánica activa, inducen roturas superficiales y desplazamientos diferenciales, denotando un área con potencial de ocurrencia del fenómeno de licuefacción.
4. El desarrollo de ensayos de suelos de laboratorio tales como granulometría, densidades, humedad, y/o *in situ*, profundidad de niveles freáticos e infiltración, facilitaron la obtención de propiedades geotécnicas de los suelos existentes propensos a la manifestación del fenómeno de licuefacción en el área estudiada.
5. Los efectos de licuefacción en los depósitos aluviales se evidencian en los fallos de cimentaciones, roturas superficiales, deslizamientos de laderas y deformaciones en las estructuras del sector estudiado.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios periódicos en el sector, debido a que cuenta con potencial de ocurrencia, por lo cual no se recomienda el desarrollo de proyectos urbanísticos.
2. Inspeccionar constantemente de los niveles freáticos, ya que al aumentar, mejoran ventajosamente las características del acuífero para su explotación, pero al mezclarse con los suelos de bajos porcentajes de finos, éstos se saturan y no favorecen a las condiciones urbanísticas en el sitio.
3. Evitar el asentamiento cercano a conos volcánicos y la cercanía a las fallas activas, ya que la amplificación de aceleraciones sísmicas afectan el comportamiento de los suelos blandos, manifestando roturas superficiales, asentamientos diferenciales y afloramientos de agua hacia la superficie, que a su vez contribuye a la susceptibilidad, por ello reduce la seguridad de habitabilidad en el sector.
4. Se sugiere realizar ensayos in situ como SPT y CPT, adicional a los elaborados, para determinar comportamientos más puntuales de los suelos ante amenaza de licuefacción.
5. El empleo de alternativas de mejoramiento de suelo y medidas de mitigación no estructurales, como la zonificación para uso de tierras, son particularmente efectivas si son realizadas en el tiempo preciso y ante la evidencia histórica de las manifestaciones del fenómeno de licuefacción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alva, J. E. (2005). *Licuación de suelos en el Perú*. Universidad Nacional de Ingeniería, Centro Peruano Japonés de Investigación Sísmica y Mitigación de Desastres. Lima, Perú.
2. Aponte, G., Javier (2011). *Evaluación de Métodos no convencionales de caracterización geotécnica*. Tesis de graduación para optar al grado y título de Maestro en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana Bogotá. Colombia. pp 20-21.
3. Arduino, P.,2003. *Geotechnical Earthquake Engineering. Department of Civil & Environmental Engineering*. University of Washington.
4. AMSA (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán). (2012). Plan de Manejo Integrado de la Cuenca y del Lago de Amatitlán PLANDEAMAT.
5. ASTM. (2012), (*American Society for Testing an Materials*).
6. Benito, B., Molina, E., Laín, L., (2000), *Metodología para estudio de amenaza sísmica en Guatemala aplicación al diseño sismo resistente*. Informe Técnico AECI-IGME. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Topográfica, Universidad Politécnica de Madrid, España. 2. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), Guatemala. 3. Instituto Geológico y Minero de España.

7. Benito M., Cabañas, L. (1999). *Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica*. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
8. Beles, A., Ifrim, M., García A. (1975). *Elementos de ingeniería sísmica*. Ediciones Omega. Barcelona.
9. Bommer, J.; Salazar, W.; Samayoa, R. (1998). *Proyecto de prevención y mitigación de la contaminación municipal e industrial en el área del Gran San Salvador*, Programa Salvadoreño de investigación sobre desarrollo y medio ambiente (PRISMA). El Salvador. pp 136.
10. Brandes, H., (2003). *Geotechnical and Foundation Aspects. Earthquake Engineering Handbook. London. Taylor and Francis Group*.
11. Cáceres, V., (2008). *Caracterización Sísmica para el Proyecto Parque Eólico Piedras Blancas-Los Llanos.*, Geo Consult. Guatemala.
12. Coronado, C., Villafañe, G., Ríos, L., (1999). *Resistencia de los Suelos a la Licuación: Comentarios a la Norma NSR-98*. Bogotá. X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Colombia.
13. Cosillo, A. (2012). *Método de Penetración Estándar, SPT*, Presentación magistral, Curso de Mecánica de Suelos I, Maestría en Ingeniería Geotécnica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
14. Delgado, M. (2008). *Ingeniería de Fundaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.
15. Díaz, A. (2006). *Dinámica de suelos*. Editorial Limusa, S,A. CV. México

16. Fuentes, J. (2013). *Impacto Hidrológico asociado al proceso de urbanización en la Subcuenca del río Villalobos, Guatemala*. Tesis de graduación del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrología. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. Costa Rica.
17. Flores, O. (2012). *Seminario Lecciones repetidas del terremoto del 07 de noviembre de 2,012. Amenazas de sitio: un aspecto que las Municipalidades y otras autoridades deben enfrentar formalmente*. AGIES (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica), CESEM (Centro de Estudios de Energía y Minas, USAC). Guatemala.
18. García, H. (2002). *Cuantificación de la calidad del agua del río Villalobos en Época seca y lluviosa en un período de 24 horas 2 veces al mes en un punto previo a la entrada al lago de Amatitlán*. Tesis de graduación para optar al grado y título de Maestro en Recursos Hidráulicos y Calidad del Agua. Facultad de Ingeniería, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala.
19. González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C (2004). *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, S.A. Prentice Hall. España.
20. Hoose, S, N., Wilson, R.C., Rosenfeld, J. W. (1978)., *Liquefaction-caused ground failure during the February 4, 1976, Guatemala Earthquake*, Proc. Int. Symposium on the February 4, 1976, Guatemala, Earthquake and the Reconstruction Process, Vol. 1, 31 pages. Trad. Autorizada, 2012.

21. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). (2012). *Mapa Geológico y Cartográfico Ciudad de Guatemala*. Escala 1:250,000.
22. INSIVUMEH (Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT). (2012). *Sismicidad Registrada del 01/enero/2007 al 30/junio/2012*.
23. INSIVUMEH, IGN., (1978)., *Estudio de Aguas Subterráneas en Guatemala, Cuenca del Valle de Guatemala* (1978).
24. Johansson, J. (2000). *Soil Liquefaction web site*. Department of Civil Engineering. University of Washington. Recuperado el 10 de julio de 2012, de: <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html>.
25. Kramer, S., Stewart, J. (2004). *Geotechnical Aspects of Seismic Hazards*. Bozorgnia, Y., Berbero, V., eds. *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. London. Taylor and Francis Group.
26. Ligorria, J.P. (2011). *Composición de la Tierra-Sismología-Ingeniería Geológica*. Notas de Curso. Presentación magistral, Curso de Geofísica Aplicada, Maestría en Ingeniería Geotécnica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
27. Ochaeta, M. (1974). *Estudio de la Susceptibilidad a la erosión de la Cuenca del Río Villa Lobos, hasta la desembocadura del Lago de Amatitlán*. Tesis de graduación para optar al grado y título de Ingeniero Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

28. OPS (Organización Panamericana de la Salud). 2003. *Reducción del daño sísmico*. Guía para las empresas de agua. Oficina Regional para las Américas de la Organización Mundial de la Salud.
29. *Reconocimiento Hidrogeológico del Valle de Guatemala, Cuencas Hidrográficas de los Ríos Michatoya y Las Vacas*. (1973). División de Investigación de Recursos de Agua, Departamento de Aguas Subterráneas, Instituto Geográfico Nacional, Guatemala, Ciudad.
30. Rodríguez, M. (2005). *Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelo, Aplicación a la ciudad de Barcelona*. Tesis de graduación para optar al grado y título de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
31. Rosales, C. (2001). *Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia*. Tesis de graduación para optar al grado y título de Ingeniería Civil. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Santiago de Cali, Colombia.
32. Santibáñez, D. (2006). *Determinación de potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar*. Tesis de graduación para optar al grado y título de Ingeniería Civil. Universidad Austral de Chile. Facultad de ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería en Construcción. Valdivia, Chile.
33. Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Santander. Universidad Industrial de Santander. Colombia.

34. Seed, H. B., Arango, I., Chan, C.K., Gomez-Masso, A., Ascoli., R.G. (1981), *Earthquake-induced liquefaction near Lake Amatitlán, Guatemala.*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 107, N° 4, pp 501-518.
35. Tarbuck, E., Lutgens, F. (2000). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física.* Sexta Edición. Prentice Hall. Madrid, España.
36. Tucker, B., Mustafa, E., Hwang, C. (1993). *Issues in Urban Earthquake Risk.* pp 35-67. Canadá.
37. Tupak, O. (2010). *Estudio y modelación cuantitativa y descriptiva de la licuefacción en suelos Vulcano-Sedimentarios, sujetos a sollicitaciones dinámicas, Estudio de Caso: Ciudad de Managua,* Editorial Interuniversitario de Doctorado y Maestría Universitaria en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Mineros. Universidad Internacional de Andalucía (UNIA), Santa María La Rábida. Huelva, España.
38. Troncoso, J. (1992). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Antisísmica.* Santiago. Ediciones Universidad Católica de Chile. Chile.
39. USGS (United States Geological Services) 2012-2013. *Earthquake Hazards Program. Central America Earthquake Information.* Recuperado el 28 de julio de 2012 en: <http://earthquake.usgs.gov/regional/world.php?regionID=28>.

40. Velásquez, A., Meyer, H., Peralta, H., (2003) *Zonificación de amenazas por tsunami y licuefacción en el litoral de Nariño, Colombia.*, Universidad del Valle, Observatorio Sismológico del Sur Occidente (OSSO) - Corporación OSSO, Investigación realizada en el marco del Proyecto: Evaluación de la vulnerabilidad física por terremoto y fenómenos asociados en poblaciones del Litoral de Nariño, Convenio de Cooperación 2002, entre el Fondo Nacional de Calamidades, Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres - DGPAD y OSSO, de la Universidad del Valle. Colombia.
41. Verdugo, R. (2001). *Dinámica de suelos, Amplificación Sísmica*. Apuntes de Curso de Sismología. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Chile.
42. Villagrán, M. (1995), *Problems related to seismic Hazard in Central America: magnitude estimation, attenuation of seismic waves, seismic hazard assessment for Guatemala City and site response. Master of Science Thesis. Institute of Solid Earth Physics, Universidad Bergen, Norway.*
43. Wunderman. R., Rose, W. (1984), *Journal of Geophysical research, Amatitlán, an actively resurgng cauldron 10 km south of Guatemala City*. Dept. of Geology. Vol. 89, Michigan Technological University. pp 8525-8539.
44. Zeballos, M., (2002). *Desarrollo de Procesos de Licuación*. Valparaíso. 2da. Jornada del Ciclo de Conferencias del Grupo de Geotecnia. Escuela de Ingeniería en Construcción. Universidad Católica de Valparaíso, Sociedad Chilena de Geotecnia. Chile.

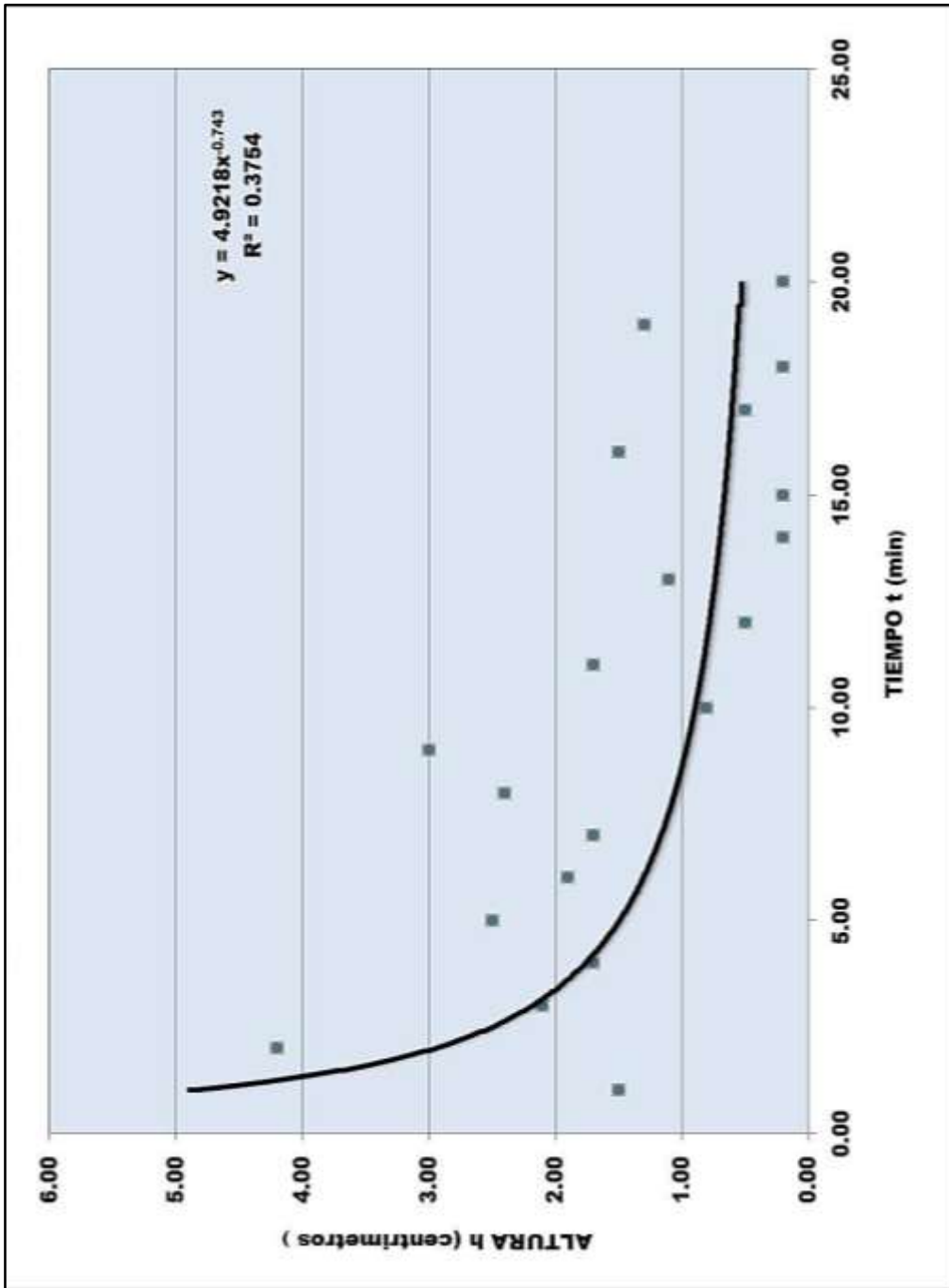
ANEXO 1

**Tabla IX. Datos de velocidad de infiltración en la zona de estudio:
delta del río Villalobos, comunidad La Playa y El Sauzal**

Delta del Rio VillaLobos Comunidad La Playa					Delta del Rio VillaLobos Comunidad El Sauzal				
h (cm)	t (min)	dt (min)	dh(cm)	dh/dt (cm/min)	h (cm)	t (min)	dt (min)	dh(cm)	dh/dt (cm/min)
50.00	0.00				45.00	0.00			
48.50	1.00	1.00	1.50	1.50	42.00	1.00	1.00	3.00	3.00
44.30	2.00	1.00	4.20	4.20	40.00	2.00	1.00	2.00	2.00
42.20	3.00	1.00	2.10	2.10	36.00	3.00	1.00	4.00	4.00
40.50	4.00	1.00	1.70	1.70	32.60	4.00	1.00	3.40	3.40
38.00	5.00	1.00	2.50	2.50	30.40	5.00	1.00	2.20	2.20
36.10	6.00	1.00	1.90	1.90	29.20	6.00	1.00	1.20	1.20
34.40	7.00	1.00	1.70	1.70	28.10	7.00	1.00	1.10	1.10
32.00	8.00	1.00	2.40	2.40	26.00	8.00	1.00	2.10	2.10
29.00	9.00	1.00	3.00	3.00	24.40	9.00	1.00	1.60	1.60
28.20	10.00	1.00	0.80	0.80	24.20	10.00	1.00	0.20	0.20
26.50	11.00	1.00	1.70	1.70	22.40	11.00	1.00	1.80	1.80
26.00	12.00	1.00	0.50	0.50	19.50	12.00	1.00	2.90	2.90
24.90	13.00	1.00	1.10	1.10	18.90	13.00	1.00	0.60	0.60
24.70	14.00	1.00	0.20	0.20	18.40	14.00	1.00	0.50	0.50
24.50	15.00	1.00	0.20	0.20	16.90	15.00	1.00	1.50	1.50
23.00	16.00	1.00	1.50	1.50	16.30	16.00	1.00	0.60	0.60
22.50	17.00	1.00	0.50	0.50	15.80	17.00	1.00	0.50	0.50
22.30	18.00	1.00	0.20	0.20	14.50	18.00	1.00	1.30	1.30
21.00	19.00	1.00	1.30	1.30	13.30	19.00	1.00	1.20	1.20
20.80	20.00	1.00	0.20	0.20	13.00	20.00	1.00	0.30	0.30
Y = I =	Infiltración		$ax^b = a^*(-D^b)^{-b}$		Y = I =	Infiltración		$ax^b = a^*(-D^b)^{-b}$	
T =	Tasa de Infiltración		dt/dh = t lectura/altura última		T =	Tasa de Infiltración		dt/dh = t lectura/altura última	
a =			4.92		a =			4.48	
D =			25.00		D =			25.00	
b =			-0.74		b =			-0.62	
l =			0.56		l =			0.83	
T =			4.81%		T =			7.69%	

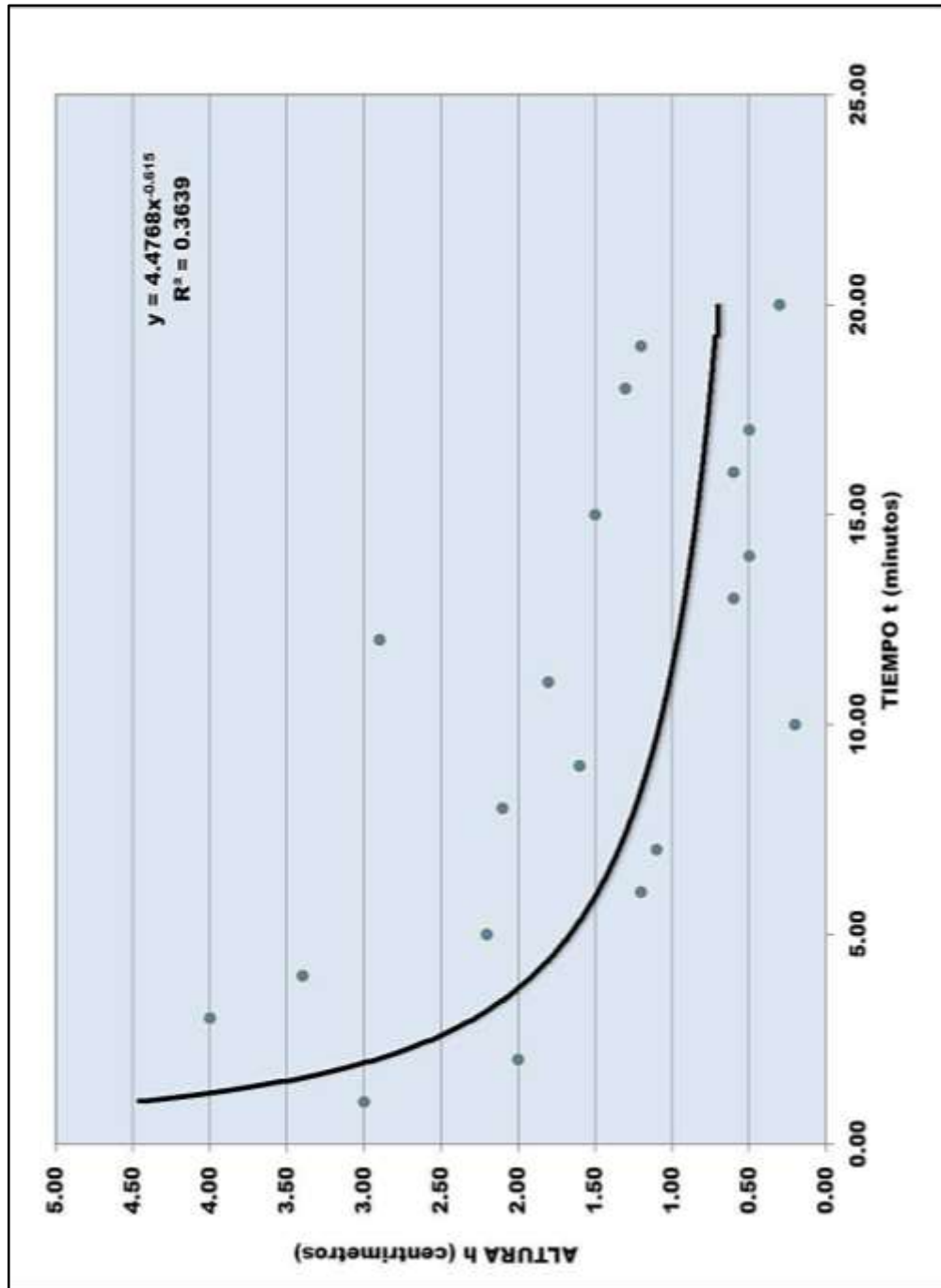
Fuente: propia, (mayo, 2013).

Figura 27. **Curva de velocidad de infiltración en la zona de estudio:
delta del río Villalobos, comunidad La Playa**



Fuente: propia, (mayo, 2013).

Figura 28. **Curva de velocidad de infiltración en la zona de estudio:
delta del río Villalobos, comunidad El Sauzal**



Fuente: propia, (mayo, 2013).

Figura 29. **Pruebas de infiltración-Balance Hídrico por el Método Lewis-Kostiakov en el área de estudio, delta del río Villalobos**



Fuente: propia, (mayo 2013).

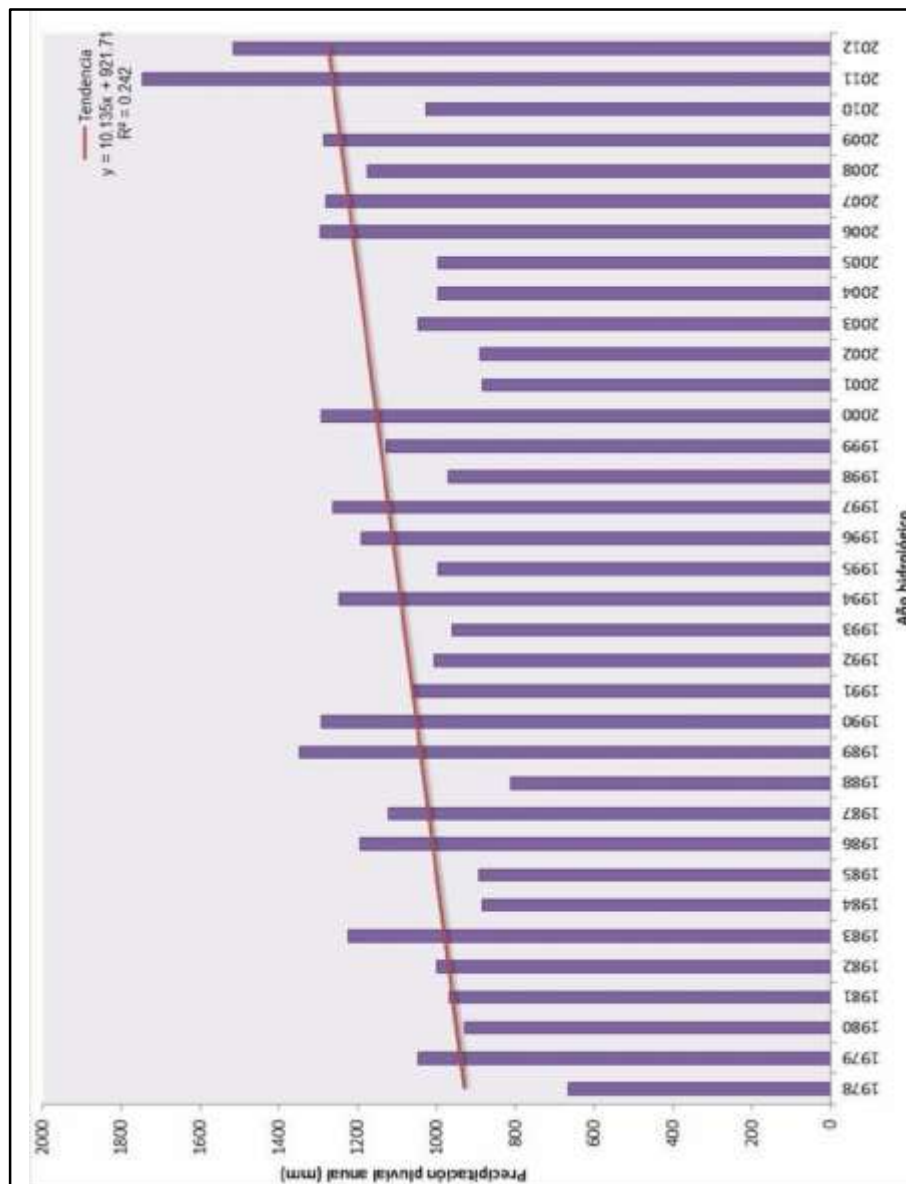
Tabla X. **Datos acumulados anuales de precipitación en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal 1977-2012**

Año		Precipitación Pluvial (mm)	Año		Precipitación Pluvial (mm)
De:	A:		De:	A:	
1977	1978	667	1995	1996	1192
1978	1979	1045	1996	1997	1265
1979	1980	928	1997	1998	972
1980	1981	967	1998	1999	1128
1981	1982	998	1999	2000	1293
1982	1983	1225	2000	2001	886
1983	1984	885	2001	2002	891
1984	1985	893	2002	2003	1046
1985	1986	1195	2003	2004	996
1986	1987	1122	2004	2005	995
1987	1988	813	2005	2006	1295
1988	1989	1347	2006	2007	1282
1989	1990	1293	2007	2008	1174
1990	1991	1063	2008	2009	1287
1991	1992	1007	2009	2010	1027
1992	1993	960	2010	2011	1746
1993	1994	1249	2011	2012	1516
1994	1995	997			

Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, (INSIVUMEH, Documento electrónico, Sección de Climatología e Hidrogeología) y Fuentes, J. (2013).

Adaptado por la autora (mayo, 2013).

Figura 30. **Datos acumulados anuales de precipitación en Prueba de Spearman RankOrder Correlation en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y el Sauzal 1977-2012**



Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, (INSIVUMEH, Documento electrónico, Sección de Hidrología) y Fuentes. J, 2013. Adaptado por la autora (mayo, 2013).

Tabla XI. **Análisis granulométrico en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad El Sauzal. E-1**



MULTICONSTRUCCIONES. S.A.

Diseño, Planificación, Ejecución y Supervisión
 Telefax: 4754-8503 4537-9387

INFORME DE TRABAJO-102.05.2013					
TIPO DE ENSAYO:	ENSAYO GRANULOMÉTRICO			Fecha:	08 de mayo del 2013
Proyecto:	LICENCIACIÓN DELTA VILLALOBOS			Tipo de Medición:	Pozo artesanal a cielo abierto
Estación o Muestra:	E-1 profundidad 1.50 metros			Peso de Tara:	152 g
# TAMEZ	ABERTURA (MM)	PESO (BRUTO) (g)	PESO (NETO) (g)	PESO NETO ACUMULADO (g)	% PASA
1 1/2"					
1"					
3/4"					
4	4.760				100.000
10	2.000	193.240	41.240	3.155	94.845
40	0.425	306.490	154.490	19.311	80.689
100	0.150	523.380	371.380	46.423	53.578
200	0.074	938.270	786.270	98.284	1.716

Peso Neto bruto	800 g
D10	0.08
D30	0.14
D60	0.2
Descripción del suelo:	Arena pobremente gradada color gris variado
Clasificación SUCS:	SP
Observaciones:	Composición mecánica aceptable-buena, óptimo drenaje

Ing. Juan Carlos Pachón
 Gerente General
 CARLOS JOAQUÍN
 INGENIERO CIVIL
 C.C. 1007

Lote 7 Mz. F. Sector I, Residenciales Ciudad Saturno zona 9 Mixco. Multiconstrucciones@yahoo.com

Fuente: propia y Municipalidad de Villa Canales. (mayo, 2013).

Tabla XII. **Análisis granulométrico en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad El Sauzal. E-3**



MULTICONSTRUCCIONES. S.A.

Diseño, Planificación, Ejecución y Supervisión
 Telefax: 4754-8505 4537-9387

INFORME DE TRABAJO-102.05.2013					
TIPO DE ENSAYO:	ENSAYO GRANULOMÉTRICO			Fecha:	08 de mayo del 2013
Proyecto:	LICUACIÓN DELTA VILLALOBOS			Tipo de Medición:	Pozo artesanal a cielo abierto
Estación o Muestra:	E-3 profundidad 1.25 metros			Peso de Taza:	211 g
# TAMIZ	ABERTURA (MM)	PESO (BRUTO) (g)	PESO (NETO) (g)	PESO NETO ACUMULADO (g)	% PASA
1 1/2"					
1"					
3/4"					
4	4.760				100.000
10	2.000	253.830	42.830	5.354	94.646
40	0.425	506.130	295.130	36.891	63.109
100	0.150	779.910	568.910	71.114	28.886
200	0.074	998.390	787.390	98.424	1.576

Peso Neto bruto	800 g
D10	0.097
D30	0.16
D60	0.26
Descripción del suelo:	Arena mal graduada con poco componente limoso de color gris oscuro
Clasificación SUCS:	SM
Observaciones:	Composición mecánica aceptable, capacidad de drenaje malo, impermeable

Ing. Juan Carlos Joaquín Baup
 Gerente General
 CARLOS JOAQUIN
 INGENIERO CIVIL
 C.C.L. 8207
 MULTICONSTRUCCIONES S.A.
 INGENIERIA DE CONSTRUCCIONES Y MAQUINARIA

Lote 7 Mz. F. Sector I, Residenciales Ciudad Saturno zona 9 Mixco. Multiconstrucciones@yahoo.com

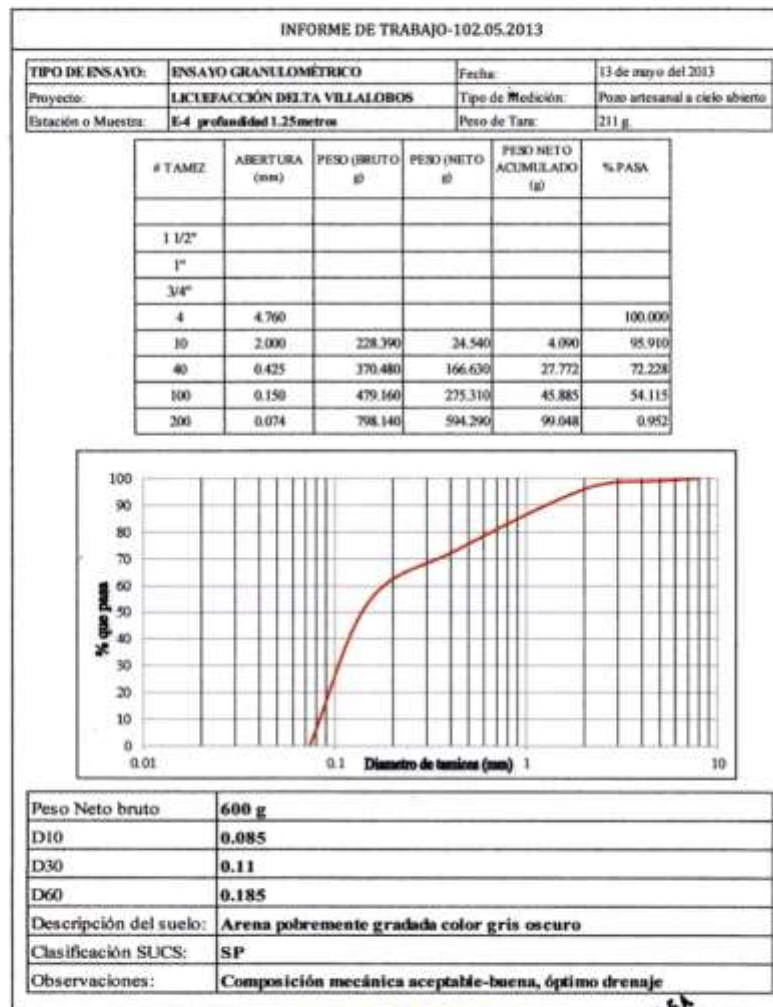
Fuente: propia y Municipalidad de Villa Canales. (mayo, 2013).

Tabla XIII. **Análisis granulométrico en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa. E-4.**



MULTICONSTRUCCIONES. S.A.

Diseño, Planificación, Ejecución y Supervisión
Telefax: 4754-8505 - 4537-9387



Ing. Juan Carlos Joaquín Benítez
Gerente General
C.A.E. 11111
INGENIERO CIVIL
C.C.L. 1027



Lote 7 Mz. F. Sector I, Residenciales Ciudad Saturno zona 9 Mixco. Multiconstrucciones@yahoo.com

Fuente: propia y Municipalidad de Villa Canales. (mayo, 2013).

Tabla XIV. **Análisis granulométrico en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa. E-6**



MULTICONSTRUCCIONES, S.A.

Diseño, Planificación, Ejecución y Supervisión
Teléfono: 4754-8505 4537-9387

INFORME DE TRABAJO-102.05.2013					
TIPO DE ENSAYO:	ENSAYO GRANULOMÉTRICO	Fecha:	13 de mayo del 2013		
Proyecto:	RECONSTRUCCIÓN DELTA VILLALOBOS	Tipo de Medición:	Pasa atmosférica a cielo abierto		
Estación o Muestra:	E-6 profundidad 1.25 metros	Peso de Taza:	152 g.		
# TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO (BRUTO) g	PESO (NETO) g	PESO NETO ACUMULADO (g)	% PASA
1 1/2"					
1"					
3/4"					
4	4.760				100.000
10	2.000	217.390	65.390	10.898	89.102
40	0.425	312.480	160.480	26.747	73.253
100	0.150	511.160	359.160	59.860	40.140
200	0.075	742.440	590.440	98.407	1.593

Peso Neto bruto	600 g
D10	0.088
D30	0.13
D60	0.25
Descripción del suelo:	Arena pobremente graduada color gris claro
Clasificación SUCS:	SP
Observaciones:	Composición mecánica aceptable-buena, óptimo drenaje

Ing. Juan Carlos Joaquin Bautista
Gerente General

CARLOS JOAQUIN
INGENIERO CIVIL
CCL. No.:



Lote 7 Mz. F. Sector I, Residenciales Ciudad Saturno zona 9 Mxco. Multiconstrucciones@yahoo.com

Fuente: propia y Municipalidad de Villa Canales. (mayo, 2013).

Tabla XV. **Resumen de análisis de contenidos de humedad en la zona de estudio: delta del río Villalobos, comunidad La Playa y El Sauzal**



MULTICONSTRUCCIONES. S.A.

Diseño, Planificación, Ejecución y Supervisión
 Telefaxis: 4754-8505 4537-9387

TIPO DE ENSAYO:	CONTENIDO DE HUMEDAD	Fecha:	Ver descripción
Proyecto:	LICUEFACCIÓN DELTA VILLALOBOS	Tipo de Medición:	Secado al horno
Estación o Muestra:	E-1; E-3; E-4 E-6	Peso de Tara (g):	Variable

	Muestra E-1	Muestra E-3	Muestra E-4	Muestra E-6
	08 de mayo de 2013		13 de mayo de 2013	
Peso de tara (g):	18.2	18.2	13.1	13.1
Peso tara suelo húmedo	78.20	78.20	73.10	73.10
Peso tara suelo seco	66.73	68.26	62.62	62.85
peso suelo seco	48.53	50.06	49.52	49.75
Contenido de Humedad	23.63	19.86	21.16	20.60
Promedio de % Humedad	21.31 %			

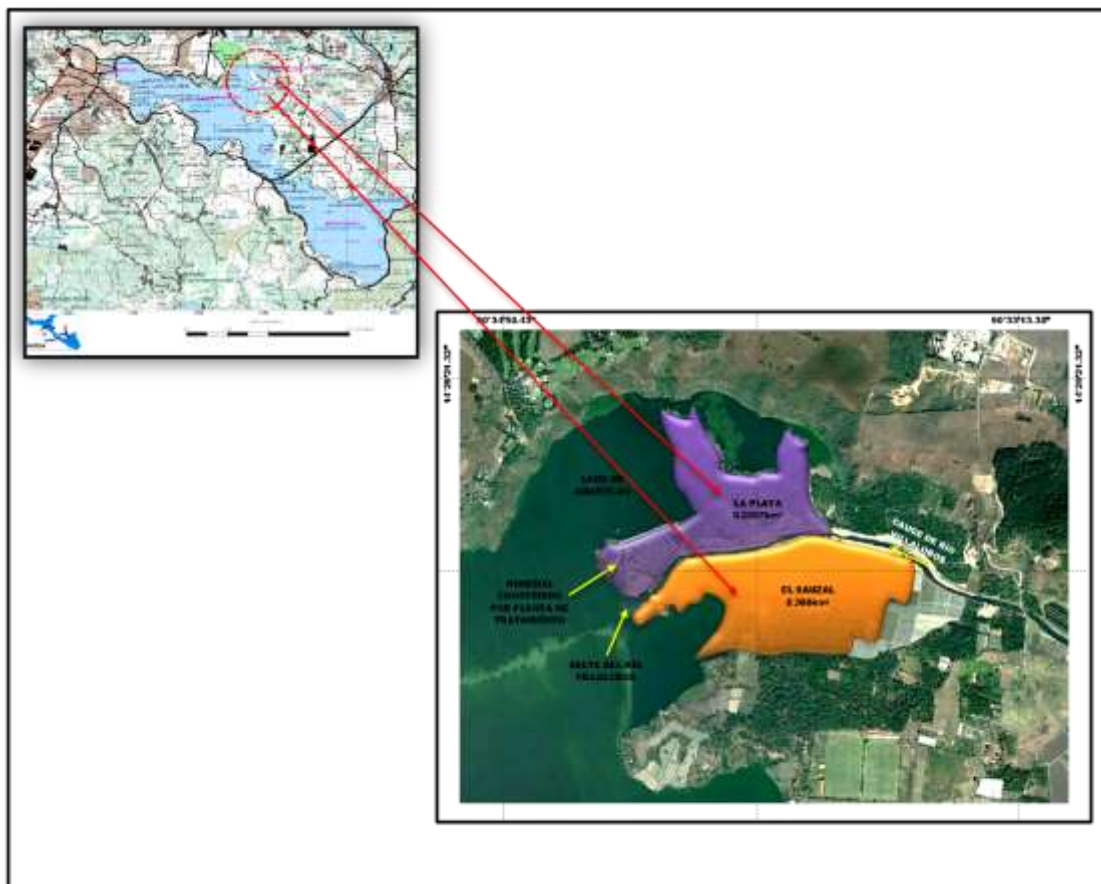

 Ing. Juan Carlos Joaquín Bautista
 Gerente General
 CARLOS JOAQUIN
 INGENIERO CIVIL
 CCL. 8007


Lote 7 Mz. F. Sector I, Residenciales Ciudad Saturno zona 9 Mixco. Multiconstrucciones@yahoo.com

Fuente: propia y Municipalidad de Villa Canales. (mayo, 2013).

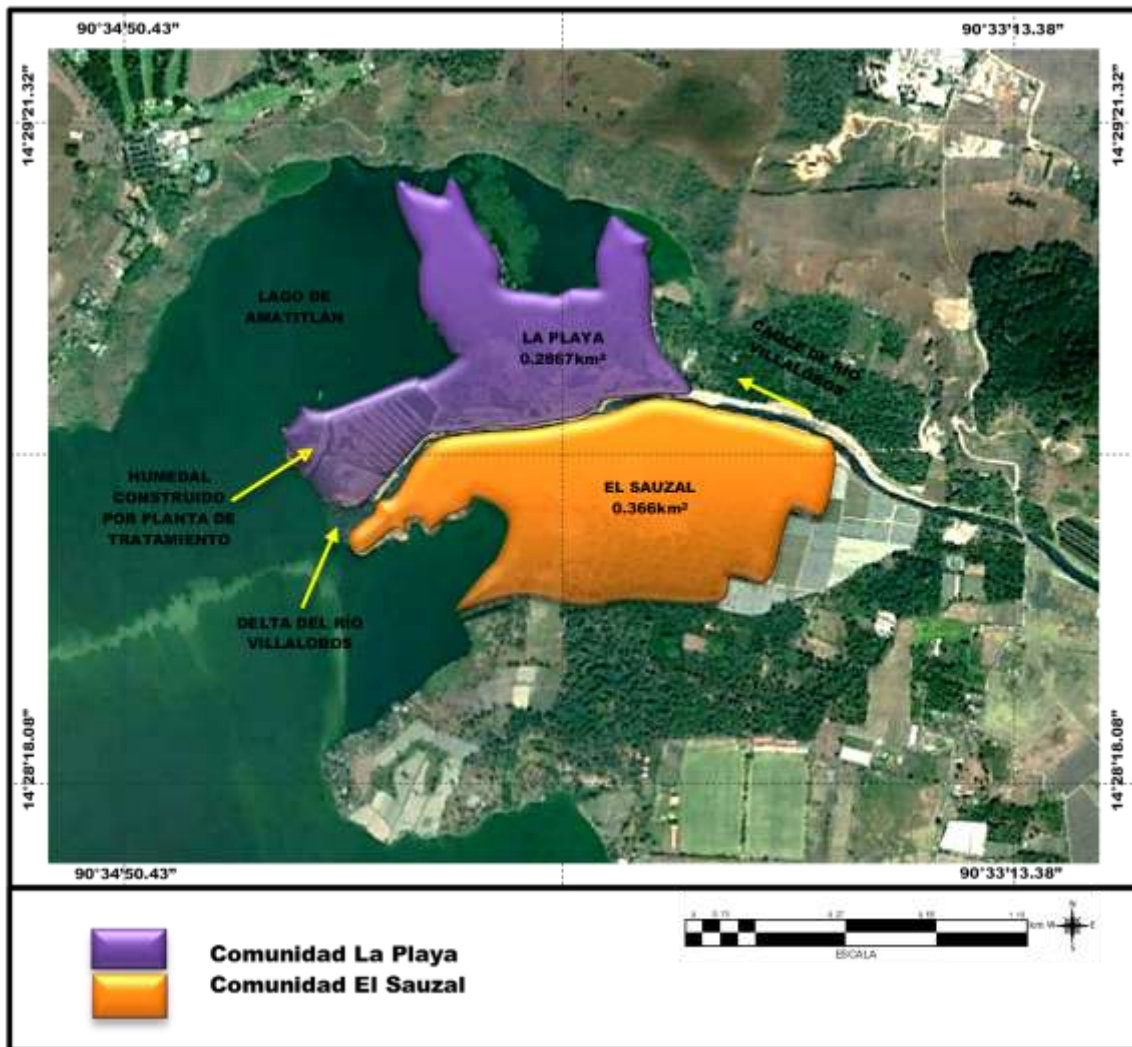
ANEXO 2

Figura 3. **Mapa de localización del área de estudio: delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal**



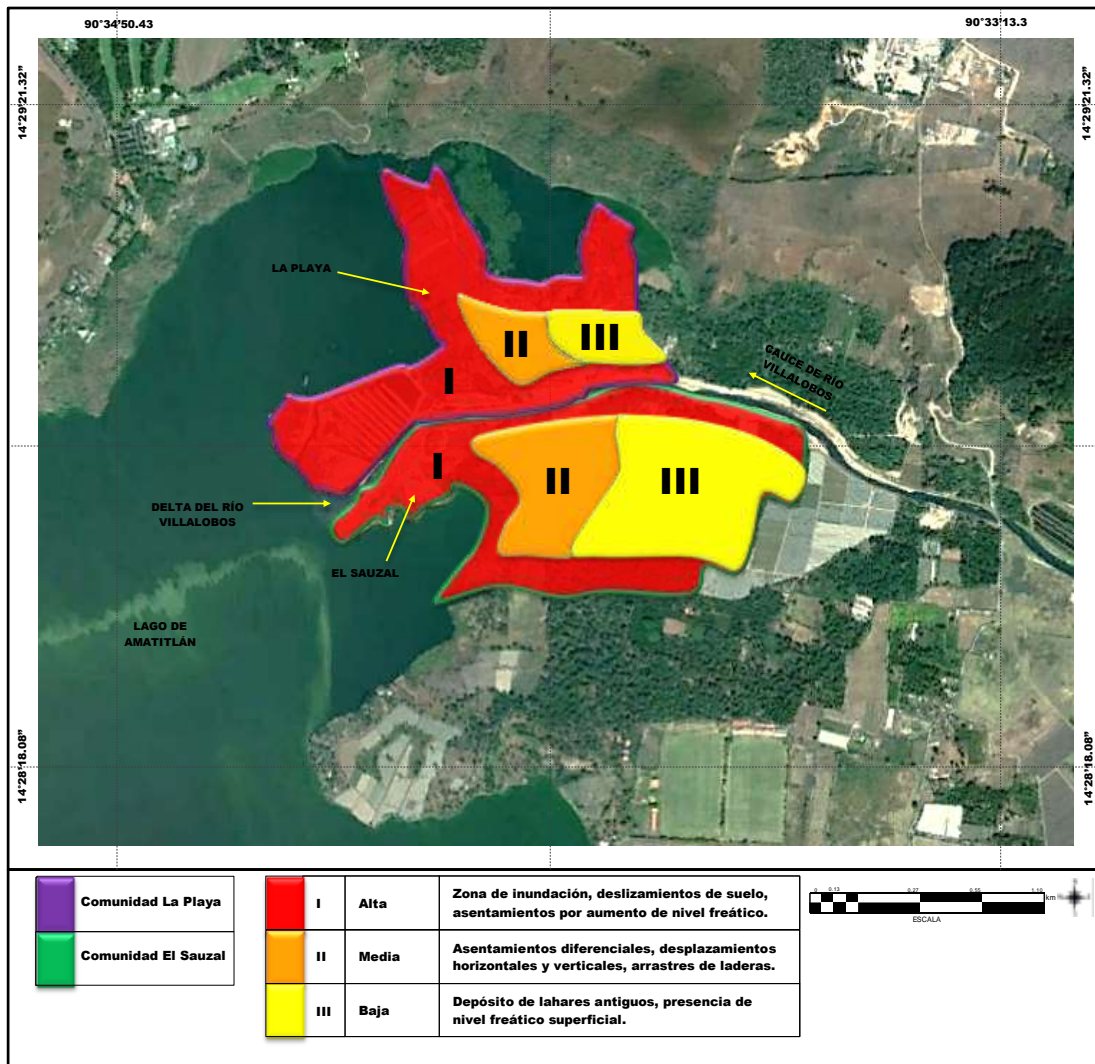
Fuente: Ortofotografía, Instituto Geográfico Nacional, IGN. Adaptado por la autora en formato gvSIG (julio, 2012).

Figura 4. **Mapa de ubicación del área de estudio: delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal**



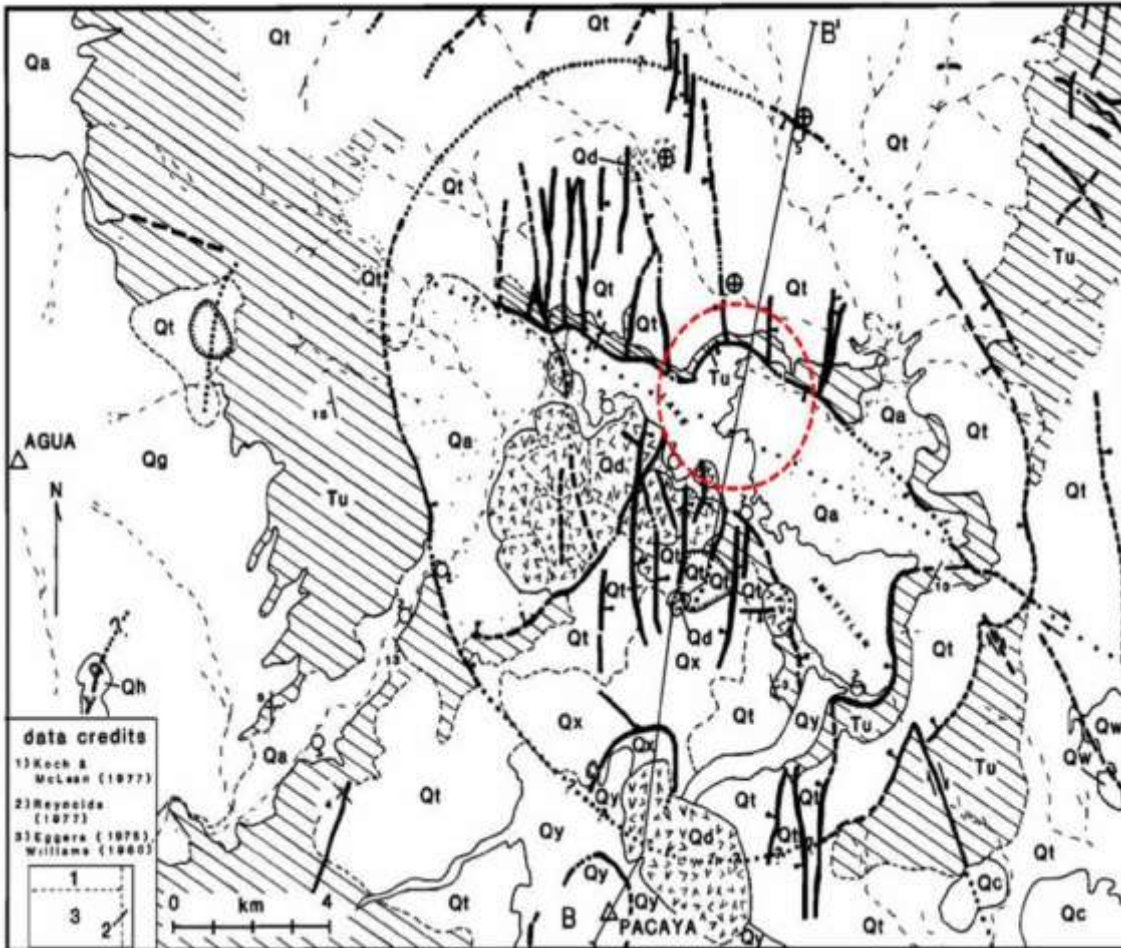
Fuente: Ortofoto, Instituto Geográfico Nacional, IGN. Adaptado por la autora en formato gvSIG (julio, 2012).

Figura 26. **Mapa de susceptibilidad al fenómeno de licuefacción en el delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal**



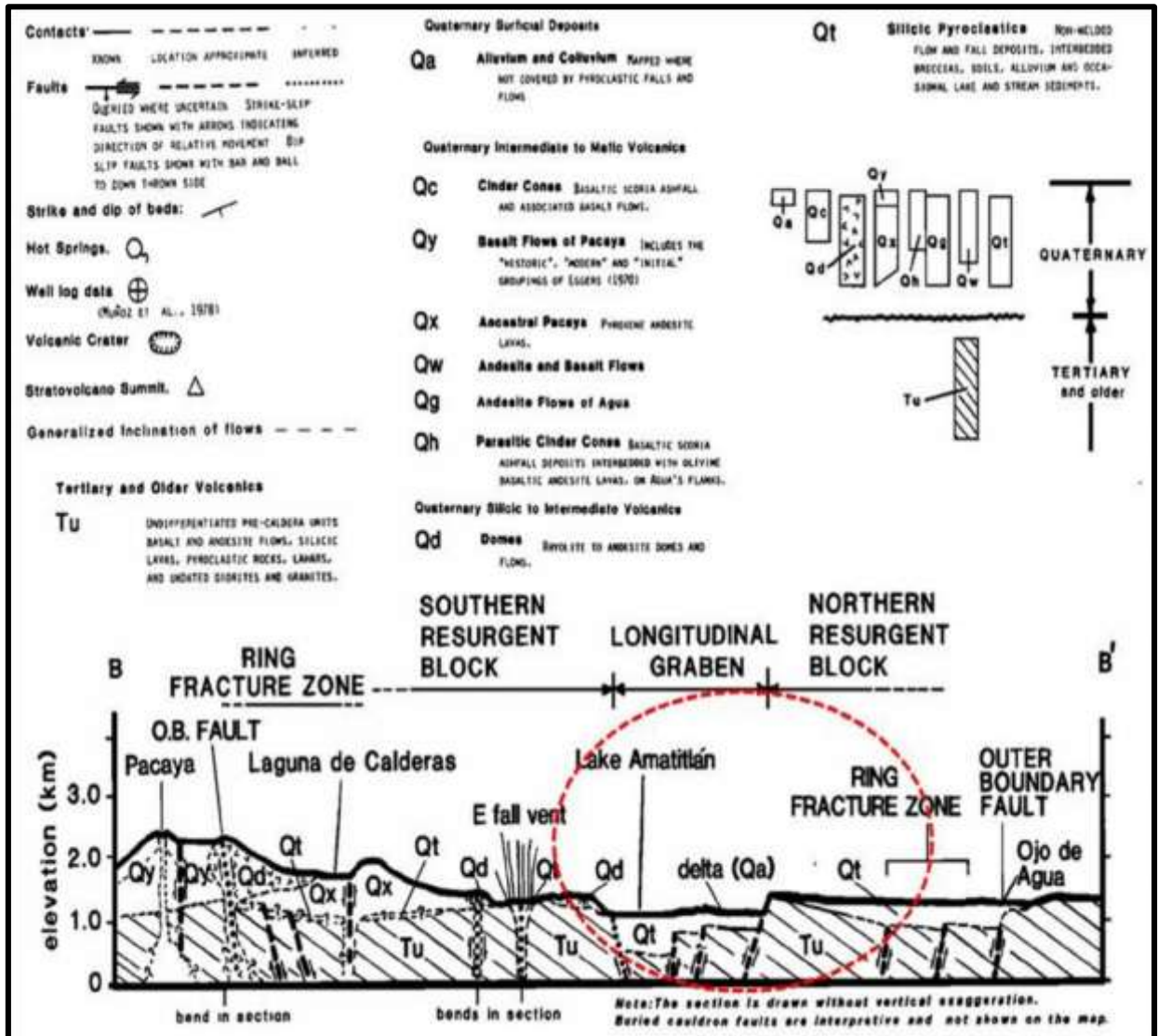
Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH, elaborado y adaptado por la autora en formato gvSIG. (mayo, 2013).

Figura 31. **Mapa geológico del área de estudio**



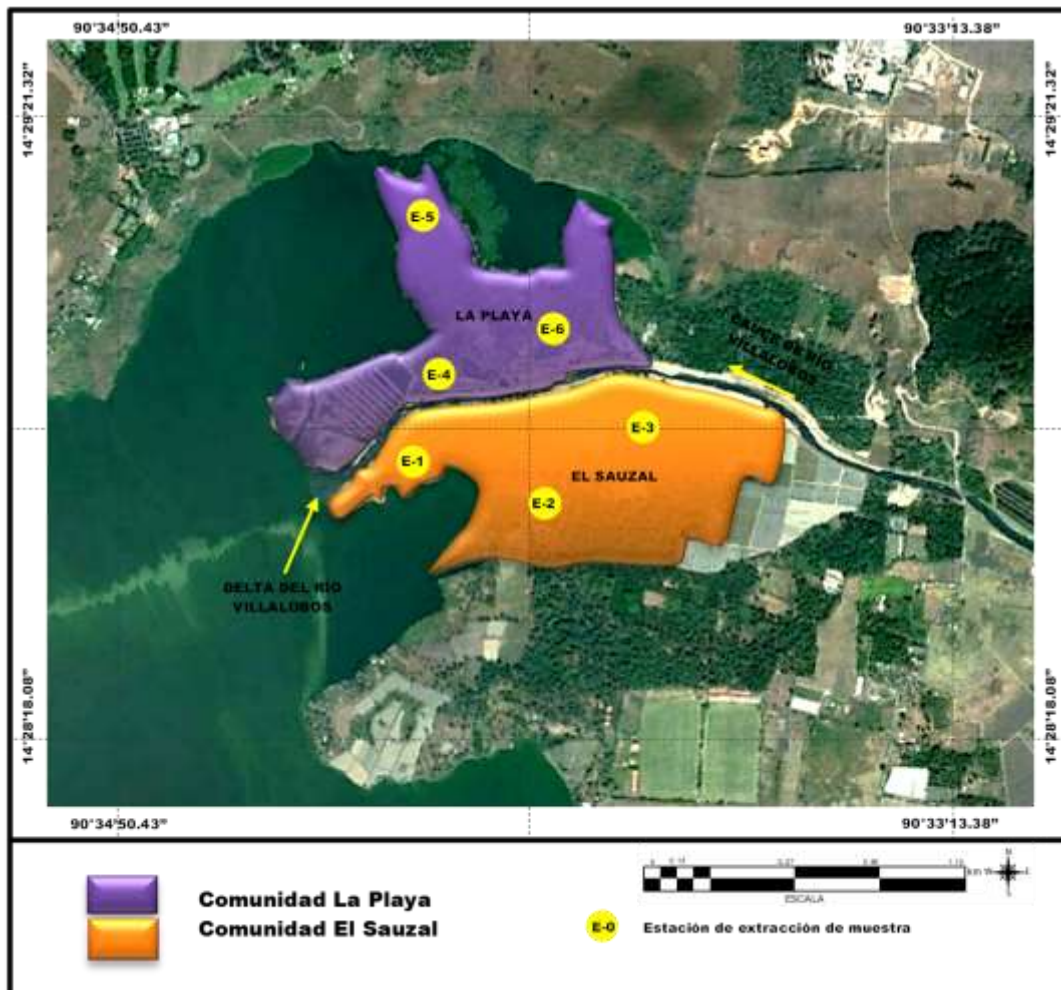
Fuente: Journal of Geophysical research, vol. 89, Michigan Technological University, Wunderman. R., Rose, W. 1984. Adaptado por la autora, en formato gvSIG (julio, 2012).

Figura 32. **Mapa descripción geológica del área de estudio**



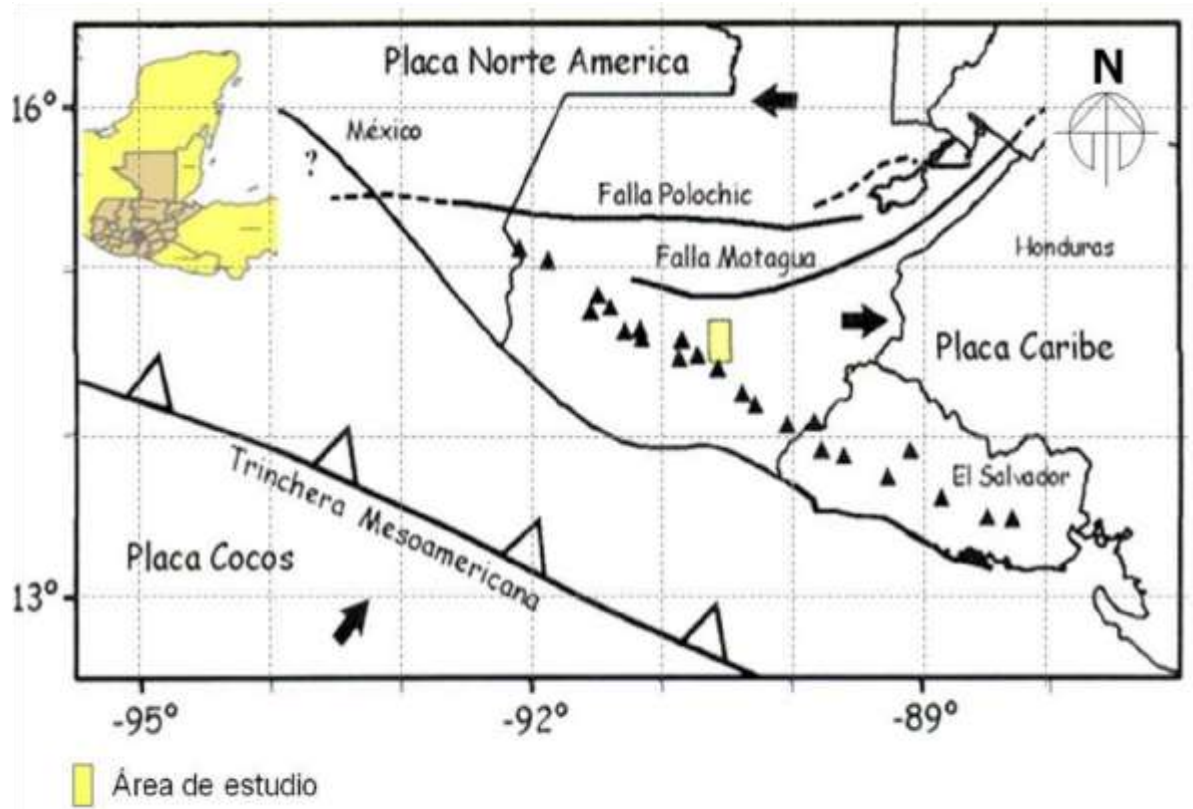
Fuente: Journal of Geophysical research, vol. 89, Michigan Technological University, Wunderman. R., Rose, W. 1984. Adaptado por la autora, en formato gvSIG (julio, 2012).

Figura 33. **Mapa de ubicación puntos para identificación de estratigrafía del suelo del área de estudio: delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal**



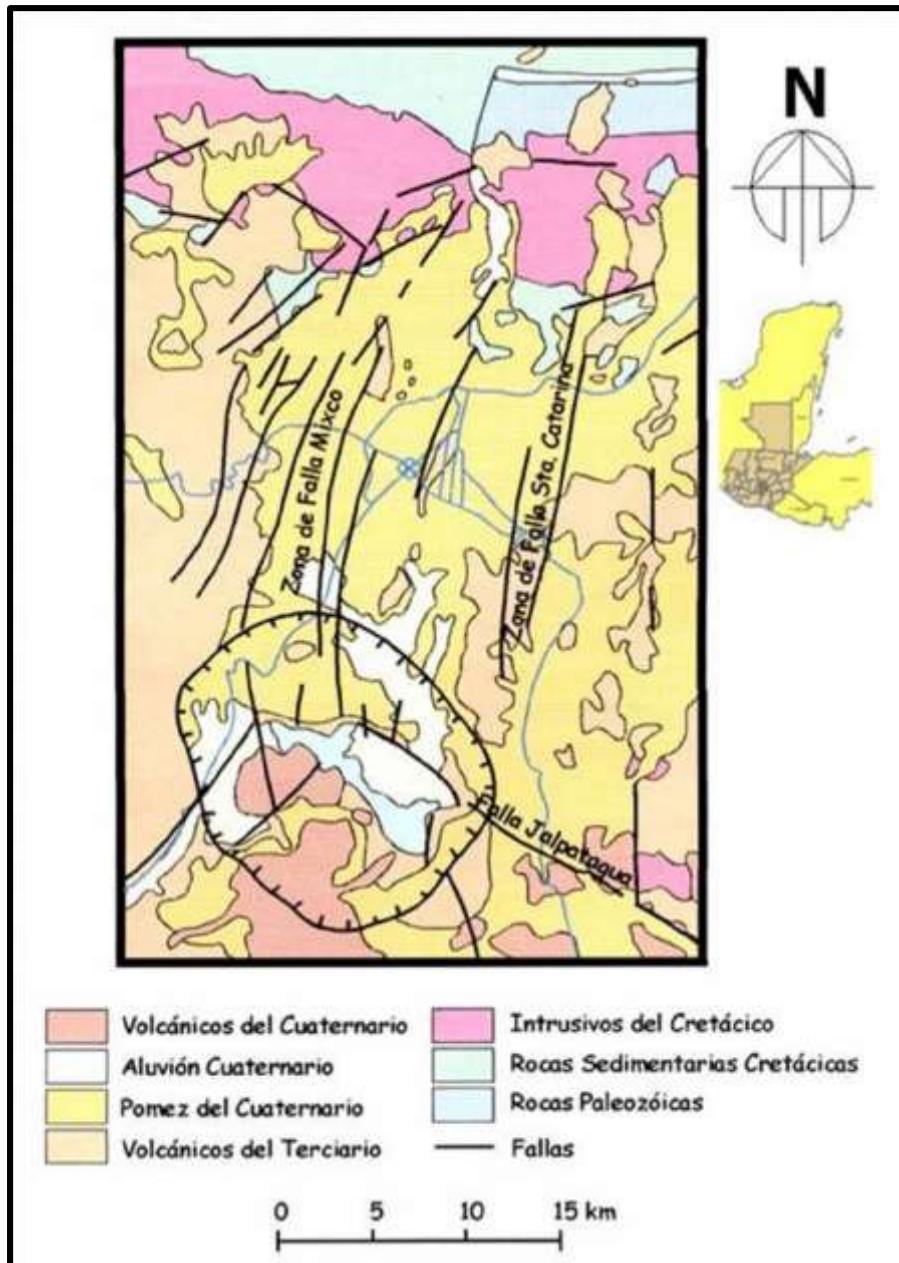
Fuente: Ortofoto, Instituto Geográfico Nacional (IGN). Adaptado por la autora, en formato gvSIG (julio, 2012).

Figura 34. **Mapa de localización de placas tectónicas en Guatemala**



Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH.
Adaptado por la autora en formato gvSIG. (julio, 2012).

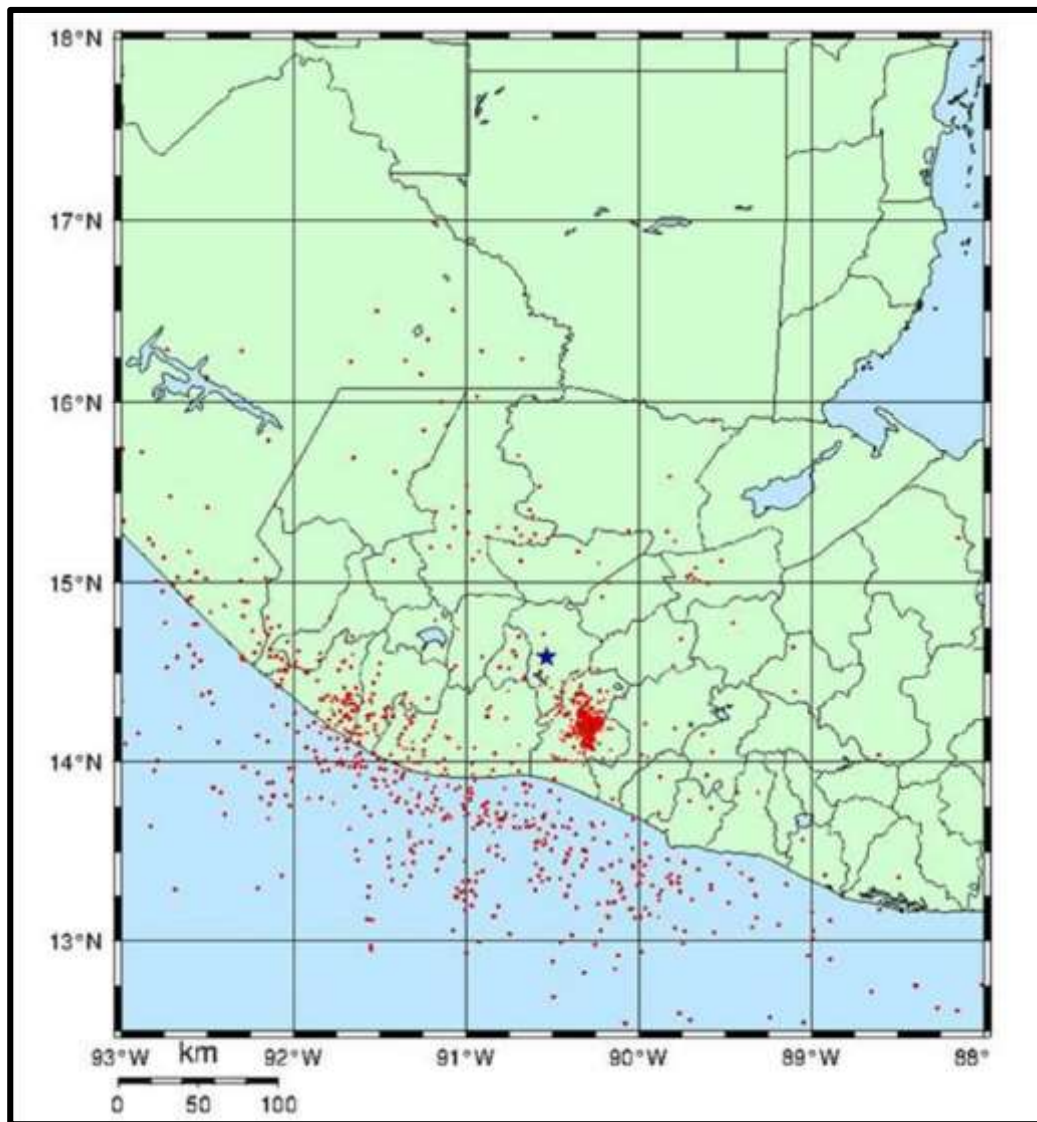
Figura 35. **Mapa de localización de fallas geológicas en el área de estudio**



Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH.

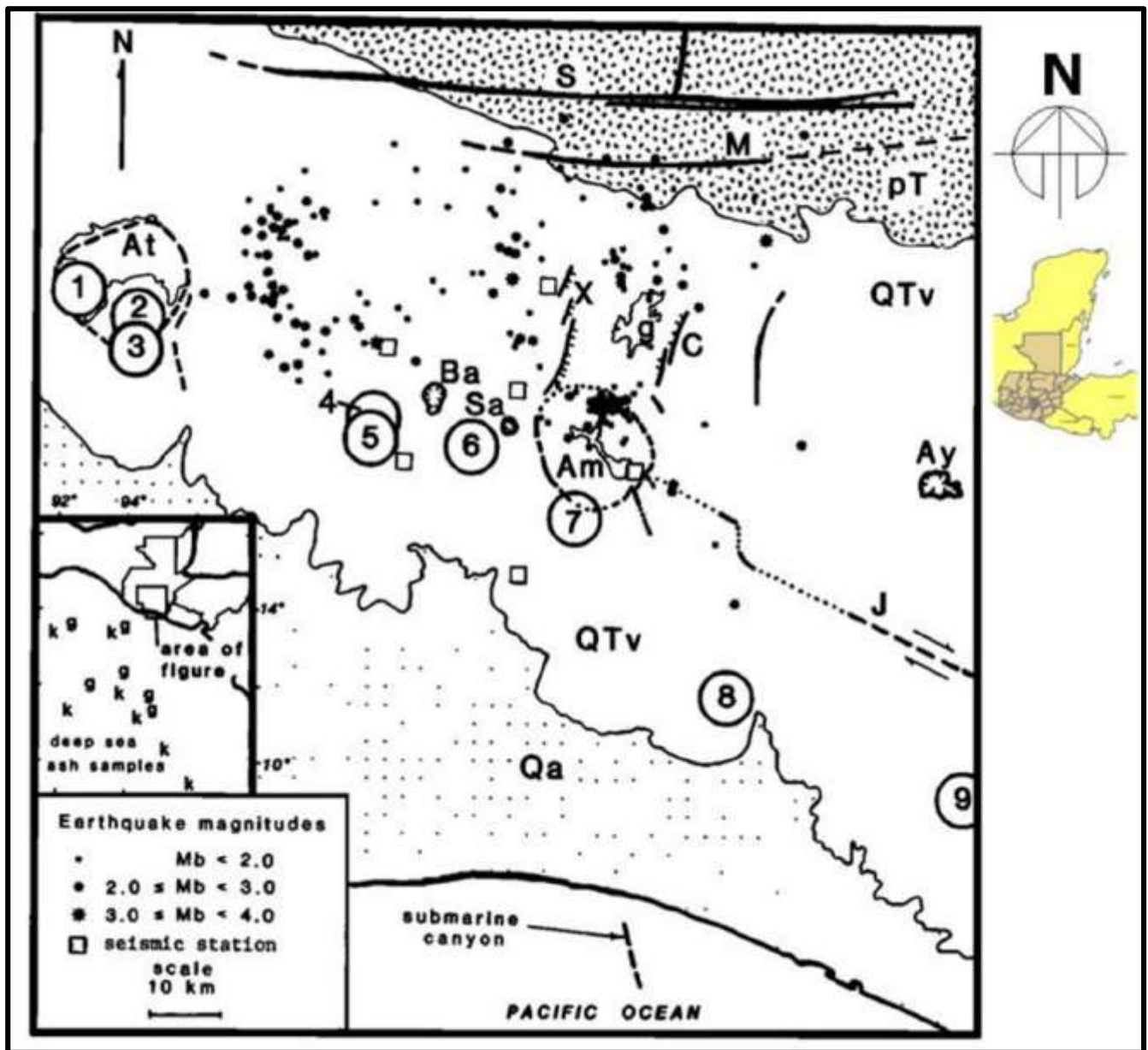
Adaptado por la autora en formato gvSIG. (julio, 2012).

Figura 36. **Mapa de sismicidad registrada en la República de Guatemala, a junio del año 2012**



Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH.
Adaptado por la autora en formato gvSIG. (agosto, 2012).

Figura 37. **Mapa de influencia volcánica y caracterización sísmica del área de estudio**

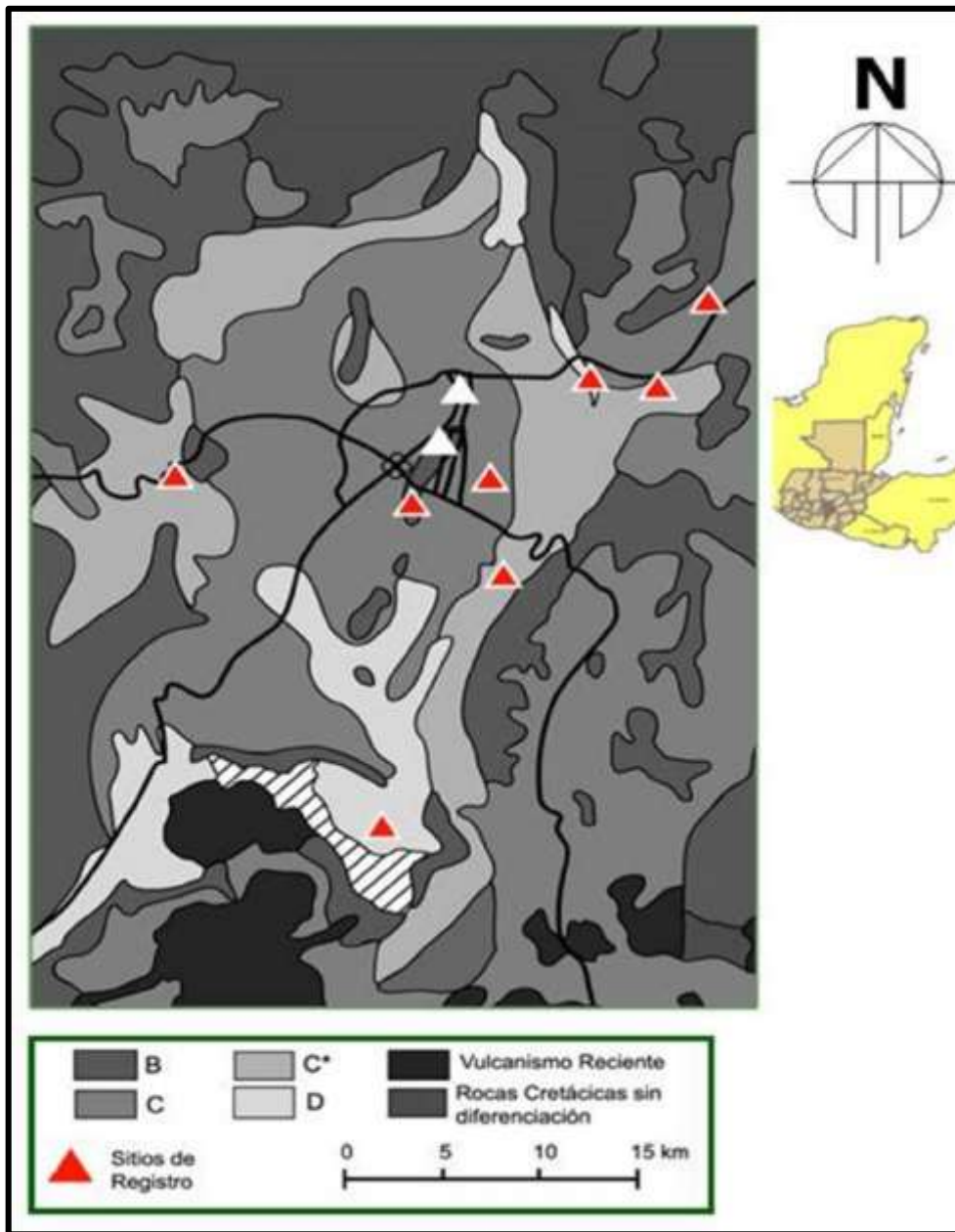


Fuente: Journal of Geophysical research, vol. 89, Michigan Technological University, Wunderman. R., Rose, W. 1984. Modificación por la autora, en formato gvSIG (julio, 2012).

Influencia volcánica regional, estructura y sismicidad del área de estudio. Las letras en el Océano Pacífico denotan aguas profundas, donde hay existencia de cenizas volcánicas, posiblemente correlativos con las unidades predominantes. Muestra la geología simplificada de Guatemala con aluvión Cuaternario (Qa), Cuaternario y Terciario volcánicas (QTV) y rocas pre Terciario (PT). Los conos volcánicos se compone de estratovolcanes: (1) San Pedro, (2) Atitlán, (3) Toliman, (4) Acatenango, (5) Fuego, (6) Agua, (7) Pacaya, (8) Tecuamburro y (9) Moyuta poco a el norte de estos estratovolcanes son los centros silícicos: At (Atitlán), Ba (Barahona), Sa (Sabana Grande), Am (Amatitlán) y Ay (Ayarza), indicando también las fallas más importantes para la activación de las unidades, tales como S (San Agustín), M (Motagua) y J (Jalpatagua), X (Mixco), y C (Santa Catarina Pinula). Denota epicentros de eventos sísmicos que se han producido alrededor del área de estudio (delta del río de Villalobos).

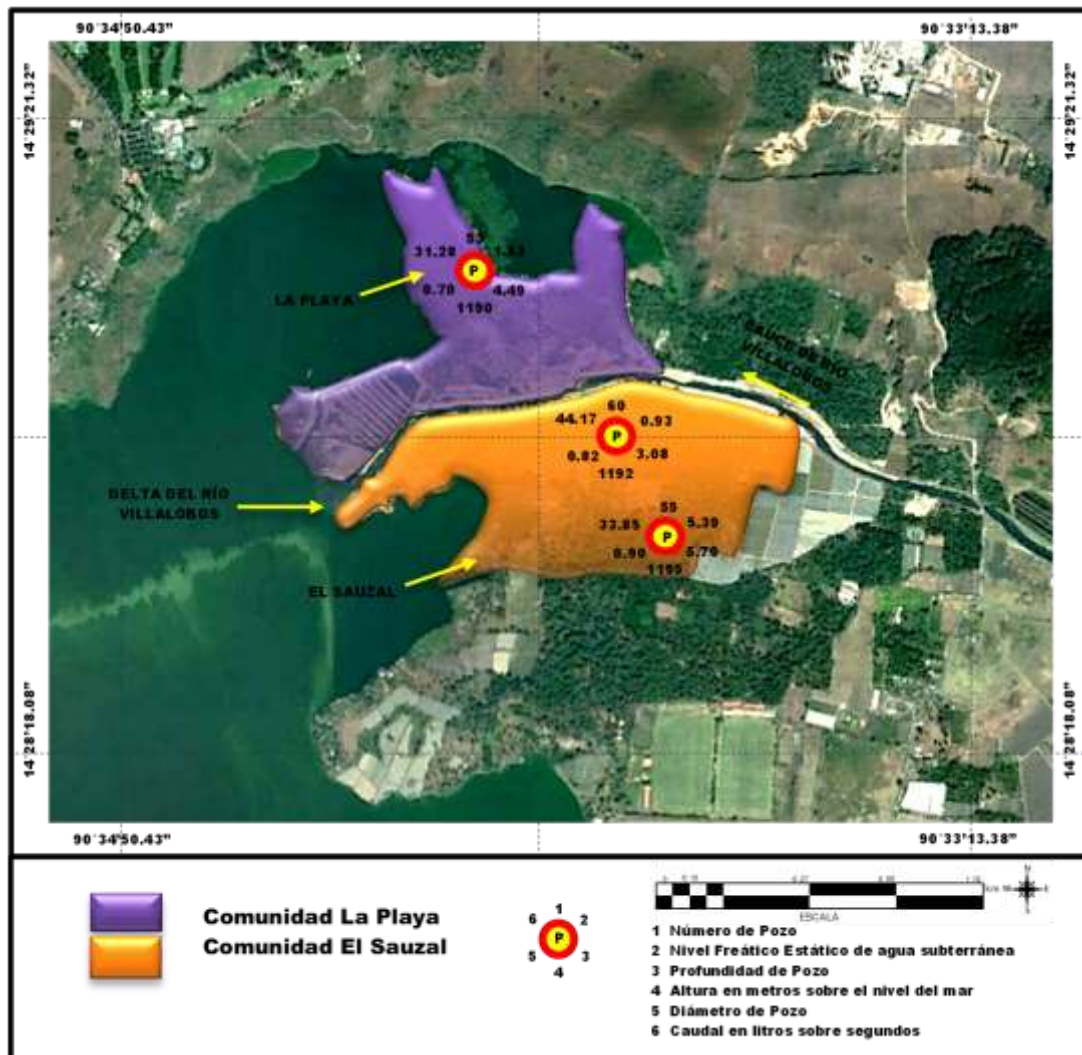
Fuente: Richard L. Wunderman and William I. Rose 1984. Adaptado por la autora (agosto 2012).

Figura 38. **Mapa de unidades geotécnicas sobre la ciudad de Guatemala**



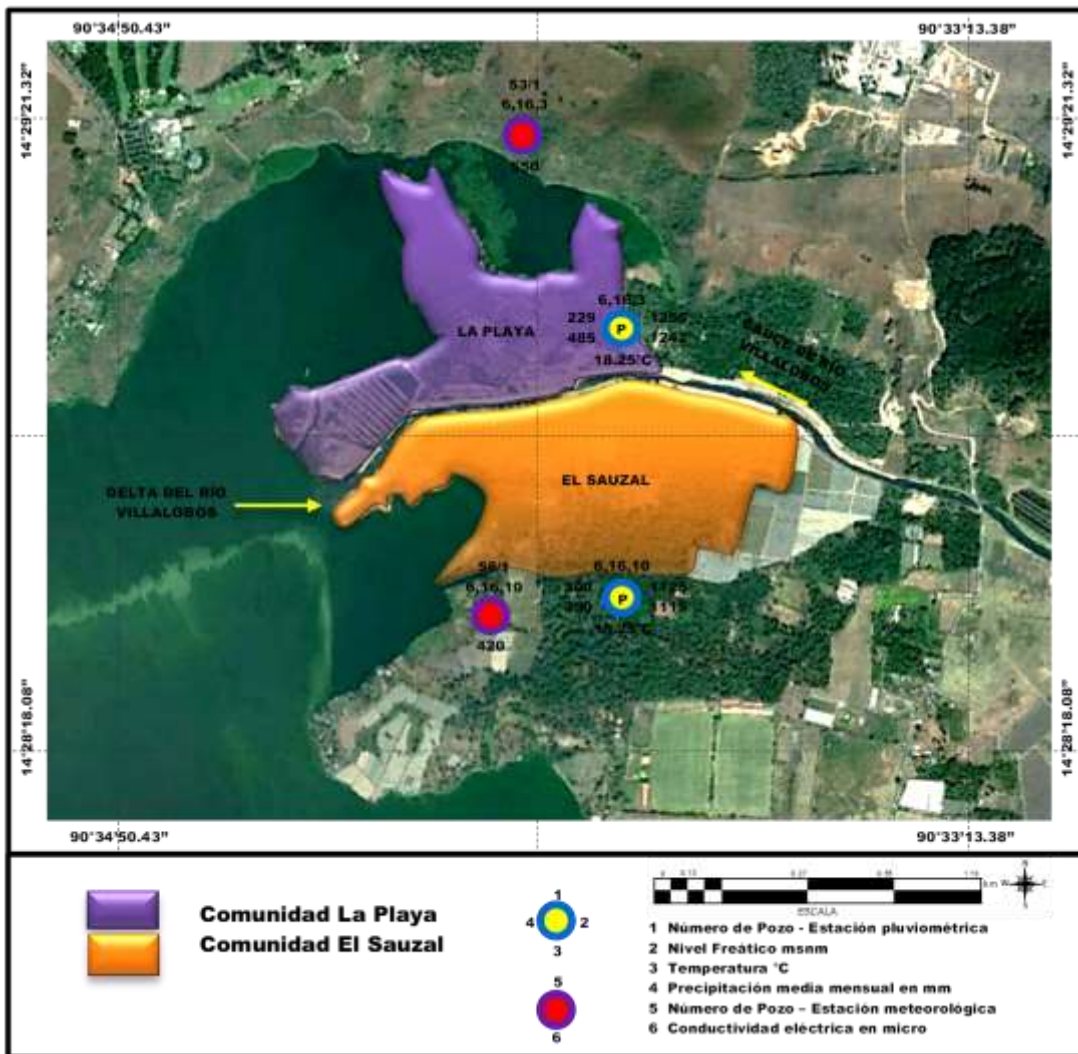
Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH y Ligorría, 2011. Adaptado por la autora en formato gvSIG. (agosto, 2012).

Figura 39. **Mapa de ubicación de pozos perforados en el área de estudio: delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal**



Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH.
 Adaptado por la autora en formato gvSIG. (julio, 2012).

Figura 40. **Mapa de variación de parámetros hidrológicos precipitación - niveles freáticos - temperatura y conductividad eléctrica en el área de estudio: delta del río Villalobos, comunidades La Playa y El Sauzal**



Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH.

Adaptado por la autora en formato gvSIG. (julio, 2012).