



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

TEMA:

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN
LA ZONA DE CHIPIPE DEL CANTÓN SALINAS.**

Autor:

Jennifer Vanessa Lindao Baque
Liliana Marina Polonio Briones

Tutor:

Ing. Lucrecia Moreno Alcívar Mg.

La Libertad, Ecuador

2014



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

Tesis de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

TEMA:

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN
LA ZONA DE CHIPIPE DEL CANTÓN SALINAS.**

Autor:

Jennifer Vanessa Lindao Baque
Liliana Marina Polonio Briones

Tutor:

Ing. Lucrecia Moreno Alcívar Mg.

La Libertad, Ecuador

2014

DECLARACIÓN EXPRESA

En atención al art. 26 del Reglamento del Trabajo de Titulación y Graduación de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, UPSE, que puntualiza: "La titularidad de la propiedad intelectual del trabajo de graduación y titulación es del autor".

Nosotras, autores de la presente tesis, declaramos nuestra voluntad para que sea la UPSE, la institución que, promueva y/o ejecute proyectos fundamentados en los contenidos científicos y técnicos, expuestos en estas páginas, cuya idónea dirección corresponde a nuestra Docente - Tutor

Santa Elena, 5 de febrero del 2015

Jennifer Vanessa Lindao Baque

C.I. 0927088534

Liliana Marina Polonio Briones

C.I. 2400093007

APROBACIÓN DEL DOCENTE-TUTOR

En mi calidad de Docente -Tutor del trabajo de investigación: “EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN LA ZONA DE CHIPIPE DEL CANTÓN SALINAS.”, elaborado por las estudiantes Jennifer Vanessa Lindao Baque y Liliana Marina Polonio Briones, egresadas de la Carrera de Ingeniería Civil, luego de haber cumplido con su respectiva orientación, estudio y revisión, me permito declarar su aprobación integral.

Santa Elena, 5 de febrero del 2015

Ing. Lucrecia Moreno, Mg.

DOCENTE-TUTOR

**CERTIFICADO DE REVISIÓN DE LA REDACCIÓN Y
ORTOGRAFÍA**

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos:

A Dios, por habernos permitido culminar esta etapa de nuestras vidas y conocer a cada una de las personas especiales que nos enseñaron mucho en este arduo camino.

A nuestros familiares, amigos y conocidos quienes constantemente nos motivaron para persistir con nuestras responsabilidades como estudiantes de nivel superior.

A la Universidad Estatal Península de Santa Elena y a sus docentes por contribuir a nuestra formación profesional.

A nuestra directora de tesis Ing. Lucrecia Moreno Mg, quien nos ha guiado en el desarrollo de esta investigación en forma idónea compartiendo sus conocimientos y experiencias.

AL Dr. Kervin Chunga, por todo el apoyo proporcionado para el exitoso desarrollo del presente trabajo.

A todas y cada una de las personas que nos apoyaron en esta presente investigación.

Jennifer Lindao

Liliana Polonio

DEDICATORIA

A mi mamá, Carmen Lindao Baque, este logro también es de ella porque gracias a su comprensión, esfuerzo y su trabajo cotidiano, estoy aquí, en la culminación de una grata experiencia.

A mi familia, uno de los pilares fundamentales de mi vida, por el apoyo y por la confianza brindada; por inculcarme que con humildad, paciencia y sabiduría todo es posible.

A mis amigos, compañeros y personas conocidas en el tiempo de vida estudiantil, pues siempre tuvieron una palabra de aliento en los momentos difíciles.

A la persona con la que, por circunstancias de la vida, he tenido la dicha de compartir muchos momentos gratos, mi compañera de tesis, mi amiga y casi hermana, Liliana Polonio, por darme la confianza y la oportunidad de lograr juntas esta meta universitaria.

Jennifer Lindao

DEDICATORIA

A mis padres, Carmen Briones Santos y Kleber Polonio Cabrera, a los cuales debo mi formación, mis conocimientos y mis valores como persona.

A mis hermanos y demás familiares quienes han sido pilares fundamentales para llegar a esta meta profesional.

A esas personas especiales que les llevo en mi corazón y que me ofrecieron su ayuda incondicional siendo parte importante de mi vida.

A mis Amigos y conocidos que con una palabra de aliento no me dejaron desistir y me apoyaron hasta la culminación de mi carrera.

A mi compañera de tesis, amiga y prácticamente hermana, Jennifer Lindao por el apoyo brindado desde que nos conocimos hasta ahora.

“Queda prohibido no sonreír
a los problemas, no luchar
por lo que quieres, abandonarlo
todo por miedo, no convertir en
realidad tus sueños”

-Pablo Neruda

Liliana Polonio

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Ramón Muñoz Suárez
DECANO FACULTAD
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Ing. Juan Garcés Vargas.
DIRECTOR DE LA ESCUELA
INGENIERÍA CIVIL

Ing. Lucrecia Moreno, Mg.
DOCENTE UPSE
TUTOR DE TESIS

Ing. Humberto Guerrero
DOCENTE UPSE
PROFESOR DE ÁREA

Abg. Joe Espinoza
SECRETARIO GENERAL

RESUMEN
“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE
SUELOS EN LA ZONA DE CHIPIPE DEL CANTÓN
SALINAS.”

Autores: Jennifer Vanessa Lindao
Liliana Marina Polonio

En la presente tesis se evaluó el potencial de la licuefacción del suelo en la zona de Chipipe del cantón Salinas, mediante el ensayo de penetración estándar (SPT), aplicando el método simplificado de Seed & Idriss.

La selección del área de estudio, se debe a: las características mecánicas del suelo, la geología y su cercanía al mar, parámetros idóneos para que ocurra el fenómeno de la licuefacción en el área de estudio.

Para analizar el riesgo a la licuefacción, se realizó ensayo de penetración estándar, de acuerdo a las normas del A.S.T.M. (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales), 1586. También, se realizaron otros ensayos como granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica y parafina con la finalidad de obtener el porcentaje de finos y el índice de plasticidad. Una vez conseguidos los resultados de los ensayos se procedió a realizar el cálculo de la licuefacción, determinando el factor de seguridad de cada zona evaluada en el área de estudio.

Cabe mencionar que los ensayos de suelos se realizaron en el laboratorio particular “INGEOTOP S.A” por cuanto en el transcurso de realización del presente estudio, el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), se encontraba en proceso de adquisición e implementación de equipos.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	5
1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.5.1 Objetivo general.....	6
1.5.2 Objetivos específicos.	6
1.6 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.7 METODOLOGÍA PROPUESTA.....	7
1.7.1 Métodos de recolección de datos y bibliografía.	7
1.7.2 Delimitación espacial y muestra.	7
1.7.2.1 Delimitación espacial.	7
1.7.2.2 Muestreo.....	8
1.7.3 Ensayos de laboratorio y de campo.	13
2 PRECEDENTES DEL ÁREA EN ESTUDIO	14
2.1 UBICACIÓN	14
2.2 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	15
2.2.1 Geología.....	15
2.2.1.1 Geología de la península de Santa Elena.....	15
2.2.1.2 Geología local.....	17
2.2.2 Geomorfología.	18
2.2.2.1 Geomorfología general.....	18
2.2.2.2 Geomorfología local.....	19
2.3 TECTONISMO	20
2.4 SISMOLOGÍA.....	22
3 MARCO TEÓRICO	26
3.1 DEFINICIÓN DE LICUEFACCIÓN.....	26
3.2 HISTORIA DE LA LICUEFACCIÓN.....	26
3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DEL FENÓMENO DE LICUEFACCIÓN	27
3.4 SUSCEPTIBILIDAD DE LA LICUEFACCIÓN	29
3.4.1 Criterios de susceptibilidad.....	29

3.4.2	Suelos granulares.	30
3.4.3	Suelos con presencia de finos.	30
3.5	ESTUDIOS PREVIOS PARA EVALUAR EL FENÓMENO DE LICUEFACCIÓN.....	31
3.5.1	Origen del suelo.	31
3.5.2	Distribución del tamaño de los granos.....	32
3.5.3	Profundidad del nivel freático.....	33
3.5.4	Edad del depósito.....	34
3.5.5	Amplitud y duración de la vibración del terreno.	37
3.5.6	Profundidad del suelo.	37
3.6	ENSAYOS DE CAMPO (SPT) Y DE LABORATORIO.....	38
3.6.1	Ensayos de campo (SPT). Norma ASTM D- 1586.....	38
3.6.1.1	Valor N (SPT) corregido (N_{60}).	40
3.6.1.1.1	Eficiencia del martillo (η_H).	41
3.6.1.1.2	Corrección por el diámetro de la perforación (η_B).....	41
3.6.1.1.3	Corrección por el tipo de muestreador (η_S).....	42
3.6.1.1.4	Corrección por longitud de la barra perforadora (η_R).	42
3.6.2	Ensayos de laboratorio.....	42
3.7	MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN.	43
3.7.1	Método basado en el número de golpes del ensayo del SPT.	43
3.7.1.1	Método de Seed & Idriss, (1971, 1982).	43
3.7.1.1.1	Relación de esfuerzo de corte cíclico, CSR.	43
3.7.1.1.2	Relación de resistencia cíclica, CRR.....	45
3.7.1.1.3	Corrección de escala de magnitud para valores de CSR y CRR.....	49
3.7.1.1.4	Calculo del potencial de licuefacción.....	50
3.7.2	Métodos basados en las propiedades de la fracción fina del suelo.	52
3.7.2.1	Método chino de Wang, (1979).....	52
3.7.2.2	Método chino modificado. Finn, (1991 - 1994).	52
3.7.2.3	Método chino modificado de acuerdo a las normas ASTM.	53
3.7.2.4	Método de Seed & Cetin et al., (2003).....	54
3.7.2.5	Propuesta de norma francesa. Durville et al. (1985).....	55

3.8 MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS SUSCEPTIBLES A LA LICUEFACCIÓN	56
3.8.1 Métodos orientados a nuevas infraestructuras.....	56
3.8.1.1 Mejoramiento del suelo.....	56
3.8.1.1.1 Vibroflotación.....	56
3.8.1.1.2 Vibrosustitución.....	57
3.8.1.1.3 Compactación dinámica.....	58
3.8.1.1.4 Reemplazo.....	59
3.8.1.2 Técnicas de drenaje.....	60
3.8.1.3 Cimentaciones profundas.....	60
3.8.2 Métodos orientados a infraestructuras existentes.....	61
3.8.2.1 Recalce con micropilotes.....	61
3.8.2.2 Jet Grouting.....	61
3.8.2.3 Inyección de compactación.....	62
4 RESULTADOS GEOTÉCNICOS DE LOS SUELOS DE LA ZONA DE CHIPIPE.....	63
4.1 ESTUDIOS DE SUELOS RECOPIADOS EN LA ZONA DE CHIPIPE.....	63
4.2 PERFIL ESTRATIGRÁFICO CON SUS ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS EN EL ESTUDIO	64
5 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN LA ZONA DE CHIPIPE DEL CANTÓN SALINAS	65
5.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO.....	65
5.1.1 Origen de los suelos de la zona de Chipipe.....	65
5.1.2 Distribución granulométrica.....	66
5.1.3 Edad de los depósitos en la zona de Chipipe.....	70
5.1.4 Profundidad del nivel freático.....	70
5.1.5 Amplitud y duración de la vibración del terreno.....	71
5.2 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS SUELOS DE LA ZONA DE CHIPIPE.....	72
5.2.1 Estudio de suelo del edificio Punta Pacífico realizado por el Ing. Franklin Ordóñez	72
5.2.2 Estudio de suelo del edificio Marenostrum realizado por la compañía Borleti S.A.	73

5.2.3 Estudio de suelo del aeropuerto Gral. Ulpiano Páez de Salinas realizado por la consultora Asesoría y Estudios Técnicos c. Ltda.	74
5.2.4 Perforaciones realizadas en el estudio por la compañía Ingetop S.A. ..	75
5.3 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN POR EL MÉTODO BASADO EN EL NÚMERO DE GOLPES DEL ENSAYO DEL SPT	77
5.4 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN BASADO EN LAS PROPIEDADES DE LA FRACCIÓN FINA DEL SUELO	86
5.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS EVALUADOS	89
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
6.1 CONCLUSIONES	93
6.2 RECOMENDACIONES	93
7 GLOSARIO	95
8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y BIBLIOGRAFÍA	98
8.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
8.2 BIBLIOGRAFÍA	99
9 ANEXOS	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Estudio recopilado del edificio Punta Pacífico.....	8
Tabla 1.2: Estudio recopilado del edificio Marenostrum.....	9
Tabla 1.3: Estudio recopilado del aeropuerto Gral. Ulpiano Páez de Salinas.	10
Tabla 1.4: Perforaciones realizadas en la zona de estudio.....	12
Tabla 2.1: Coordenadas de la zona de Chipipe.....	14
Tabla 2.2: Relación estratigráfica de formaciones de la península de Santa Elena..	16
Tabla 2.3: Catálogo de Fallas activas de la zona de estudio.	21
Tabla 2.4: Zonas sísmicas del Ecuador.....	24
Tabla 3.1: Criterios de evaluación de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo al origen del suelo	32
Tabla 3.2: Criterios de evaluación de la susceptibilidad de la licuefacción de acuerdo a la granulometría	33
Tabla 3.3: Criterio de evaluación de la susceptibilidad de la licuefacción de acuerdo al nivel freático.....	34
Tabla 3.4: Evaluación de susceptibilidad de licuefacción de acuerdo a la edad del depósito.	35
Tabla 3.5: Susceptibilidad estimada de licuefacción de distintos tipos de depósitos.....	36
Tabla 3.6: Evaluación de susceptibilidad de licuefacción basada en la aceleración.	37
Tabla 3.7: Correlaciones entre la densidad relativa y la resistencia a la penetración.	39
Tabla 3.8: Correlaciones entre la consistencia y la resistencia a la penetración.....	39
Tabla 3.9: Eficiencia del martillo de acuerdo a varios países.	41
Tabla 3.10: Valor de η_B de acuerdo al diámetro de la perforación.....	41
Tabla 3.11: Valor de η_S de acuerdo al tipo de muestreador.....	42
Tabla 3.12: Valor de η_R de acuerdo a la longitud de la barra perforadora.....	42
Tabla 3.13: Valores de α y β b en función del contenido de finos.....	48
Tabla 3.14: Factor de escala de magnitud (MSF).	49
Tabla 3.15: Factor de seguridad recomendado para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción.	51

Tabla 3.16: Criterio Andrews – Martin para la evaluación de licuefacción de suelos con presencia de finos.....	54
Tabla 3.17: Criterios de la norma francesa para suelos arenosos limosos.....	55
Tabla 3.18: Criterios de la norma francesa para suelos arenosos con fracción de arcilla.	55
Tabla 5.1: Evaluación de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo al origen del suelo	65
Tabla 5.2: Evaluación de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo a la granulometría	66
Tabla 5.3: Evaluación de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo a la edad del suelo	70
Tabla 5.4: Evaluación de la susceptibilidad de licuefacción basada en el nivel freático.....	71
Tabla 5.5: Evaluación de susceptibilidad de licuefacción basada en la aceleración.	71
Tabla 5.6: Resumen de los resultados de exploración del suelo.....	72
Tabla 5.7: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT.	80
Tabla 5.8: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT	81
Tabla 5.9: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT.	82
Tabla 5.10: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT.	83
Tabla 5.11: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT.	84
Tabla 5.12: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT.	85
Tabla 5.13: Resumen de los resultados. Método basado en la fracción fina del suelo.....	87
Tabla 5.14: Resumen de los resultados. Método basado en la fracción fina del suelo.....	88
Tabla 5.15: Comparación de los resultados del Potencial de Licuefacción de acuerdo a los métodos aplicados.	90

Tabla 5.16: Comparación de los resultados del Potencial de Licuefacción de acuerdo a los métodos aplicados.	91
---	----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1: Delimitación del área de estudio.	8
Ilustración 1.2: Perforaciones 1-2-3 y 4. Estudio recopilado del edificio Punta Pacífico.	9
Ilustración 1.3: Perforaciones 5 y 6. Estudio recopilado del edificio Marenostrom. .	9
Ilustración 1.4: Perforaciones 7-8-9-10 y 11. Estudio recopilado del Aeropuerto de Salinas.	10
Ilustración 1.5: Estudios recopilados y sondeos realizado en el área de Chipipe y zonas aledañas.	11
Ilustración 1.6: Perforaciones 12-13 y 14. Perforaciones realizadas en la tesis.	12
Ilustración 2.1: Área de estudio de Chipipe, limitada por el departamento de catastro del cantón Salinas.	14
Ilustración 2.2: Mapa geológico de la Puntilla de Santa Elena	17
Ilustración 2.3: Plataformas de erosión, sector Puntilla de Santa Elena.	18
Ilustración 2.4: Acantilados de la Puntilla de Santa Elena.	19
Ilustración 2.5: Zona de Subducción de la Placa de Nazca y Placas continentales sudamericanas.	20
Ilustración 2.6: Ubicación de las Fallas activas de la zona de estudio.	22
Ilustración 2.7: Mapa de Sismos.	23
Ilustración 2.8: Mapa de peligro sísmico PGA del Ecuador	25
Ilustración 3.1: Figura esquemática del proceso de licuefacción.	28
Ilustración 3.2: Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción mediante curvas granulométricas.	33
Ilustración 3.3: Perforación realizada en la tesis.	39
Ilustración 3.4: Esquema de esfuerzo de corte producido por terremoto a una determinada profundidad z.	44
Ilustración 3.5: Gráfica de correlación entre CSR y el $(N_1)_{60}$	50
Ilustración 3.6: Norma China modificada para la evaluación de licuefacción de suelos con presencia de finos.	53
Ilustración 3.7: Gráfica del Método de Seed & Cetin et al., (2003).	54
Ilustración 3.8: Esquema de ejecución de la vibroflotación.	57
Ilustración 3.9: Equipo de vibroflotación.	57
Ilustración 3.10: Fases de la vibrosustitución.	58

Ilustración 3.11: Compactación dinámica.	59
Ilustración 3.12: Método de remplazo de suelo.....	59
Ilustración 3.13: Sistema de drenes verticales de grava.	60
Ilustración 3.14: Cimentación profunda.	60
Ilustración 3.15: Recalce con micropilotes.....	61
Ilustración 3.16: Jet Grouting.	62
Ilustración 3.17: Inyección de compactación.....	62
Ilustración 5.1: Evaluación de las curvas granulométricas del estudio de suelo del edificio Punta Pacifico	67
Ilustración 5.2: Evaluación de las curvas granulométricas del estudio de suelo del edificio Marenostrum.....	67
Ilustración 5.3: Evaluación de las curvas granulométricas del estudio de suelo aeropuerto Ulpiano Páez.....	68
Ilustración 5.4: Evaluación de las curvas granulométricas de sondeo realizado en Biblioteca municipal.	68
Ilustración 5.5: Evaluación de las curvas granulométricas de sondeo realizado cerca a base aérea FAE.....	69
Ilustración 5.6: Evaluación de las curvas granulométricas del estudio de suelo del condominio Vela Beach.....	69

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

La licuefacción es un fenómeno que está asociado a los movimientos sísmicos, durante el cual el suelo se comporta temporalmente en estado licuado, de tal manera que ya no puede soportar cualquier tipo de infraestructura que se encuentre sobre él. Los efectos de la licuefacción según Seed & Idriss, 1971, se observan en sismos con magnitudes aproximadas de $M_w = 7$ con rangos de aceleraciones de entre 0.25 y 0.35g, siendo causante de fallas en el terreno y de daños estructurales importantes. Sin embargo estudios realizados por otros autores evidenciaron problemas de licuefacción con magnitudes $M_w = 5.5$. Los suelos que se encuentran propensos al fenómeno de licuefacción son aquellos suelos sueltos, granulares, uniformemente graduados y con un bajo contenido de finos, particularizando las arenas que son especialmente susceptible a este fenómeno cuando presenten nivel freático superficial.

En la actualidad se presentan diversos estudios con distintas metodologías para evaluar el potencial de licuefacción; muchos de estas metodologías derivan del método simplificado de Seed & Idriss (1971); con estos métodos es posible realizar estudios para determinar la susceptibilidad de los suelos al fenómeno de licuefacción.

El Ecuador geográficamente, forma parte del “Cinturón de Fuego del Pacífico”, que es una zona de alta sismicidad del planeta. La zona de Chipipe situado en el perfil costero del cantón Salinas se encuentran sobre suelos arenosos y tiene profundidades de nivel freático casi superficial ó de 1-2 m de profundidad. Estos factores hacen que en Chipipe deba analizarse la susceptibilidad a la licuefacción, por tal motivo, se evaluó los estudios de suelos recopilados en el área de Chipipe y en zonas aledañas, utilizando los resultados de ensayos de laboratorio y de campo (ensayo del SPT), revisando las características más relevantes del área de estudio de acuerdo a toda la información geotécnica y sismológica de la misma.

1.2 ANTECEDENTES

Uno de los factores para que se pueda producir el fenómeno de licuefacción del suelo es la ocurrencia de un movimiento sísmico. Diversos estudios determinaron que la licuefacción del suelo ha generado fallas de diversos tipos en las obras de ingeniería.

El Ecuador se encuentra en una zona de alto riesgo de sismicidad por lo que a través de su historia se han suscitado diversos sismos; esta información se encuentra disponible en los diferentes catálogos del RENSIG (Red Nacional de Sismología del Instituto Geofísico de Quito), el sitio oficial de CERESIS (Centro Regional de Sismología para América del Sur), en los cuales constan datos de magnitudes estimadas a partir de la intensidad macrosísmica (Me), el catálogo NEIC (Centro de Información de Terremotos Nacional), en el que se registran sismos que han afectado a Ecuador desde 1973, disponible en escala de Magnitud momento, Mw.

De todos los sismos que han ocurrido en el Ecuador y registrados en estos catálogos, se destacan los de mayor intensidad los cuales tenemos:

- En Riobamba el 4 de febrero de 1797, un sismo de magnitud Mw = 8.3 Richter, ocasionó la destrucción total de la antigua ciudad de Riobamba, daños severos en ciudades y pueblos de lo que actualmente son las provincias de Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi, parte de Bolívar y Pichincha, se presentaron grietas muy profundas y anchas, problemas de licuefacción en muchos sitios.
- El 3 de mayo de 1896, en Manabí, un sismo de magnitud aproximada Mw = 7.5 Richter, generó la destrucción parcial o casi total de construcciones en las localidades de Bahía de Caráquez, Portoviejo y Canoa. Se produjeron grietas muy extensas y profundas, algunas alcanzaron hasta 2 m de ancho, se formaron pequeños cráteres de 2 m de profundidad que emanaron agua y arena, lo cual evidencia que existió un problema de licuefacción.
- El sismo del 31 de enero de 1906, en la provincia de Esmeraldas con magnitud Mw = 8.8 Richter, produjo grandes daños en esta provincia y otras localidades,

abriendo profundas grietas, por donde emanó agua y arena, efectos del proceso del fenómeno de licuefacción. sin embargo no generó consecuencias catastróficas debido a que no existían en la época grandes centros urbanos.

- En la provincia del Guayas, el sismo 2 de octubre de 1933, con magnitud $M_w = 6.9$ Richter, pudo ser amplificado por los suelos blandos de Guayaquil pero en esa época no se reportaron mayores daños en la península de Santa Elena, por que existían pocos asentamiento poblacionales.
- El 12 de diciembre de 1953, en la provincia de El Oro, un sismo con magnitud $M_w = 7.8$ Richter, generó mayores efectos en la provincia de Loja y en menos proporción en las provincias del Guayas y El Oro.
- En la provincia de Esmeraldas, el sismo del 19 de enero de 1958, con magnitud $M_w = 7.8$ Richter, causó el colapso total de casas antiguas y parcial de construcciones nuevas, derrumbes y deslizamientos en cerros y taludes, se visualizaron grietas de alguna consideración en las calles, evidencias de un posible fenómeno de licuefacción, aunque no se realizaron estudios para corroborar.
- El sismo del 10 de diciembre de 1970, con magnitud $M_w = 7.1$ Richter, ocasionó daños en las provincias de Loja y El Oro. Varias localidades de Loja quedaron destruidas casi completamente, casas y templos se derrumbaron hasta los cimientos, edificios de buena calidad semidestruidos o seriamente afectados; se visualizaron grandes grietas y deslizamientos de taludes y laderas, indicios de que existieron problemas de licuefacción.
- La provincia de Esmeraldas, el 12 de diciembre de 1979, se vio afectada por un sismo con magnitud $M_w = 7.8$ Richter y ocasionó daños graves en el territorio colombiano. En el Ecuador fueron daños materiales leves y no se produjeron víctimas.
- El catálogo de la red sísmica del RENSIG (Red Nacional de Sismógrafos), registró en la provincia de Manabí en la localidad de Bahía de Caráquez, el 4

de agosto de 1998, un sismo de magnitud $M_w = 7.1$ Richter. Este evento generó que muchos edificios y otros tipos de infraestructuras colapsaron parcial y completamente, se visualizaron deformaciones severas y en estudios posteriores realizados se determinó que parte de los daños sufridos en el sector se debió al fenómeno de la licuefacción del suelo, pues la pérdida de la resistencia del suelo ocasionó grandes desplazamientos y daños en la cimentación de las infraestructuras.

Por tal motivo los diseñadores y proyectistas actualmente consideran dentro de sus análisis la susceptibilidad de los suelos al fenómeno de licuefacción, tal es el caso del Estudio Geotécnico de la carretera San Vicente – Pedernales. Anexo A.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El Ecuador se encuentra geográficamente ubicada en una zona de alta sismicidad, (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, EPN), lo que nos indica que puede existir la presencia del fenómeno de licuefacción, por lo tanto, es necesario efectuar estudios que permitan estimar el potencial de riesgo de licuefacción que se puede dar en la zona de estudio para poder planificar y mitigar los grandes efectos que trae consigo.

Los suelos en el área de Chipipe ubicados en el cantón Salinas, cercanos al mar, se caracterizan por ser suelos limosos y/o arenosos finos sueltos y un nivel freático de 1 a 1.5 m de profundidad; estos son factores que nos indican que el suelo tiene una alta probabilidad de riesgo de licuefacción ante la ocurrencia de un sismo, puesto que se conoce que la licuefacción del suelo se observa principalmente en lugares cercanos a ríos, bahías y mares; esto es, donde se encuentran suelos arenosos sueltos.

En la actualidad en los proyectos de construcción de edificios, es común que no se considere, en el diseño de la cimentación la falla por licuefacción que se puede generar por la pérdida de la resistencia al corte en la acción de un sismo, ocasionando que las edificaciones que se encuentran en la zona, sean muy vulnerables, debido a

que se pueden producir asentamientos e inclinación de edificios, desplazamiento lateral, desprendimiento del terreno, línea de volcanes de arena, con sismos de magnitudes mayores a 7, Alva (2002).

González Vallejo (2002), indica que “la licuefacción es un proceso de pérdida de resistencia de ciertos tipos de suelos, que al estar saturados de agua y que al ser sometidos a la sacudida de un sismo, fluyen como un líquido a causa del aumento de la presión de los poros. La pérdida de esta resistencia hace que las estructuras sean incapaces de mantenerse estables y sean arrastradas sobre masas de suelo líquido”.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Los estudios de suelos son primordiales, debido a que es el suelo la base de soporte de todo tipo de obras civiles; por lo que se debe realizar estudios detallados que tomen en cuenta el potencial de licuefacción al momento de diseñar edificaciones; además, gran parte de las edificaciones existentes en el área de estudio han sido construidas con normas ya caducadas y en muchos casos sin la dirección técnica que pueda prevenir sobre este fenómeno.

El objeto de la investigación es estudiar el fenómeno de licuación y determinar las posibles zonas de Chipipe que son susceptibles a la licuefacción con la presencia de un sismo, mediante ensayos de laboratorio con el cual se obtendrán parámetros geomecánicos para poder analizar con los diferentes criterios el potencial de licuefacción, aportando con diversos factores que afectan directamente la licuación de los suelos.

La presente tesis pretende que con el uso de la información del estudio propuesto se den recomendaciones para minimizar la susceptibilidad de los suelos a licuarse en presencia del sismo; también tomar en cuenta este fenómeno al momento de diseñar la cimentación de las edificaciones en la mencionada zona.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo general.

- ✓ Determinar el potencial de licuefacción mediante la caracterización geológica y geotécnica del suelo, en la zona de Chipipe del cantón Salinas, para dar posibles soluciones de estabilidad y mejoramiento de infraestructuras.

1.5.2 Objetivos específicos.

- ✓ Dar conocer los conceptos que rigen el fenómeno de licuefacción, así como la metodología usada para evaluar el potencial de licuefacción.
- ✓ Identificar las características topográficas, geológicas, geotécnicas del suelo en la zona de Chipipe.
- ✓ Evaluar el potencial de licuefacción de los suelos de la zona de Chipipe con los métodos: Exploración del suelo, Ensayo de SPT y Fracción fina del suelo.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos con la finalidad de dar posibles soluciones para las existentes y nuevas infraestructuras.

1.6 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Determinar las características geotécnicas del suelo que se encuentra en la zona de estudio, para identificar el potencial de licuefacción basado en la recopilación de estudios de suelos en la zona de Chipipe y de ensayos de laboratorio y de campo, como el Ensayo de SPT, con la finalidad de precautelar las estructuras y reducir los efectos producidos por el fenómeno de licuefacción que se encuentren en la zona de Chipipe. El resultado obtenido de la presente investigación proporcionará información veraz y

de alto valor para constructores, Gobiernos Autónomo Descentralizados (GAD) y estudios posteriores.

1.7 METODOLOGÍA PROPUESTA

El método de investigación planteado en el presente estudio es del tipo cualitativo y cuantitativo; se desarrollarán trabajos de campo y ensayos de laboratorio respectivos, para elaborar una base de datos con todos los factores que influyen en la ocurrencia del fenómeno de licuefacción.

Obtenidos los resultados de los parámetros geomecánicos de las muestras, se procederá al análisis de los diferentes métodos existentes para la evaluación del potencial de licuefacción y en base a esto se determinará el factor de seguridad del potencial de licuefacción en la zona de Chipipe.

1.7.1 Métodos de recolección de datos y bibliografía.

Con el propósito de obtener datos reales y confiables para la respectiva evaluación y análisis del presente estudio, se tomaron y recopilamos trabajos de investigación y bibliografía existente acerca del tema de estudio, además de las diferentes consultas con ingenieros expertos en el tema con los que se revisaron y evaluaron los resultados obtenidos.

1.7.2 Delimitación espacial y muestra.

1.7.2.1 Delimitación espacial.

Para delimitar la zona de estudio se consideró tres factores que influyen en la ocurrencia del fenómeno de licuefacción como:

- ✓ Presencia del nivel freático superficial o casi superficial.
- ✓ Características de los suelos de la zona

- ✓ Ubicación con respecto al mar.

Se escogió la zona de Chipipe del cantón Salinas (Ilustración 1.1) para el presente estudio debido que este sector cumple con las características antes mencionadas y su crecimiento turístico ha generado la construcción de infraestructuras de gran importancia.



Ilustración 1.1: Delimitación del área de estudio.
Fuente: Coordenadas ingresadas en Google Earth.

1.7.2.2 Muestreo.

Se recopilaron 3 estudios de suelos, los cuales se encuentran en el Anexo B y se dividen de la siguiente manera:

- ❖ Edificio Punta Pacífico. Ver Tabla 1.1 e Ilustración 1.2
- ❖ Edificio Marenostrom. Ver Tabla 1.2 e Ilustración 1.3
- ❖ Aeropuerto Gral. Ulpiano Páez de Salinas. Ver Tabla 1.3 e Ilustración 1.4

Tabla 1.1: Estudio recopilado del edificio Punta Pacífico.

Estudio	Coordenadas			
	Perforación	Prof.	Norte	Este
Edificio Punta Pacífico	1	6.5	9757123	501763
	2	6.5	9757102	501757
	3	6.5	9757084	501751
	4	6.5	9757074	501733

Fuente: Estudio de Mecánica de Suelos para la cimentación del proyecto denominado Punta Pacífico



Ilustración 1.2: Perforaciones 1-2-3 y 4. Estudio recopilado del edificio Punta Pacífico.
Fuente: Coordenadas ingresadas en Google Earth.

Tabla 1.2: Estudio recopilado del edificio Marenostrom.

Estudio	Coordenadas			
	Perforación	Prof.	Norte	Este
Edificio Marenostrom	5	20.0	9756775	502384
	6	20.0	9756758	502363

Fuente: Análisis de estabilidad y recomendaciones técnicas para la cimentación de estructuras del proyecto Parque del edificio Marenostrom



Ilustración 1.3: Perforaciones 5 y 6. Estudio recopilado del edificio Marenostrom.
Fuente: Coordenadas ingresadas en Google Earth.

Tabla 1.3: Estudio recopilado del aeropuerto Gral. Ulpiano Páez de Salinas.

Estudio	Coordenadas			
	Perforación	Prof.	Norte	Este
Aeropuerto Gral. Ulpiano Páez de Salinas	7	10.0	9755328	502738
	8	10.0	9755311	502772
	9	10.0	9755291	502807
	10	10.0	9755512	502489
	11	7.0	9755908	501920

Fuente: Estudio de suelos del Terminal Aéreo del Aeropuerto de Salinas



Ilustración 1.4: Perforaciones 7-8-9-10 y 11. Estudio recopilado del Aeropuerto de Salinas.

Fuente: Coordenadas ingresadas en Google Earth.

Obteniendo un total de 11 perforaciones de diferentes profundidades. Se realizaron tres sondeos, el primero ubicado en el solar destinado para la Biblioteca Municipal de Salinas, el segundo cercano a la Base Aérea de Salinas y el tercero en el solar destinado para el proyecto condominio Vela Beach, para obtener una base de datos de las características geomecánicas del área de estudio. (Ilustración 1.5)



Ilustración 1.5: Estudios recopilados y sondeos realizado en el área de Chipipe y zonas aledañas
Fuente: Coordenadas ingresadas en *Google Earth*.

Las tres perforaciones se las realizaron a una profundidad de 8 m, puesto que el fenómeno de licuefacción tiende a ocurrir a profundidades menores a 9 m, González *et al.*, (2005), utilizando un equipo de perforación que consiste en una máquina con sistema de percusión y lavado con motor Briggs & Stratton de 16 HP. (Ver Tabla 1.4 e Ilustración 1.6)

En cada metro de perforación se efectuó el ensayo de Penetración Estándar (S.P.T), con un martillo de 63,5 Kg (140 lbs) y con una caída libre de 0,76m (30 in). Estos ensayos se ajustaron a la norma ASTM D-1586. Durante la ejecución de SPT se anotó el número de golpes por cada 0.15m (6 in) de hincado. Las muestras alteradas fueron obtenidas a cada metro de profundidad en el terreno y fueron descritas e identificadas (procedimiento visual-manual) de acuerdo a la norma ASTM-D2488, siendo esta clasificación verificada y/o corregida de acuerdo a los resultados de los ensayos de laboratorio y al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Cabe recalcar que en la actualidad existen otros ensayos de campo como: ensayo de penetración estática (CPT), piezocono (CPTU), dilatómetro de Marchetti (DMT) y ensayos geofísicos, sin embargo para el presente estudio se contó con el

equipo para realizarlo con el ensayo del SPT, que ha sido utilizado en los estudios realizados en Canoa, Manabí en el año 2010.

Las muestras debidamente etiquetadas y protegidas para prevenir pérdidas de su contenido de humedad, fueron trasladadas al laboratorio de acuerdo a la norma ASTM-D4220 para la ejecución de los ensayos de clasificación y resistencia, todos los ensayos han sido realizados conforme lo indicado en las Especificaciones de la ASTM.

Tabla 1.4: Perforaciones realizadas en la zona de estudio.

Perforación	Prof.	Ubicación	Coordenadas	
			Norte	Este
12	8	Biblioteca Municipal	9756672	502372
13	8	Aledaña a la Base Aérea	9756743	501707
14	8	Condominio Vela Beach	9756536	502471

Fuente: Estudios realizados en la tesis, Laboratorio INGEOTOP S.A



Ilustración 1.6: Perforaciones 12-13 y 14. Perforaciones realizadas en la tesis

Fuente: Coordenadas ingresadas en Google Earth.

1.7.3 Ensayos de laboratorio y de campo.

Los ensayos de laboratorio y campo para la presente investigación, fueron realizados de acuerdo a las diferentes normas establecidas por el ASTM, los que se detallan a continuación:

- ✓ Ensayo de Penetración Estándar, SPT. Norma ASTM D-1586

- ✓ Análisis granulométrico
 - Análisis granulométrico por tamizado. Norma ASTM D-422
 - Método del Hidrómetro. Norma ASTM D-422.

- ✓ Límites de Atterberg:
 - Límite líquido. Norma ASTM D-4318
 - Límite plástico. Norma ASTM D-4318

- ✓ Gravedad específica del suelo. Norma ASTM D-854

- ✓ Peso específico del suelo (Método de la parafina)

2 PRECEDENTES DEL ÁREA EN ESTUDIO

2.1 UBICACIÓN

La zona de Chipipe está ubicada en la parroquia urbana Alberto Enríquez Gallo en el cantón Salinas de la provincia de Santa Elena, sus límites son: al este el barrio Enríquez Gallo; al sur, la playa de Mar Bravo y la Base Aérea donde se encuentra el aeropuerto Gral. Ulpiano Páez; al oeste, Puntilla de Santa Elena y la Base Naval, donde se encuentran las famosas rocas "La Chocolatera", concurrida por surfistas; al norte tiene la playa denominado Chipipe. (Ver Ilustración 2.1). Su promedio anual de precipitación es entre 125 a 150 mm., y las temperaturas oscilan entre los 21 y 33° C.

Las coordenadas delimitantes del área de estudio se detallan en la Tabla 2.1, además su altura sobre el nivel del mar varía entre 2 a 4 m y su superficie es aproximadamente de 58.7 Ha.

Tabla 2.1: Coordenadas de la zona de Chipipe

Punto	Coordenadas	
	Norte	Este
1	9756801	501562
2	9757123	501743
3	9756930	502127
4	9756813	502482
5	9756735	502714
6	9756390	502538
7	9756332	502622
8	9756222	502559
9	9756169	502620
10	9755969	502509

Fuente: Gobierno Autónomo Descentralizado de Salinas



Ilustración 2.1: Área de estudio de Chipipe, limitada por el departamento de catastro del cantón Salinas
Fuente: Gobierno Autónomo Descentralizado de Salinas

2.2 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

2.2.1 Geología.

2.2.1.1 Geología de la península de Santa Elena.

En el libro Geología del Ecuador del Ing. Eugenio Núñez del Arco, (2003), se explica que el basamento de la península de Santa Elena está constituido por las formaciones, Cretácea Piñón (volcánica) y Cayo (sedimentaria marina). Estas unidades constituyen los elementos autóctonos de la región.

Encima de la formación Cayo, se encuentra la formación Santa Elena del Cretáceo Superior, sobreyace a Santa Elena el grupo Azúcar (Paleoceno-Eoceno Medio), integrado en la base por la formación San José, en contacto discordante con Santa Elena, y en el tope a la formación Atlanta del Eoceno Inferior. La formación Passage Beds del Eoceno Medio, está encima de Atlanta.

El Eoceno Medio a Superior en la Península, está formado por el grupo Ancón, que en orden estratigráfico ascendente, corresponde en la base a las formaciones Santo Tomás, en el medio Clay Pebble Beds, y en el tope de la sección la formación Seca. Durante el Oligoceno, el Mioceno y parte del Plioceno en la península de Santa Elena no se registró sedimentación, o se erosionó todo el conjunto estratigráfico, por lo que rocas de edad cuaternaria, como la formación El Tablazo y el aluvión se emplazaron discordantemente sobre rocas terciarias.

Tabla 2.2: Relación estratigráfica de formaciones de la península de Santa Elena.

ERA	AÑOS	PERIODO	PENINSULA DE SANTA ELENA		LITOLOGÍA	
CUATERNARIO	25000 AÑOS HASTA HOY	HOLOCENO	ALUVIÓN		Gravas, arenas y arcillas no consolidadas	
	1 MILLÓN A 25000 AÑOS	PLEISTOCENO	Fm. TABLAZO		Arena fina a media, localmente calcárea, con gravas y conchas rotas y presencia de sal.	
CENOZOICA O TERCIARIA	12 A 1 MILLÓN DE AÑOS	PLIOCENO				
	25 A 12 MILLONES DE AÑOS	MIOCENO				
	35 A 25 MILLONES DE AÑOS	OLIGOCENO				
	55 A 35 MILLONES DE AÑOS	EOCENO	U	GRUPO ANCÓN	SECA	Sección Argilácea con variación faunística, lodolitas, areniscas turbidíticas y lutitas color café, yesíferas.
					M. CLAY PEBBLE BEDS	Guijarros de Arcillas hasta 10 cm de tamaño, pulidos, reondeados, cubiertos por óxido de hierro en una matriz de arcilla verde gris
					SANTO TOMÁS	Areniscas Conglomeráticas duras, bien cementadas, muy parecidas a la de la F. Atlanta
	70 A 55 MILLONES DE AÑOS	PALEOCENO	L	GRUPO AZÚCAR	PASSAGE BEDS	Horizontes delgados de Areniscas, Limos y Arcillas
					ATLANTA	Areniscas grises a verdes, duras, bien cementadas y su matriz es argilácea o calcárea
					SAN JOSÉ	Areniscas Micáceas verdosas a gris verdosas. Por intemperismo se vuelven de color ladrillo.
	MESOZOICA O SECUNDARIA	135 A 70 MILLONES DE AÑOS	CRETÁCEO	M. SANTA ELENA	Fm. CAYO	Bloque Caóticos de lutitas y Areniscas Silicificadas
M. CAYO				Piedra Calcárea gris oscuro a negro. Lutitas calcáreas, areniscas cuarzosas, conglomerados que contienen canto rodado hasta areniscas muy finas		
PIÑON				Basaltos y Rocas Volcánicas		

Fuente: Ing. Núñez del Arco Eugenio. (2003). *Geología del Ecuador*.

La Tabla 2.2 representa un cuadro de las eras geológicas con sus años y los respectivos periodos, así como también las relaciones estratigráficas entre las formaciones de la Península de Santa Elena.

2.2.1.2 Geología local.

En la zona de estudio del área de Salinas, el rasgo geológico más importante, es la formación Cayo, conformada litológicamente de areniscas, chert y arcillas silicificadas.

En las partes bajas, yacen sobre la formación Cayo depósitos cuaternarios constituidos por El Tablazo pleistocénico, Pedoja *et al.*, (2006), y está compuesto de areniscas calcáreas y conglomerados, con abundantes fósiles. (Ilustración 2.2, círculo rojo)

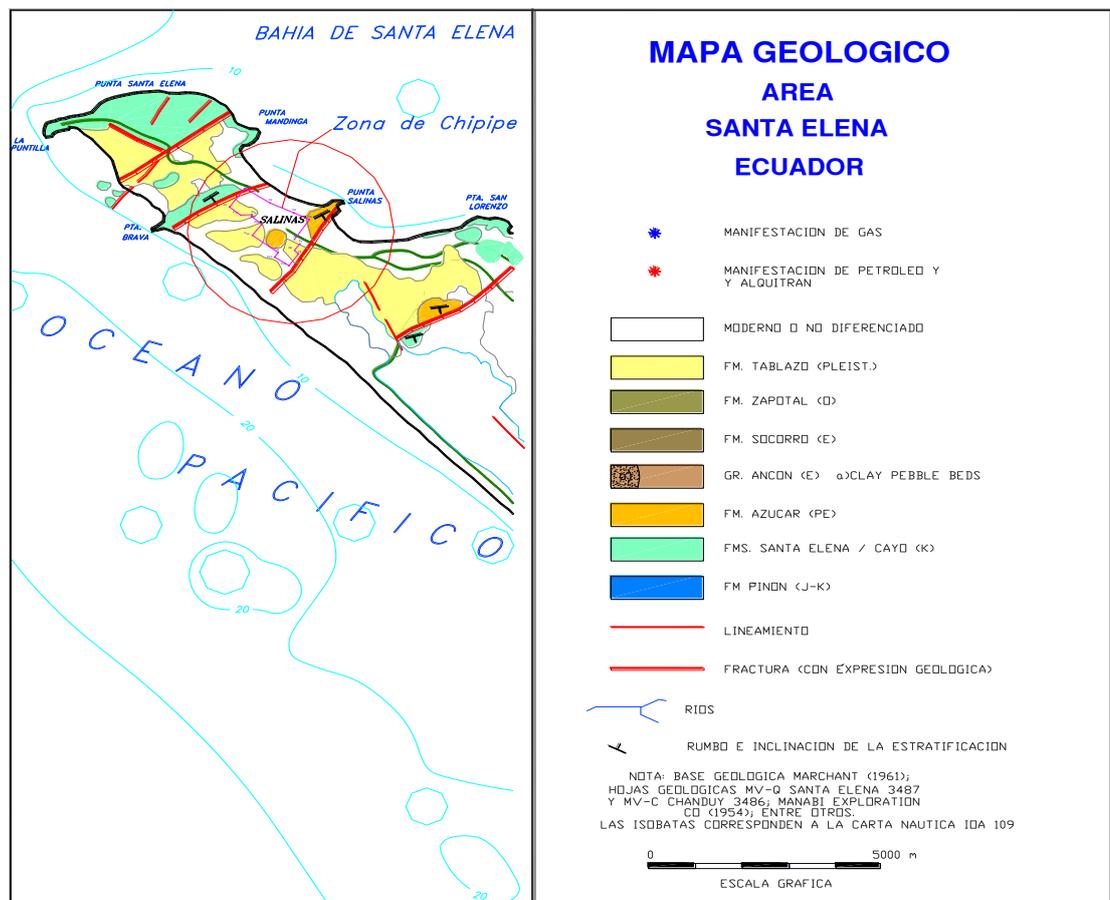


Ilustración 2.2: Mapa geológico de la Puntilla de Santa Elena

Fuente: Instituto Geográfico Militar. *Base geológica Marchant (1961), hojas geológicas Mv-Q Santa Elena 3487 y Mv-C Chanduy 3486; Manabí Exploración (1954)*

Las costas, de acantilados incipientes, se encuentran en proceso de levantamiento; Pedoja *et al.*, (2006), indican una tasa de levantamiento de 0.2 mm/año, a juzgar por la presencia de rocas sumergidas de la formación Cayo, y la ubicación actual de los afloramientos cuaternarios, INOCAR, (1975).

En el área de Salinas, las costas son bajas y los acantilados que se encuentran en “La Chocolatera” alcanzan alturas no mayores de 10 m, donde las olas han socavado las rocas de la formación Cayo como las de El Tablazo. En los lugares en donde no afloran estas formaciones, se han desarrollado playas que han hecho avanzar la línea de costa hacia el mar.

2.2.2 Geomorfología.

2.2.2.1 Geomorfología general.

La costa de la Puntilla de Santa Elena es muy irregular; los bajos acantilados son verticales, muy inestables y se originaron de un sistema de barrera levantada/planicie litoral.

Estos acantilados están conformados de areniscas pobremente cementadas con carbonato, lutitas y arcillas. Programa de Manejo de Recursos Costeros (PMRC), (1994).



Ilustración 2.3: Plataformas de erosión, sector Puntilla de Santa Elena. Fuente: Soledispa Bolívar. (2008). *Características geomorfológicas y sedimentológicas de la bahía de Santa Elena.*

La Fuerza del oleaje facilita el colapso de los acantilados; son muy notorias las salientes rocosas, llamadas también plataformas de erosión, las mismas que se extienden varias decenas de metros mar adentro; que constituyen la evidencia del avance del mar, por el retroceso de los acantilados debido a la erosión, como las plataformas del sector Punta Blanca-Capaes y las de la Puntilla de Santa Elena. (Ilustración 2.3)

2.2.2.2 Geomorfología local.

Salinas constituye una extensa planicie cuya forma triangular ocupa la parte suroccidental de la península de Santa Elena. No existen accidentes orográficos de consideración, encontrándonos con pequeñas elevaciones como: la colina de Punta Carnero y el Cerro de Salinas, conocido también como La Puntilla; accidente costanero que se adentra en forma de punta en el Océano, constituyendo un estratégico lugar como punto de referencia para la navegación.



Ilustración 2.4: Acantilados de la Puntilla de Santa Elena.
Fuente: Soledispa Bolívar. (2008). *Características geomorfológicas y sedimentológicas de la bahía de Santa Elena.*

La característica geomorfológica más importante del sector de estudio, lo constituye la plataforma de erosión, claramente observable en la Puntilla de Santa Elena, y corresponden a épocas en que el nivel del mar descendió hasta profundidades de 4 y 10 m, durante la época glacial. El material rocoso aparentemente es competente y resiste la erosión, pero por estar silicificado, se convierte en roca frágil, con

capacidad escasa para soportar el esfuerzo de compresión, por lo que se fractura muy fácilmente cuando se toman bloques separados, INOCAR, (1975).

La base de estos acantilados, desde hace varios años viene siendo sometida a un fuerte socavamiento, produciendo un retroceso de la línea de costa, cuya evidencia de este proceso erosivo son los grandes bloques rocosos caídos de la parte alta, como se observa en los acantilados de la Puntilla de Santa Elena. (Ilustración 2.4)

2.3 TECTONISMO

En nuestro país y específicamente la provincia de Santa Elena presenta un tectonismo complejo, debido a la influencia directa del movimiento de la placa de Nazca y las placas continentales sudamericanas y del Bloque Nor-Andino. Eguez *et al.*, (2003); Espinoza, (1992); Mendoza & Dewey, (1984). (Ilustración 2.5)

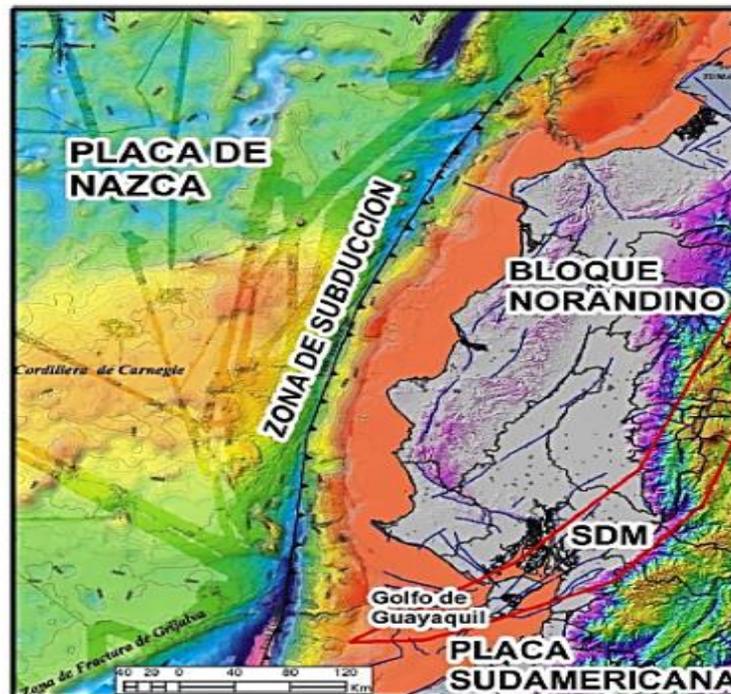


Ilustración 2.5: Zona de Subducción de la Placa de Nazca y Placas continentales sudamericanas.

Fuente: Dr. Chunga Kervin, (2009), *Riesgo en el Golfo de Guayaquil: Revisión de Datos Sismológicos y de Fallas Activas*

La placa oceánica de Nazca esta subduciendo a lo largo de la fosa Ecuador en dirección N80°E a una velocidad de 6 a 8 cm/año, Baldock, (1983); Barazangi &

Isacks, (1976); Benítez, (1995); Bourdon & Eissen *et al.*, (2003); Gustcher *et al.*, (1999); White *et al.*, (2003).

Parte de ese desplazamiento se transfiere a la deformación continental cortical de la placa Sudamericana y al Bloque continental Nor-Andino. Calahorrano, (2005), indicó que entre la placa oceánica y el segmento continental existe un canal de subducción que amortigua y no permite la generación de terremotos mayores a 8 grados en Escala de Richter.

Se observa que existen múltiples evidencias del mecanismo de subducción, a lo largo de toda la superficie de la provincia de Santa Elena, como fallas de aproximadamente 17 Km de longitud que presenta un azimut que varía entre N 50° a N 60° y plano subvertical. En el estudio Riesgos geológicos en el Golfo de Guayaquil, realizado por Chunga *et al.*, (2013), se encuentra el catálogo de fallas activas para el interior y segmento continental de las provincias del Guayas y Santa Elena (Anexo B). Se analizaron las más cercanas a la zona de estudio como la F. Prisma, F. Salinas, la F. Anconcito y F. Chanduy.

Para el presente estudio se tomó como referencia la Falla Prisma, (ver Tabla 2.3); con una longitud de 80 Km, que al activarse puede producir sismos de magnitudes mayores a 7, por lo cual se tiene una alta probabilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción. (Ilustración 2.6)

Tabla 2.3: Catálogo de Fallas activas de la zona de estudio.

Id.	Falla capaz	tipo	Longitud de falla (Km)	Prof. falla (Km)	Distancia falla - sitio (Km)	Magnitud estimada desde formulas propuestas por Well & Coppermish, 1994	Bibliografía, referencia citada	PGA Fukushima & Tanaka (1990)
10	F. Salinas	Inferida	16.17	20	120	6.48	Litton 1986	0.23
9	F. Anconcito	Inferida	11.08	20	107	6.29	Litton 1986	0.21
8	F. Chanduy	Normal	22.00	20	96	6.64	Litton 1986	0.25
76	F. Prisma	Inversa	80	12	60	7.29	Chunga 2010	0.42

Fuente: Dr. Chunga Kervin, (2013), *Riesgo en el Golfo de Guayaquil: Revisión de Datos Sismológicos y de Fallas Activas*
 Nota: PGA. Máxima Aceleración de la Roca

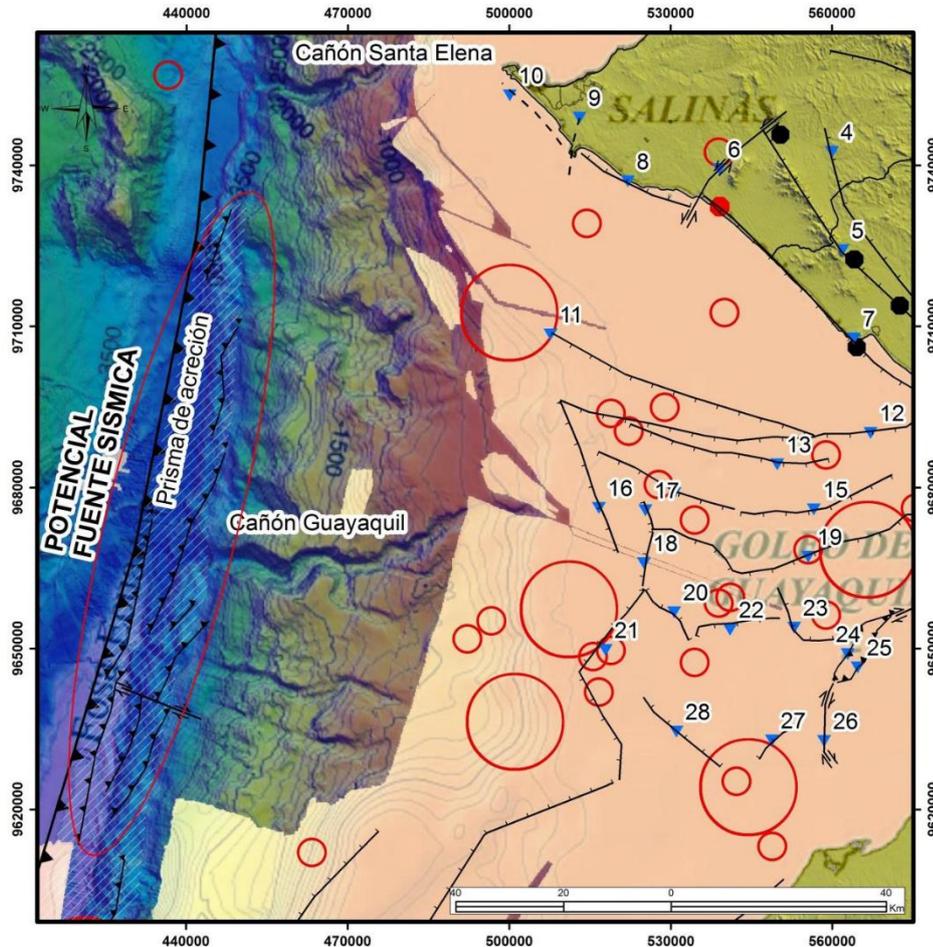


Ilustración 2.6: Ubicación de las Fallas activas de la zona de estudio.

Fuente: Dr. Chunga Kervin, (2013), *Riesgo en el Golfo de Guayaquil: Revisión de Datos Sismológicos y de Fallas Activas*

2.4 SISMOLOGÍA

De acuerdo al Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), el perfil costero del Ecuador se encuentra en una zona considerada como de alto riesgo sísmico.

Las 117 estaciones sísmicas que se encuentran distribuidos en todo el país, registran cada 48 horas movimientos telúricos mayores a 4 grados en la escala de Richter, en partes del territorio continental ecuatoriano y en aguas cercanas. (Ilustración 2.7)

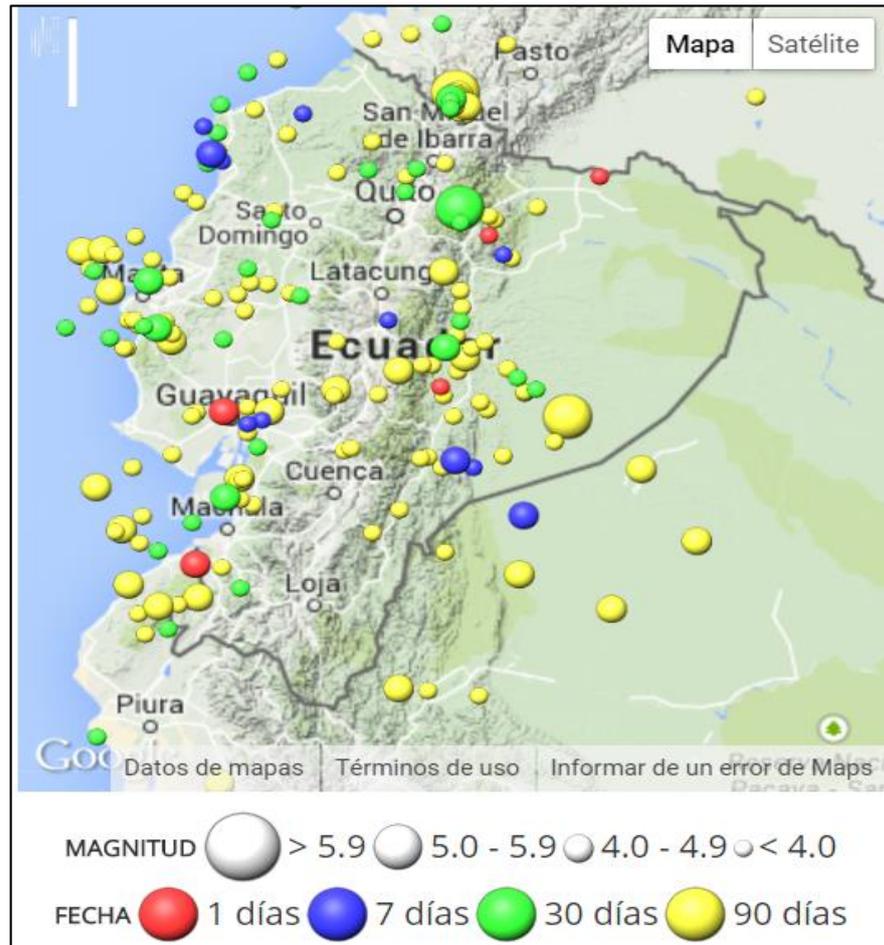


Ilustración 2.7: Mapa de Sismos.

Fuente: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (EPN)

Según el Instituto Geofísico, desde el año 2013 hasta el 2014, se registraron un total de 2871 eventos sísmicos con magnitudes de momento M_w entre 1 y 6.5, de acuerdo a este informe estos movimientos son provocado por las placas tectónicas.

Las Islas Galápagos se encuentran ubicadas a 1200 Km del perfil costero ecuatoriano, pertenecen a una enorme capa de corteza submarina que hace fuerza con la parte continental para penetrarla como cuña hasta 6 cm. cada año, esa es precisamente una de las intensas fuentes de movimientos sísmicos que no solo expone al Ecuador a riesgo de terremotos, sino también a países ubicados entre Chile y Colombia, en la parte sudamericana, así como los del norte del continente.

En la provincia de Santa Elena de acuerdo a los catálogos mencionados, se registraron desde 1901 hasta el año 2011, 208 eventos telúricos con magnitudes de 3,5

hasta 6,9 y en el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), se documentaron 158 sismos de intensidades que van de 4 hasta 5 entre los años de 1946 y 2011.

El parámetro más utilizado para el análisis sísmico es el PGA (Máxima Aceleración en la Roca).

En la Tabla 2.4 se observa que el valor de PGA de cada zona representa la aceleración máxima esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad.

La nueva norma NEC-14 (Norma Ecuatoriana de la Construcción) divide el territorio de Ecuador en seis zonas sísmicas como se observa en la Ilustración 2.8, estableciendo para la franja costera de la península de Santa Elena, valores de PGA mayores a 0.5 g., zona de muy alta sismicidad. (Ver Tabla 2.4)

Tabla 2.4: Zonas sísmicas del Ecuador.

Zona	PGA	Grado
1	≤ 0.15	Muy baja sismicidad
2	$0.15 \text{ g} < \text{PGA} \leq 0.25 \text{ g}$	Baja sismicidad
3	$0.25 \text{ g} < \text{PGA} \leq 0.30 \text{ g}$	Moderada sismicidad
4	$0.30 \text{ g} < \text{PGA} \leq 0.35 \text{ g}$	Moderada a alta sismicidad
5	$0.35 \text{ g} < \text{PGA} \leq 0.40 \text{ g}$	Alta sismicidad
6	$0.40 \text{ g} < \text{PGA} \leq 0.50 \text{ g}$	Muy alta sismicidad

Fuente: NEC-14 (Norma Ecuatoriana de la Construcción).

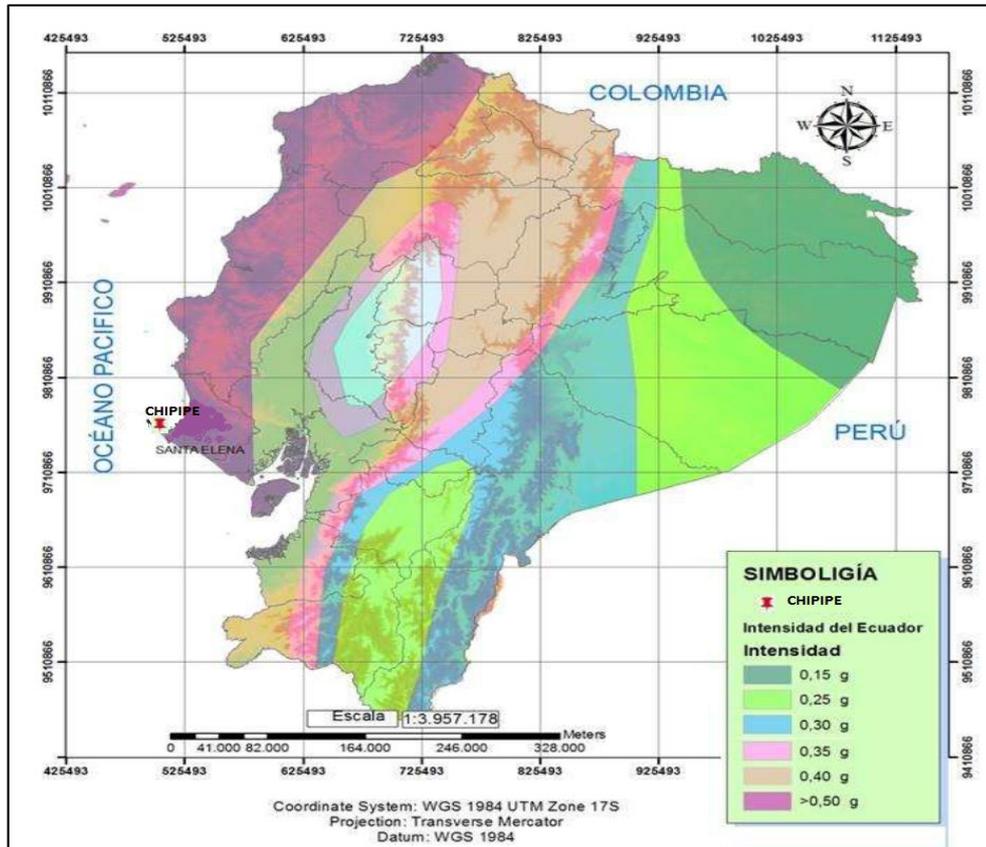


Ilustración 2.8: Mapa de peligro sísmico PGA del Ecuador

Fuente: NEC-14 (Norma Ecuatoriana de la Construcción).

El estudio presentado por Chunga, (2013), analiza las fallas colindantes al área de estudio y la falla Prismática (ver Tabla 2.3), tabulando los valores de PGA y magnitud estimada con relaciones empíricas propuesta por Well & Coppermish en 1994, estableciendo el valor de PGA (Máxima aceleración de la roca) de 0.42 y de la magnitud de momento M_w de 7.29 para nuestra zona de estudio.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 DEFINICIÓN DE LICUEFACCIÓN

Una forma simple de definir la licuefacción, es la transformación de un material en estado sólido a su estado líquido, como consecuencia del incremento de presión de poros. Los desastres más fuertes en edificios e infraestructura durante un terremoto se deben al fenómeno de la licuefacción, que consiste en cambiar de un material firme, a viscoso semi-líquido. La licuefacción ocurre generalmente en suelos arenosos sometidos a cargas cíclicas.

Entre los efectos más comunes de la ocurrencia del fenómeno de licuefacción tenemos:

- Falla de flujo.
- Desplazamiento lateral.
- Oscilaciones horizontales.
- Pérdida de la resistencia del suelo de soporte
- Asentamientos
- Incrementos de la presión lateral sobre muros de contención
- Falla de Cimentaciones Profundas
- Volcanes de arena

3.2 HISTORIA DE LA LICUEFACCIÓN

El término licuefacción habría sido creado por Hazen, (1920), al referirse a la falla de la Presa Calaveras, ocurrida el 24 de marzo de 1918. Esta presa experimentó una falla de talud repentina durante su construcción, sin una aparente perturbación que la activara. De acuerdo a Hazen, se liberaron aproximadamente 730 mil metros cúbicos de material que se deslizaron a través de una distancia de alrededor de 90 metros, Verdugo, (2006).

Años más tarde Terzaghi & Peck, (1948) se refirieron como “licuefacción espontánea” a la transformación repentina de arenas sueltas en un flujo viscoso generado por una ligera perturbación. Éste fenómeno fue considerado como la principal causa de Fallas de talud que tendían a ocurrir en depósitos saturados de arenas limosas finas. Ishihara, (1993).

Youd, (1973), en base a ensayos de laboratorio realizados por Seed & Lee, (1966), caracterizó el fenómeno como la “Transformación del material granular de un estado sólido a un estado licuado por consecuencia del incremento de la presión de poro y la reducción del corte efectivo”.

Un par de años más tarde el profesor Casagrande, (1975) determinó que en realidad existían dos tipos de fenómenos de licuefacción, cuya característica común era el incremento en la presión de poros. Uno estaba relacionado a la pérdida de rigidez, definiendo el término de Movilidad cíclica; y otro vinculado a la pérdida de resistencia, al que denominó Licuación verdadera, este último es conocido actualmente como Licuación de flujo debido a su semejanza a un fluido viscoso.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DEL FENÓMENO DE LICUEFACCIÓN

Este fenómeno es algo complejo y aún no está muy comprendido cómo ocurre, por lo que se tienen diferentes interpretaciones. Sin embargo, una manera simple de describir el proceso es como se detalla a continuación:

- ✓ Un depósito de suelo consiste en un grupo de partículas individuales, cada una de ellas se encuentra en contacto con otras circundantes. Las partículas apoyadas entre sí producen fuerzas de contacto que las mantienen juntas y en su lugar, proporcionando la estabilidad y resistencia del suelo.

- ✓ Si se tiene un grupo de partículas de suelo no cohesivo, suelto y saturado, y se le aplica una carga violenta se genera la ruptura de su estructura. Al

deteriorarse la estructura, las partículas se mueven libremente buscando la manera de formar una estructura más densa.

- ✓ Durante un sismo la aplicación de la carga es rápida y espontánea, no se da tiempo a que la estructura se reacomode ni que expulse el agua contenida en los poros, lo que provoca el incremento en la presión del agua, reduciendo la fricción entre partículas, al grado en que el suelo comienza a ablandarse y perder resistencia.
- ✓ Las fuerzas de contacto entre partículas se vuelven mínimas debido sobre todo a la alta presión del agua. En casos extremos, la presión de agua es tan grande que las partículas se ven separadas y comienzan a moverse libremente, comportándose como un líquido viscoso más que como sólido.
- ✓ Antes de un terremoto, la presión del agua es relativamente baja. Al ocurrir un sismo, la presión del agua puede ser tan grande, como se mencionó y las partículas tengan la libertad de moverse, para posteriormente reacomodarse de manera estable. (Ilustración 3.1)

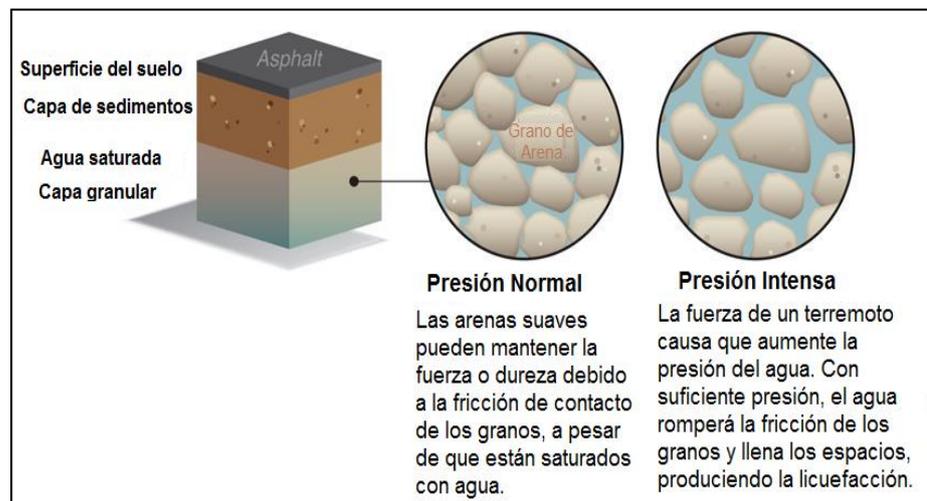


Ilustración 3.1: Figura esquemática del proceso de licuefacción.

Fuente: Nicolás Lara, 2013. *Susceptibilidad de licuefacción en la comuna de Doñihue.*

3.4 SUSCEPTIBILIDAD DE LA LICUEFACCIÓN

3.4.1 Criterios de susceptibilidad.

No todos los suelos tienen la capacidad de presentar el fenómeno de licuefacción, por lo cual hay que establecer ciertos criterios para evaluarlos, Kramer & Stewart, (2004), establecieron ciertos criterios básicos para evaluarlo, estos se presentan a continuación:

- ❖ **Criterios históricos:** Se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuefacción, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad, en un determinado lugar.

- ❖ **Criterios geológicos:** las condiciones geológicas también pueden indicar susceptibilidad de licuefacción, por ejemplo, los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuefacción. También se ha observado licuefacción en depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios. Otro criterio geológico es la edad del depósito; en general, los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles de licuefacción que los depósitos más antiguos.

- ❖ **Criterios basados en el estado del suelo:** el potencial de licuefacción de un suelo también depende de su estado, como los esfuerzos efectivos a los que está sometido y su densidad en el lugar, ya que la tendencia de un terreno a densificarse, bajo condiciones de carga cíclicas, depende de su densidad y de esfuerzos efectivos. Los suelos sueltos son bastante susceptibles a licuarse más que los suelos densos, y para una densidad dada, los suelos bajo altas tensiones de confinamiento efectivas, son más susceptibles que los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas bajas.

- ❖ **Criterios basados en la composición del suelo:** la composición física de un suelo juega un importante papel en la determinación de su susceptibilidad de licuefacción. Las arenas uniformemente graduadas y limpias, compuestas principalmente de partículas redondeadas son específicamente más susceptibles, mientras que los suelos bien graduados y los suelos con partículas angulares son menos susceptibles.

La presencia de finos, particularmente finos plásticos, $IP > 10$, tiende a disminuir la susceptibilidad de licuefacción.

3.4.2 Suelos granulares.

El fenómeno de licuefacción generalmente se asocia con suelos no cohesivos o granulares saturados, como resultado de una carga sísmica de suficiente intensidad y duración. Ocurre más comúnmente en suelos sueltos, saturados, granulares, uniformemente graduados y con un bajo contenido de finos. Aunque las arenas son especialmente susceptibles, la licuefacción también se puede desarrollar en algunos limos y gravas.

Las arenas, mientras más alta sea la densidad, menos propensas a la licuefacción, según Brandes, (2000), para suelos granulares o no cohesivos con una resistencia al sondeo de penetración estándar por profundidad $(N_1)_{60} > 30$, son considerados con una densidad lo suficientemente grande para no presentar riesgo a la licuefacción.

3.4.3 Suelos con presencia de finos.

Históricamente, las arenas han sido consideradas como el único tipo de suelo susceptible de presentar licuefacción, pero la licuefacción también ha sido observada en otros tipos de suelos, Johansson, (2000).

Los suelos con presencia de finos, también, tienen un comportamiento similar a la licuefacción de las arenas, cuando presentan un grado de saturación del 100%, y son sometidas a cargas cíclicas.

3.5 ESTUDIOS PREVIOS PARA EVALUAR EL FENÓMENO DE LICUEFACCIÓN

Las características finales que se utilizarán para evaluar la susceptibilidad dependerán del criterio de cada especialista, pero siempre teniendo en consideración las bases teóricas expuestas en el presente estudio.

3.5.1 Origen del suelo.

Los suelos depositados por procesos fluviales, litorales y eólicos se asientan con facilidad de forma que son más susceptibles a licuarse ya que sus granos no se logran compactar.

Los depósitos sedimentados de procesos glaciales son bastante densos teniendo poca probabilidad de licuarse. Suelos compuestos por roca no son en absoluto licuables.

Falcón y Ramírez, (2012): Establecieron criterios para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción de acuerdo al origen del suelo como se detalla en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Criterios de evaluación de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo al origen del suelo

	Alto (3)	Medio (2)	Bajo (1)	Nulo (0)
	Depósitos no consolidados			Roca
Origen del Suelo	Depósitos sedimentarios litorales actuales. Depósitos fluviales activos Depósitos lacustres y de remoción en masa Rellenos antrópicos (relaves) Depósitos eólicos y deltaicos	Depósitos coluviales y de remociones en masa	Terrazas marinas, fluviales lacustres y de remoción en masa Depósitos glaciofluviales, morrénicos y fluvioglaciales	

Fuente: Falcón y Ramírez, (2012).

3.5.2 Distribución del tamaño de los granos.

La arena uniformemente graduada, de grano muy grueso a medio tiene mayor probabilidad de licuarse, mientras que las arenas limosas finas y las gravas lo hacen bajo cargas cíclicas muy severas.

Berril *et al.*, (1993), establecen los límites licuables para suelos uniformemente graduados, mediante fajas granulométricas. (Ver Ilustración 3.2). Mientras más céntrica se encuentre la curva granulométrica de la muestra de suelo entre las curvas límites, más propensa será a la licuefacción.

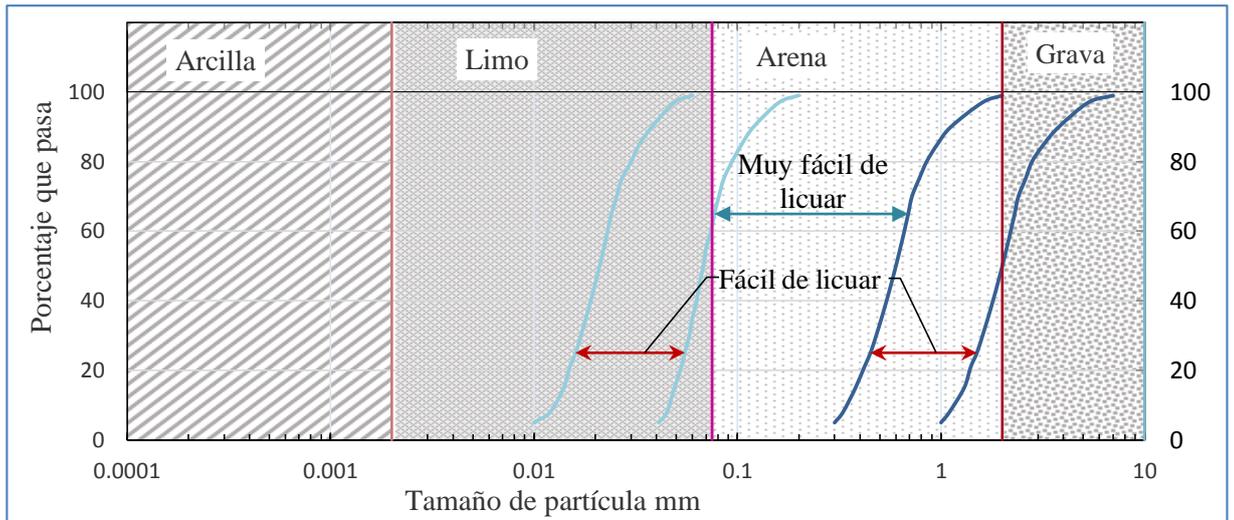


Ilustración 3.2: Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción mediante curvas granulométricas.
Fuente: Díaz, (2006).

Falcón y Ramírez, 2012, establecen los criterios utilizados para la evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción utilizando la granulometría, como se detalla en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Criterios de evaluación de la susceptibilidad de la licuefacción de acuerdo a la granulometría

	Alto (3)	Medio (2)	Bajo (1)	Nulo (0)
	Depósitos no consolidados			Roca
Granulometría o tamaño de partícula	Arenas limpias, finos limosos, arenas con finos o arenas con gravas y finos	Gravas arenosas	Composición variable entre finos limo-arcillosos y arenas con gravas	

Fuente: Falcón y Ramírez, (2012).

3.5.3 Profundidad del nivel freático.

Mientras más cerca de la superficie se encuentre el nivel freático, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.

Tinsley *et al.*, (1985), propone rangos críticos de susceptibilidad a la licuefacción para niveles freáticos de 3, 10 y 15 metros, de profundidad asociándolos al mismo tiempo con la edad de los depósitos, como se puede observar en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Criterio de evaluación de la susceptibilidad de la licuefacción de acuerdo al nivel freático.

Edad del depósito suelo	Nivel freático, en metros.			
	0 -3	3 -10	10 -15	> 15
Holoceno				
Final	Muy alto a Alto	Moderado	Poco	Muy poco
Inicial	Alto	Moderado	Poco	Muy poco
Pleistoceno				
Final	Poco	Poco	Muy poco	Muy poco
Medio e	Muy poco	Muy poco	Muy poco	Muy poco
Inicial	Muy poco	Muy poco	Muy poco	Muy poco
Terciario y Pre-terciario	Muy poco	Muy poco	Muy poco	Muy poco

Fuente: Tinsley *et al.*, (1985).

3.5.4 Edad del depósito

Como se observó en la Tabla 3.3 realizada por Tinsley et al, existe una tendencia de incremento de la resistencia a la licuefacción con la edad del depósito, sin embargo, en caso de presentarse un nivel freático por debajo de los 15 metros, la susceptibilidad a la licuefacción se vuelve muy baja e independiente de la edad del depósito. Lo mismo ocurre para depósitos pre-pleistocenos.

Los terrenos con una edad menor de 3.000 años, están más propensos a licuarse debido a que son frágiles y no cohesivos comparado con aquellos más antiguos donde han actuado procesos de compactación y cementación natural. Dichos procesos incrementan su resistencia.

Falcón y Ramírez, (2012), mencionan a la edad del depósito como factor importante para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción de un suelo, presentan rangos de acuerdo a la edad del depósito del suelo como se demuestra en la Tabla 3.4; siendo esta algo ambigua ya que utilizan un mismo período de tiempo para dos niveles de susceptibilidad para definir un nivel de peligro.

Tabla 3.4: Evaluación de susceptibilidad de licuefacción de acuerdo a la edad del depósito.

	Alto (3)	Medio (2)	Bajo (1)
Edad del depósito	Holoceno - Pleistoceno	Holoceno - Pleistoceno	Pleistoceno - Plioceno

Fuente: Falcón y Ramírez, (2012).

Youd and Perkins, (1978) también se percataron de que este fenómeno también ocurría a escalas geológicas, relacionaron la edad con el tipo de depósito para asignar una susceptibilidad de licuefacción, en términos generales se puede observar un incremento en la resistencia a la licuefacción con la edad independiente de tipo de depósito.

De acuerdo a su estudio realizado determinaron que existe una alta susceptibilidad para depósitos de menos de 500 años; media para depósitos holocenos; baja para depósitos pleistocenos y muy baja para aquellos pre-pleistocenos, como se observa en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Susceptibilidad estimada de licuefacción de distintos tipos de depósitos.

Tipo de depósito	Distribución general de los sedimentos poco cohesivos en depósitos	Probabilidad de que los depósitos poco cohesivos saturados sean susceptibles de licuefacción por edad geológica.			
		< 500 años	Holoceno	Pleistoceno	Pre Pleistoceno
a) Depósitos continentales					
Canal del río	Localización variable	Muy alta	Alta	Baja	Muy Baja
Llanura de inundación	Localización variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Abanico y Llanura aluvial	Extendido	Moderada	Baja	Baja	Muy Baja
Terrazas marinas y llanuras	Extendido	-	Baja	Muy Baja	Muy Baja
Deltas y Deltas abanico	Extendido	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Lacustre y playa	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Coluvial	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Talud	Extendido	Baja	Baja	-	Muy Baja
Dunas	Extendido	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Loes	Variable	Alta	Alta	Alta	-
Till Glaciar	Variable	Baja	Baja	Muy Baja	Muy Baja
Tova	Poco comunes	Baja	Baja	Muy Baja	Muy Baja
Piroclasto	Extendido	Alta	Alta	-	-
Sólidos residuales	Poco comunes	Baja	Baja	Muy Baja	Muy Baja
b) Zona de costa					
Delta	Extendido	Muy Alta	Alta	Baja	Muy Baja
Estuario	Localización variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Playa					
Alta Energía olamotriz	Extendido	Moderada	Baja	Muy Baja	Muy Baja
Baja Energía olamotriz	Extendido	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Sedimentos de lagunas	Localización variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Costa	Localización variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja

Fuente: Youd and Perkins, (1978).

Existen estudios que relacionan el potencial de licuefacción de un suelo solo con su edad, sin embargo muchas veces es necesario vincular a otros factores, tales como el tipo de depósito o la profundidad del nivel freático, esto no significa que un factor dependa de otro, sino simplemente que los rangos de susceptibilidad que se asignan son el resultado de la mezcla de factores.

3.5.5 Amplitud y duración de la vibración del terreno.

Las condiciones de tensión provocadas por un terremoto aumentan la licuefacción del suelo de acuerdo a la magnitud y duración del sismo. Por esta razón, sismos pequeños licuarán únicamente los suelos más próximos al epicentro, mientras que ante un sismo de magnitud mayor será posible reconocer licuefacción a distancias muy grandes. Santucci de Magistris *et al.*, (2013), en base a un registro de más de 201 estudios de casos, sugirieron los siguientes criterios de aceleración para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción que se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Evaluación de susceptibilidad de licuefacción basada en la aceleración.

	Máxima	Medio	Mínima
Aceleración para producir Licuefacción	0.84 g	0.329 g	0.08 g

Fuente: Santucci de Magistris *et al.*, (2013)

Nota: Donde g es la gravedad medida en m/seg²

3.5.6 Profundidad del suelo.

A mayor profundidad la presión de recubrimiento aumenta a medida en que aumenta la tensión entre partículas. Mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad que ocurra licuefacción.

El fenómeno de licuefacción históricamente tiende a ocurrir a profundidades menores a 9 m. y rara vez a profundidades mayores a 15 m., nunca sobrepasando la cota de los 30 m establecida como límite licuable. Sin embargo, se ha comprobado experimentalmente que puede ocurrir a profundidades mayores si se dan las

condiciones apropiadas, tales como movimientos de gran amplitud y duración sobre suelos arenosos saturados, González *et al.*, (2005).

3.6 ENSAYOS DE CAMPO (SPT) Y DE LABORATORIO

3.6.1 Ensayos de campo (SPT). Norma ASTM D- 1586.

El ensayo del SPT (Penetración estándar), es probablemente el más común y conocido de los ensayos de campo, mide la resistencia del suelo a la penetración de un muestreador de tubo partido de 2" (50.8 mm) de diámetro, al ser hincado dentro del suelo en la base de una perforación revestida. Este muestreador, también llamado sacamuestras partido o cuchara normal, es un tubo de acero de paredes gruesas partido longitudinalmente. El extremo inferior está unido a una zapata cortante y el superior a una válvula y cople de conexión a la barra de sondeo. (Ilustración 3.3)

El tubo sacamuestras es introducido a 18" (450 mm) dentro del suelo por impactos del martinete de 63.5 Kg (140 libras) de peso que cae libremente desde una altura de 30" (760 mm). El número de golpes por cada 6" (150 mm) es registrado. Troncoso, (1992).

El número de golpes necesarios para hincar los últimos 300 mm, es decir para introducir el segundo y tercer tramo de 150 mm de penetración se cuenta, este valor es la resistencia a la penetración estándar, es decir que la suma de los dos últimos valores se denomina el valor N. Después de contar los golpes y de registrarlos, la cuchara es sacada de la perforación y la muestra obtenida es colocada cuidadosamente en fundas cerradas impermeables, para efectuar los ensayos respectivos en el laboratorio de suelos, el procedimiento completo de este ensayo se encuentra en la norma ASTM D-1586.



Ilustración 3.3: Perforación realizada en la tesis.

El valor N se ha correlacionado con diversas propiedades de los suelos, como la densidad relativa, la consistencia y la compactación, como se observa en la Tabla 3.7 y 3.8.

Tabla 3.7: Correlaciones entre la densidad relativa y la resistencia a la penetración.

Compactación	Densidad relativa	N (SPT)
Muy suelto	< 0.15	< 4
Suelto	0.15 – 0.35	4 – 10
Medianamente denso	0.35 – 0.65	10 – 30
Denso	0.65 – 0.85	30 – 50
Muy denso	0.85 – 1.00	> 50

Fuente: Hunt, (2005).

Tabla 3.8: Correlaciones entre la consistencia y la resistencia a la penetración

N (SPT)	Consistencia
< 2	Muy blanda
2 - 4	Blanda
4 - 8	Medianamente Compacta
8 - 15	Compacta
15 – 30	Muy Compacta
> 30	Dura

Fuente: Hunt, (2005).

Como se divisa en las tablas cuanto más densa es la arena mayor serán los valores de la resistencia a la penetración (N), así mismo los valores de la consistencia.

3.6.1.1 Valor N (SPT) corregido (N_{60}).

Seed *et al.*, (1985), en diversos estudios demostraron que ensayos del SPT realizados en ese tiempo, debido a pérdidas de energía por fricción y otros factores, desarrollaban una energía del orden del 60% de la teórica. A partir de estos estudios empezaron a utilizarse sistemas automáticos de elevación y caída, con lo que el rendimiento de la energía aumentó, ya que se eliminaban parte de estos factores, pero para los cálculos de correlaciones con otros parámetros geotécnicos, se continúan aplicando las mismas fórmulas desarrolladas que proporciona el 60% de la energía.

Resulta pues evidente, que el valor N resultante debe corregirse por un factor de energía, de manera que se obtenga un valor SPT corregido N_{60} :

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

Donde:

N = Número de penetración medido

η_H = Eficiencia del martillo

η_B = Corrección por el diámetro de la perforación

η_S = Corrección por el tipo de muestreador

η_R = Corrección por longitud de la barra

Los valores de los factores de corrección de la expresión dada se los pueden obtener de diferentes tablas propuestas por varios autores que se detallan a continuación.

3.6.1.1.1 Eficiencia del martillo (η_H).

Este factor de corrección usualmente varía de acuerdo al tipo de martinete y a los procedimientos utilizados en varios países, en la Tabla 3.9, se indican los valores de η_H .

Tabla 3.9: Eficiencia del martillo de acuerdo a varios países.

País	Tipo de martillo	Liberación del martillo	Energía, %	η_H %
Japón	Donut	Caída libre	78	1.3
	Donut	Cuerda y polea	67	1.12
EEUU	Pilcon de seguridad	Cuerda y polea	60	1.00
	Donut	Cuerda y polea	45	0.75
Argentina	Donut	Cuerda y polea	45	0.75
Chile	Donut	Cuerda y polea	45	0.75
China	Donut	Caída libre	60	1.00
	Donut	Cuerda y polea	50	0.83

Fuente: Seed *et al.*, (1985).

El equipo utilizado en el presente estudio tiene las siguientes características: martinete Pilcon de seguridad de cuerda y polea utilizado en EEUU cuyo coeficiente $\eta_H = 1.00$.

3.6.1.1.2 Corrección por el diámetro de la perforación (η_B).

Tabla 3.10: Valor de η_B de acuerdo al diámetro de la perforación.

mm	pulg	η_B %
65 -115	2.4 - 4.7	1
150	6	1.05
200	8	1.15

Fuente: Skempton, (1986).

El valor de η_B igual a 1 porque el diámetro de la perforación es de 3".

3.6.1.1.3 Corrección por el tipo de muestreador (η_s).

Tabla 3.11: Valor de η_s de acuerdo al tipo de muestreador.

Variables de equipo	η_s %
Sampler estándar	1
Sampler sin forro	1.2

Fuente: Skempton, (1986).

El tipo de muestreador utilizado es sampler estándar por lo que el valor e corrección de $\eta_s = 1$.

3.6.1.1.4 Corrección por longitud de la barra perforadora (η_R).

Tabla 3.12: Valor de η_R de acuerdo a la longitud de la barra perforadora.

m	ft	η_R %
>10	>30	1
6-10	20-30	0.95
4-6	12-20	0.85
3-4	10-12	0.75

Fuente: Skempton, (1986).

La longitud de barra es menor a 10 m., por lo tanto el valor de $\eta_R = 0.95$.

3.6.2 Ensayos de laboratorio.

Para obtener los datos geomecánicos necesarios para realizar la investigación en la zona determinada, es necesario realizar ciertos ensayos de laboratorio, cuyos resultados se encuentran en el Anexo E.

3.7 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN

Una vez realizado los estudios previos y determinado el grado de susceptibilidad del suelo a la licuefacción se procede a la evaluación del potencial que tiene un suelo para iniciar la licuefacción, con los diferentes métodos propuesto por varios autores.

3.7.1 Método basado en el número de golpes del ensayo del SPT.

3.7.1.1 Método de Seed & Idriss, (1971, 1982).

El cálculo del potencial de licuación de un suelo, está en función de dos variables: en la demanda sísmica del suelo, expresada en términos de la relación de esfuerzo de corte cíclico (CSR), y en la capacidad del suelo para resistir la licuación, expresada en términos de la relación de resistencia cíclica (CRR).

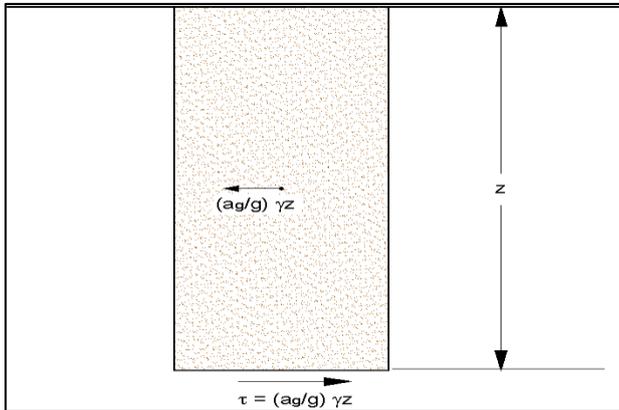
3.7.1.1.1 Relación de esfuerzo de corte cíclico, CSR.

Para conocer la demanda sísmica del suelo se utiliza el enfoque de esfuerzo cíclico, la carga se caracteriza en relación de esfuerzo de corte cíclico CSR o llamado también relación de esfuerzo de corte sísmico SSR, cuando es causado por un terremoto.

La relación de esfuerzo de corte cíclico CSR es el nivel de carga dinámica impuesta por un movimiento sísmico en un suelo, por lo que se debe conocer la amplitud, frecuencia y la duración del movimiento cíclico al que es sometido.

Seed e Idriss (1971), propusieron un simple procedimiento para poder determinar el esfuerzo de corte cíclico, basado en la hipótesis de una propagación vertical de ondas sísmicas de corte, una columna de terreno con altura z . (Ilustración

3-4), se mueve rígidamente en dirección horizontal y por lo tanto el esfuerzo de corte máximo (τ_{max}) a la profundidad z es dado por:



$$\tau_{max} = \frac{a_{max}}{g} \cdot \gamma \cdot z$$

Donde:

a_{max} = Aceleración máxima en superficie

g = gravedad

γ = Peso seco del terreno.

Ilustración 3.4: Esquema de esfuerzo de corte producido por terremoto a una determinada profundidad z .

Fuente: Liquiter, (2010).

Como en la realidad el terreno es deformable, el esfuerzo de corte es menor que en la hipótesis de cuerpo rígido y por lo tanto es necesario introducir un coeficiente de reducción rd .

Normalizando la expresión con la presión vertical efectiva (σ'_{vo}) y la presión vertical total (σ_{vo}) y con referencia a un valor de esfuerzo de corte medio (τ_{av}) en vez del valor máximo.

Se obtiene la relación de esfuerzo de corte cíclico (CSR), mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} rd$$

El método Seed & Idriss (1982) es el más notorio y el método más utilizado; requiere solo el conocimiento de pocos parámetros geotécnicos como la granulometría, el número de golpes en la prueba de campo del SPT, la densidad relativa.

Para determinar el factor del coeficiente de reducción rd , existen diferentes fórmulas basadas en el valor de la profundidad z dada en metros, que es la misma

profundidad que se utiliza para calcular las tensiones verticales total y efectiva. Como la fórmula empírica propuesta por Iwasaki *et al.*, (1978):

$$rd = 1 - 0.015 z$$

Youd *et al.*, (1997), propusieron las siguientes fórmulas de acuerdo a diferentes profundidades de z .

$$rd = 1 - 0.00765 z \quad \text{para } z \leq 9.5$$

$$rd = 1.174 - 0.02670 z \quad \text{para } 9.15 < z \leq 23$$

$$rd = 1.744 - 0.00800 z \quad \text{para } 23 < z \leq 30$$

$$rd = 0.5 \quad \text{para } z > 30$$

Otros autores para facilitar los cálculos numéricos y otras aplicaciones computacionales, recomiendan utilizar la siguiente expresión que permite obtener fácilmente los valores del factor de reducción rd y es consistente con los valores obtenidos en la práctica. Youd *et al.*, (1997).

$$rd = \frac{1 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5}}{1 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.00121z^2}$$

Es importante señalar que, esta ecuación no se ha verificado para profundidades mayores a 15 metros, por lo que se debe tener en cuenta al evaluar a profundidades mayores a la señalada.

3.7.1.1.2 Relación de resistencia cíclica, CRR.

Para conocer la capacidad del suelo para resistir la licuación, se usa el enfoque de la relación de resistencia cíclica (CRR), que está definida como la relación de resistencia en un instante antes que dé inicio la licuefacción.

El valor de CRR es calculada en función de la magnitud, el número de golpes, la presión vertical efectiva y el peso específico del suelo, se calcula inicialmente el número de golpes corregido a la profundidad z deseada mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

N_{60} = Número de golpes del ensayo del SPT corregido por factor de energía del orden del 60%.

C_N = Coeficiente correctivo.

Para el cálculo del valor de C_N , varios autores han deducido ciertas expresiones de acuerdo a estudios realizados:

Expresión deducida por Bazaraa, (1967).

Para $\frac{\sigma'_{vo}}{Pa} \leq 0.75$	Para $\frac{\sigma'_{vo}}{Pa} > 0.75$
$C_N = \frac{4}{1 + 4 \left(\frac{\sigma'_{vo}}{Pa} \right)}$	$C_N = \frac{4}{3.25 + \left(\frac{\sigma'_{vo}}{Pa} \right)}$

Expresión deducida por Peck *et al.*, (1974).

$$C_N = 0.77 \log \left(\frac{20}{\frac{\sigma'_{vo}}{Pa}} \right) \quad \text{para } \frac{\sigma'_{vo}}{Pa} \geq 0.25$$

Expresión deducida por Seed *et al.*, (1975).

$$C_N = 1 - 1.25 \log \left(\frac{\sigma'_{vo}}{Pa} \right)$$

Expresión deducida por Lio & Whitman, (1986)

$$C_N = \left(\frac{Pa}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5}$$

La expresión deducida por Skempton, (1986).

Normalmente consolidados		Sobreconsolidados
Para arenas finas	Para arenas gruesa	Para arena
$C_N = \frac{2}{\left(1 + \frac{\sigma'_{vo}}{Pa}\right)}$	$C_N = \frac{1.7}{\left(2 + \frac{\sigma'_{vo}}{Pa}\right)}$	$C_N = \frac{1.7}{\left(0.7 + \frac{\sigma'_{vo}}{Pa}\right)}$

La expresión deducida por Kayen *et al.*, (1992).

$$C_N = \frac{2.2}{\left(1.2 + \frac{\sigma'_{vo}}{Pa}\right)}$$

Donde:

Pa = Presión atmosférica expresada en la misma unidad de la presión vertical efectiva.

En el Workshop de 1997, se recomienda utilizar la fórmula propuesta Kayen *et al.*, (1992), para el valor de C_N , y además que los valores no deben ser mayores de 2 para depósitos muy superficiales.

Para arenas limpias la relación de resistencia cíclica (CRR), se la puede determinar con la expresión deducida por Thomas Blake:

$$CRR_{7.5} = \frac{a + cx + ex^2 + gx^3}{1 + bx + dx^2 + fx^3 + hx^4}$$

Donde los términos de la ecuación están dados por:

$x = (N_1)_{60}$	$a = 0.048$	$b = -0.1248$
$c = -0.004721$	$d = 0.009578$	$e = -0.0006136$
$f = -0.0003285$	$g = -1.673 \times 10^{-5}$	$h = 3.714 \times 10^{-6}$

Esta ecuación es válida para valores de $(N_1)_{60} < 30$. En estudios posteriores, Robertson y Wride indicaron que esta ecuación no era aplicable para valores $(N_1)_{60} < 3$, por lo que su uso tenía ciertas limitaciones.

Kramer y Stewart (2004), indican y recomiendan que para el cálculo de CRR, en arenas limpias se use la ecuación desarrollada por Youd, (2001):

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

La expresión determinada es válida para para $(N_1)_{60} < 30$.

Para arenas limosas o arcillosas el valor de $(N_1)_{60}$, se debe corregir con la expresión desarrollada por Idriss con la asistencia Seed, para obtener el equivalente de $(N_1)_{60CS}$.

$$(N_1)_{60CS} = \alpha + \beta (N_1)_{60}$$

Donde α y β son coeficientes, que dependen del contenido de finos, y cuyos valores se presentan en la Tabla 3-13.

Tabla 3.13: Valores de α y β b en función del contenido de finos.

Contenido de finos (FC)	α	β
$FC \leq 5 \%$	0	1
$5 \% < FC \leq 35 \%$	$1.76 - \frac{190}{FC^2}$	$0.99 - \frac{FC^{1.5}}{1000}$
$FC > 35 \%$	5.0	1.2

Fuente: Ing. García Jesús, (2007). Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas. Aplicación a Tumaco (Colombia)

La fórmula dada para el cálculo del valor de CRR, es válido para sismo de magnitud $M_w = 7.5$.

3.7.1.1.3 Corrección de escala de magnitud para valores de CSR y CRR.

Como se explicó y determinó en las ecuaciones deducidas anteriormente son para magnitudes $M_w = 7.5$. Para el cálculo de magnitudes distinta es necesario multiplicar por el factor correctivo denominado factor de escala de magnitud (MSF).

Para el valor de CRR tenemos:

$$CRR = CRR_{7.5} \times MSF$$

Y para el valor de CSR:

$$CSR = \frac{CSR_{7.5}}{MSF}$$

Los factores correctivos MSF, fueron obtenidos por varios investigadores en diversos estudios, los cuales recomiendan utilizar los valores que se presentan en la Tabla 3-14.

Tabla 3.14: Factor de escala de magnitud (MSF).

Magnitud	MSF
5.5	2.20 – 2.80
6.0	1.76 – 2.10
6.5	1.44 – 1.60
7.0	1.19 – 1.25
7.5	1.00
8.0	0.84
8.5	0.72

Fuente: Santibáñez Humberto, (2006). *Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar.*

Para aplicaciones computacionales, se puede utilizar valores promedio dentro del rango recomendado, estos valores pueden ser obtenidos para cualquier magnitud usando la siguiente ecuación:

$$MSF = \left(\frac{7.5}{M}\right)^n$$

Donde:

M = Magnitud del sismo.

n = Factor de magnitud.

El valor de n está definido de acuerdo a lo expuesto por Kramer & Stewart, (2004).

n = 2.93	Para M ≤ 7.5
n = 2.56	Para M > 7.5

3.7.1.1.4 Cálculo del potencial de licuefacción

Vallejo L, (2002), indica que a partir de datos experimentales se puede estimar si el suelo es susceptible de licuefacción. Calculando el valor de CSR para un valor $(N_1)_{60}$, en la Ilustración 3.5, se indica si existe o no el peligro a la licuefacción para varias magnitudes.

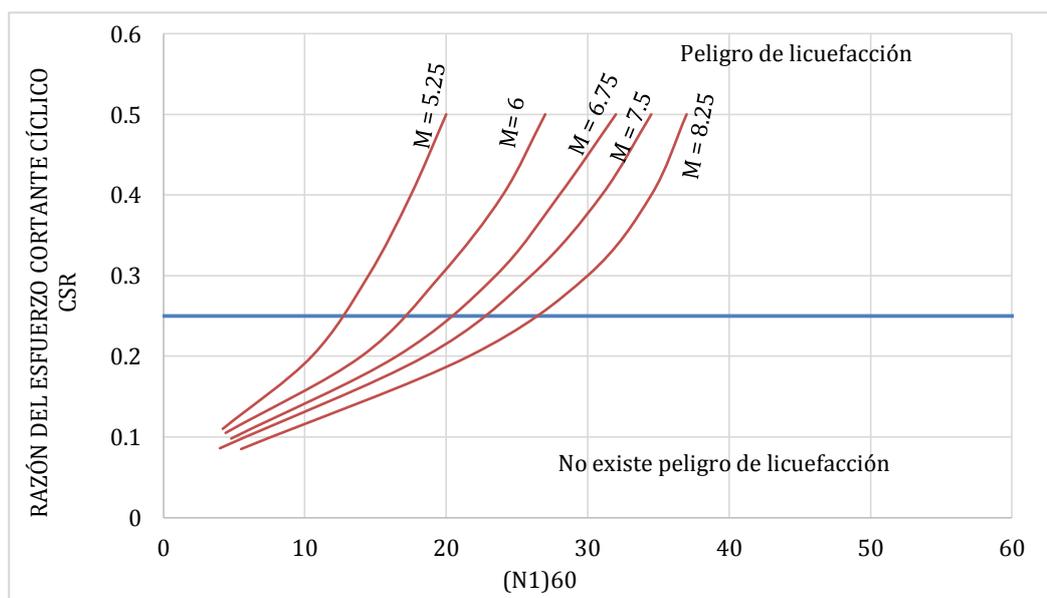


Ilustración 3.5: Gráfica de correlación entre CSR y el $(N_1)_{60}$.

Fuente: Vallejo L, (2002).

Una vez obtenido los valores de la relación de la resistencia cíclica (CRR) y la relación de tensión cíclica (CSR), se puede obtener un factor de seguridad a la licuefacción (F_s) que se la calcula mediante la siguiente expresión:

$$F_s = \frac{CRR}{CSR}$$

En el cual si el factor de seguridad a la licuefacción resulta:

$$F_s < 1$$

Significa que el suelo es propenso al fenómeno de licuefacción, sin embargo, un suelo con un factor de seguridad ligeramente superior a 1, podría licuarse durante un terremoto. En general, se considera seguro un valor del factor de seguridad mayor que 1.3. (Idriss, 2001). El factor de seguridad va aumentado conforme la profundidad, por lo que disminuye la probabilidad a la licuefacción.

La Tabla 3.15, proporciona una guía generalizada acerca de los factores de seguridad mínimos, que se deberán calcular, dependiendo del número de golpes corregido del SPT obtenidos en campo, para arenas limpias.

Tabla 3.15: Factor de seguridad recomendado para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción.

Efectos de la licuefacción	(N₁)₆₀	FS
Asentamientos	≤ 15	1.10
	≥ 30	1.00
Manifestación superficial	≤ 15	1.20
	≥ 30	1.00
Deslizamiento lateral	≤ 15	1.30
	≥ 30	1.00

Fuente: State Mining and Geology Board, (1997, pág. 25).

3.7.2 Métodos basados en las propiedades de la fracción fina del suelo.

3.7.2.1 Método chino de Wang, (1979).

El potencial de licuefacción de suelos con contenido de finos se puede evaluar por el método chino propuesto por Wang, (1979), quien propuso algunos criterios para que estos suelos sean susceptibles a la licuefacción, Kramer & Stewart, (2004):

- Fracción de arcilla (partículas menores de 0.005mm) $\leq 15\%$.
- Límite líquido, $W_L \leq 35\%$
- Contenido de humedad natural $\geq 0.9 W_L$
- Índice de liquidez, $IL \leq 0.75$.

3.7.2.2 Método chino modificado. Finn, (1991 - 1994).

En base a estudios posteriores de Finn, (1991-1994) y a los criterios propuestos por Wang, se adaptó la norma, ignorando el índice de liquidez, surgiendo así la Norma china modificada. El potencial de licuefacción para suelos finos puede ser evaluado tomando como referencia la Ilustración 3.6.

Y de acuerdo a estos criterios, los suelos pueden licuarse si:

- La fracción de arcilla $\leq 15\%$ (usando la definición china de tamaño de arcilla como partículas menores de 0,005 mm)
- El límite líquido, $W_L \leq 35\%$
- Contenido de agua $\geq 0,9 W_L$

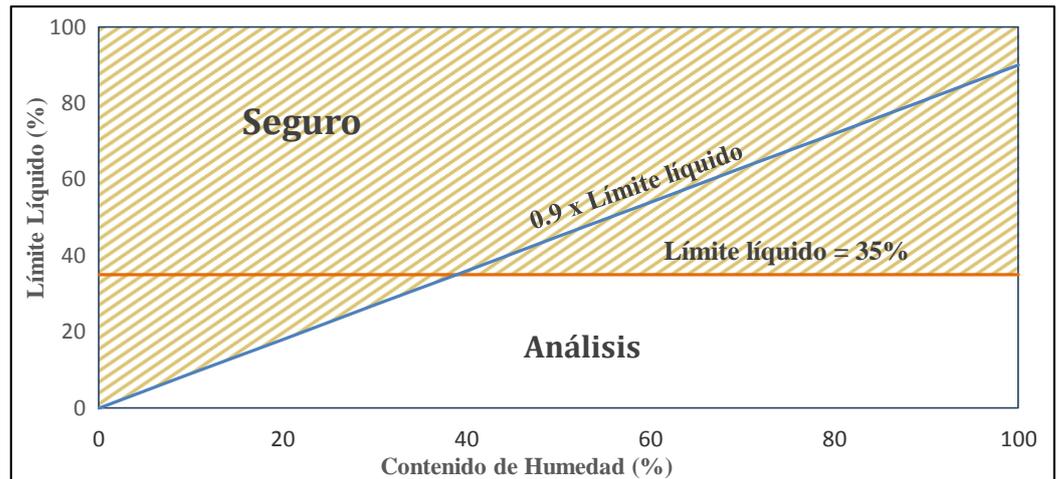


Ilustración 3.6: Norma China modificada para la evaluación de licuefacción de suelos con presencia de finos
Fuente: Carlos Henríquez, (2007). *Mejora de terrenos potencialmente licuable con inyecciones de compactación.*

3.7.2.3 Método chino modificado de acuerdo a las normas ASTM.

Andrews y Martin, en el 2000, propusieron una adaptación a estos criterios para su uso en los Estados Unidos, con una revaluación tomando en cuenta las normas ASTM un gran número de casos de licuefacción en suelos con presencia de finos, los cuales recomiendan:

- Fracción de arcilla (partículas menores de 0.002 mm) < 10%
- Límite líquido, $W_L < 32\%$

son considerados susceptibles a la licuefacción; mientras que los suelos con:

- Límite líquido, $W_L \geq 32\%$

son considerados poco susceptibles de presentar el fenómeno de licuefacción.
(Ver Tabla 3.16)

Tabla 3.16: Criterio Andrews – Martin para la evaluación de licuefacción de suelos con presencia de finos

	Límite Líquido < 32	Límite Líquido ≥ 32
Fracción de arcilla < 10	Susceptible	Puede ser susceptible (requiere información adicional)
Fracción de arcilla ≥ 10	Puede ser susceptible (requiere información adicional)	No susceptible

Fuente: Carlos Henríquez, (2007). *Mejora de terrenos potencialmente licuable con inyecciones de compactación.*

3.7.2.4 Método de Seed & Cetin et al., (2003).

Este método es aplicable en los siguientes casos:

- La fracción de finos ≥ 20 % con un índice plástico > 12%
- La fracción de finos ≥ 35% con un índice plástico < 12%

En la Ilustración 3.7 se presenta una gráfica que muestra las conclusiones de los estudios realizados por Seed & Cetin et al, sobre el potencial de licuefacción de suelos con un contenido de finos importantes.

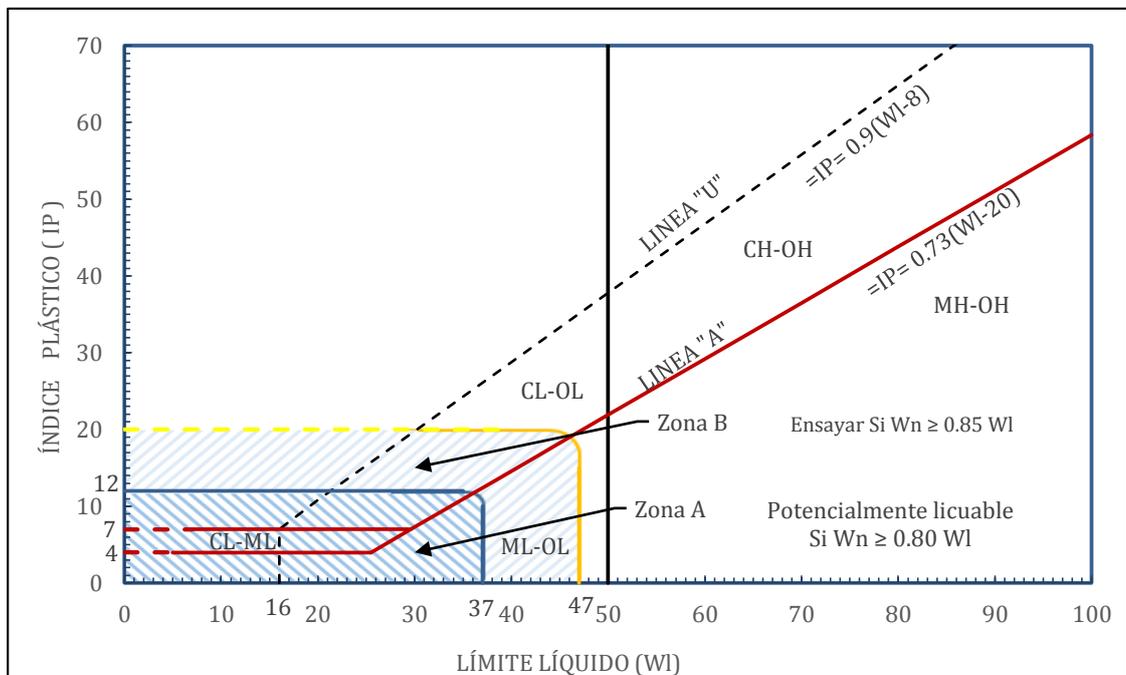


Ilustración 3.7: Gráfica del Método de Seed & Cetin et al., (2003).

Fuente: Carlos Henríquez, (2007). *Mejora de terrenos potencialmente licuales con inyecciones de compactación.*

Los suelos que estén dentro de la zona A de la gráfica, son considerados susceptibles a la licuefacción, siempre y cuando la humedad sea: $W_n > 0.80W_l$. Los suelos dentro de la zona B caen dentro de un rango de transición entre la zona potencialmente licuable y la no licuable, debido a ella deben realizarse ensayos sobre muestras inalteradas. Experimentalmente se ha demostrado que los suelos situados en esta zona, han sido susceptibles a la licuefacción cuando la humedad $W_n > 0.85W_l$.

Hay que tomar en cuenta que con estos métodos solo se evalúa la susceptibilidad de un determinado suelo a la licuefacción en función de su contenido de finos, no tomando en cuenta otros aspectos; por lo que debe utilizarse como complementos de otros métodos que se basen en más características mecánicas del suelo.

3.7.2.5 Propuesta de norma francesa. Durville et al. (1985)

Según la propuesta de norma francesa los terrenos susceptibles a la licuefacción son:

- Terrenos arenosos y limosos con las siguientes propiedades:

Tabla 3.17: Criterios de la norma francesa para suelos arenosos limosos.

Grado de saturación	$S = 100\%$
Coefficiente de uniformidad	$C_u = D_{60}/D_{10} < 15$
Diámetro al 50%	$0,05 < D_{50} < 1,5 \text{ mm}$

Fuente: Liquiter, (2010).

- Terrenos arenosos con fracción arcillosa caracterizada por:

Tabla 3.18: Criterios de la norma francesa para suelos arenosos con fracción de arcilla.

Diámetro al 15%	$D_{15} > 0.05 \text{ mm}$
Límite líquido	$W_l < 35\%$
Contenido de agua natural	$W_n > 0,9 W_l$
Punto representativo sobre la carta de plasticidad de Casagrande por debajo de la línea A	$IP < 10.95$ $W_l < 35 \%$

Fuente: Liquiter, (2010).

3.8 MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS SUSCEPTIBLES A LA LICUEFACCIÓN

Las medidas de mitigación y las técnicas de estabilización, son soluciones eficientes que tienen como objetivo permitir que determinadas obras puedan mantenerse operativas, a pesar de los efectos que les pueda causar el fenómeno de licuefacción. La aplicación adecuada de estos métodos varía de acuerdo al tipo de estructura.

3.8.1 Métodos orientados a nuevas infraestructuras.

3.8.1.1 Mejoramiento del suelo.

Las técnicas de mejoramiento del suelo evitan que se produzcan grandes incrementos en la presión de poros durante el terremoto, reduciendo así los riesgos de licuefacción. Esto se puede lograr por medio de la densificación del suelo o mejorando su capacidad de drenaje. Las técnicas más comunes se indican a continuación. Johansson, (2000).

3.8.1.1.1 Vibroflotación.

La vibroflotación es una técnica que consiste en que un tubo es introducido al terreno granular por vibración horizontal a profundidades mayores de 30m. La vibración aumenta la densidad del suelo puesto que ocurre un reacomodo de los granos del mismo. Para que este método pueda tratar toda la masa de suelo licuable es necesario realizarla por puntos que generen un radio de acción cubriéndolos de tal manera que formen una malla triangular. (Ilustración 3.8 y 3.9)

El proceso se realiza con una grúa de la que pende un tubo de aproximadamente 30 a 40 cm de diámetro en el cual se coloca en la parte inferior un vibrador compuesto

por un motor excéntrico que rota a altas revoluciones por minuto (rpm), funcionando de forma eléctrica o hidráulicamente.

Con este procedimiento se alcanzan amplitudes de vibración desde 5 a 40 mm y frecuencias de 1800 a 3000 rpm, se lo puede reforzar con aletas en la punta y la inyección de agua con alto caudal, hasta 30 litros/segundo y presión máxima de 10 bares (102 mca).

El proceso de ejecución es de la siguiente manera:

1. Hince del vibrador hasta la profundidad máxima del tratamiento.
2. Compactación por retiro en etapas del vibrador.
3. Relleno con material de aporte (puede ser el mismo del sitio tratado o externo).
4. Repetición de las tareas 1 a 3 en todos los puntos de la malla seleccionada
5. Compactación superficial sobre todo el terreno tratado.

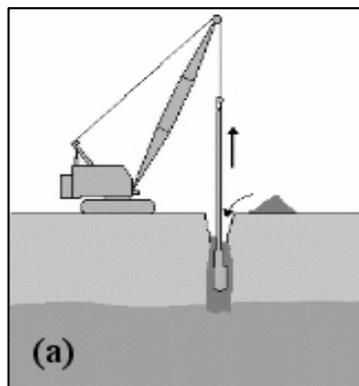


Ilustración 3.9: Equipo de vibroflotación.
Fuente: Henríquez, (2007).

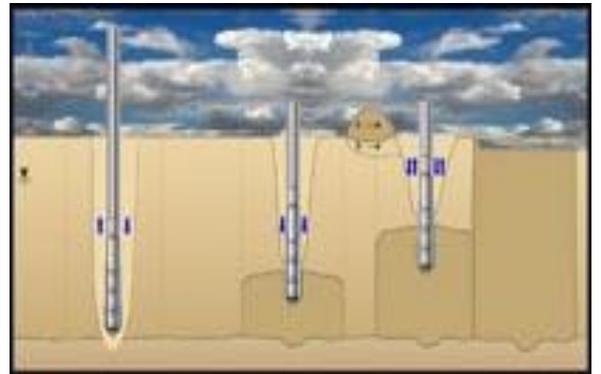


Ilustración 3.8: Esquema de ejecución de la vibroflotación.
Fuente: Vibroflotan International INC, C.A., (2011).

3.8.1.1.2 Vibrosustitución.

Para terrenos compuestos por suelos cohesivos, arcillas, y en menor medida los limos, o suelos con un contenido de finos superior al 15%, no es posible compactar por vibración, de tal forma que, recomienda trabajar aplicando la sustitución. (Ilustración 3.10)

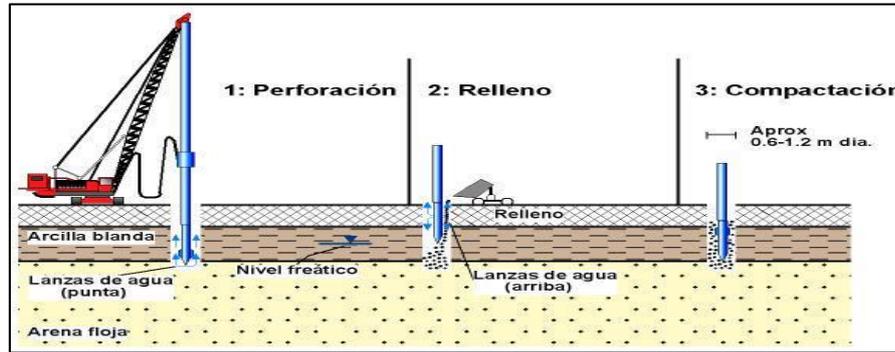


Ilustración 3.10: Fases de la vibrosustitución.
Fuente: Greenwood & Thomson, (1984).

En este caso para llegar a la profundidad máxima del terreno licuable se utiliza la vibración con inyección, colocando un material de aporte que consiste en gravas de diámetros entre 2 a 80 mm.

El procedimiento de esta técnica corresponde:

1. extracción del material incompetente
2. colocación de la grava de forma descendente
3. compactación con el vibrador de tal forma que la grava se inserte en el terreno cohesivo, formando columnas de gravas de alta resistencia al corte.

Este método es utilizado en arenas finas limosas con alto potencial de licuefacción, obteniendo muy buenos resultados como: el aumento de la resistencia al corte y la disipación de la presión de poros por incluir las columnas de gravas.

3.8.1.1.3 Compactación dinámica.

La compactación dinámica se realiza dejando caer una pesada bola de acero de 2 a 200 toneladas, desde alturas que van de 10 a 36 metros, en un patrón cuadrulado. Este método provee de una solución económica de mejoramiento de suelo para reducir el riesgo de licuefacción. (Ilustración 3.11)



Ilustración 3.11: Compactación dinámica.
Fuente: Menard.

La licuefacción local se inicia bajo el punto de caída, permitiendo la densificación del suelo y cuando el aumento de la presión de poros producido por la compactación dinámica se disipa, se produce la densificación adicional. Sin embargo este procedimiento es bastante invasivo, por lo que la superficie del terreno puede requerir de una posterior compactación superficial y de adición de más material, después de la compactación dinámica.

3.8.1.1.4 Reemplazo

Este método consiste en la excavación del estrato susceptible a la licuefacción reemplazándolo por un material competente. Se recomienda este tratamiento para áreas pequeñas, en depósitos de poco espesor y cerca de la superficie. (Ilustración 3.12)

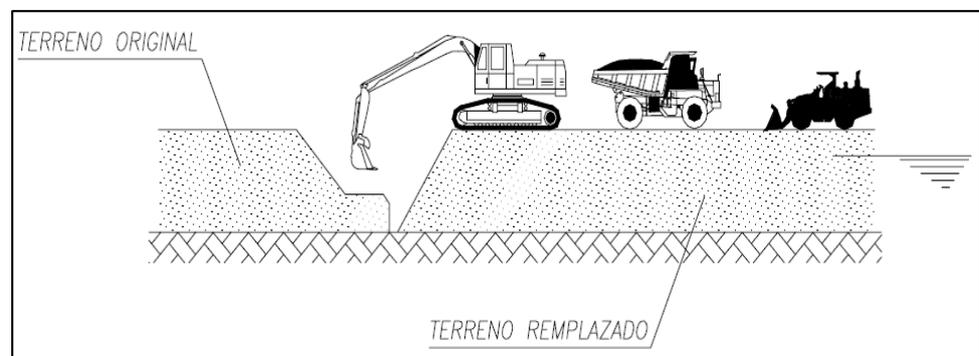


Ilustración 3.12: Método de remplazo de suelo.
Fuente: Henríquez Carlos. (2007). *Mejora de terrenos potencialmente licuables*.

3.8.1.2 Técnicas de drenaje.

Otra técnica para evitar el fenómeno de licuefacción, se da por medio de la disipación de la presión de poros de una forma rápida, colocando drenes en el sitio que es susceptible a la licuefacción; esto ayuda a que el agua encuentre una forma de transporte rápida a la del incremento de la presión de poros. Estos drenes pueden ser: drenes verticales de grava o drenes prefabricados. (Ilustración 3.13)

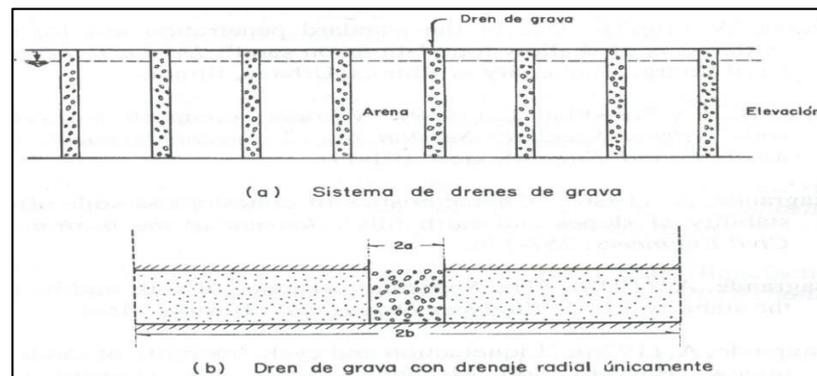


Ilustración 3.13: Sistema de drenes verticales de grava.

Fuente: Díaz. (2006).

3.8.1.3 Cimentaciones profundas.

Las cimentaciones profundas nos sirven para transmitir las cargas de la estructura por debajo del suelo susceptible a la licuefacción, hasta llegar a un estrato firme, también sirven para poder resistir cargas horizontales y momentos flectores inducidos por el sismo; la cimentación profunda se puede realizar por medio de pilotes, estos pueden ser de acero, hormigón prefabricados, entre otros. (Ilustración 3.14)

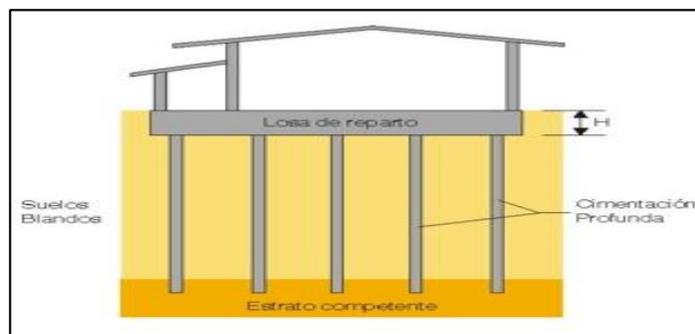


Ilustración 3.14: Cimentación profunda.

Fuente: Martí Salvador. (2013). *Tratamiento del terreno: una visión más allá de las técnicas de cimentación tradicionales.*

3.8.2 Métodos orientados a infraestructuras existentes.

3.8.2.1 Recalce con micropilotes.

Los micropilotes son técnicas de recalce que ayudan a transmitir las cargas de una estructura a estratos de mayor profundidad no susceptibles a la licuefacción mejorando la funcionalidad del mismo. (Ilustración 3.15)

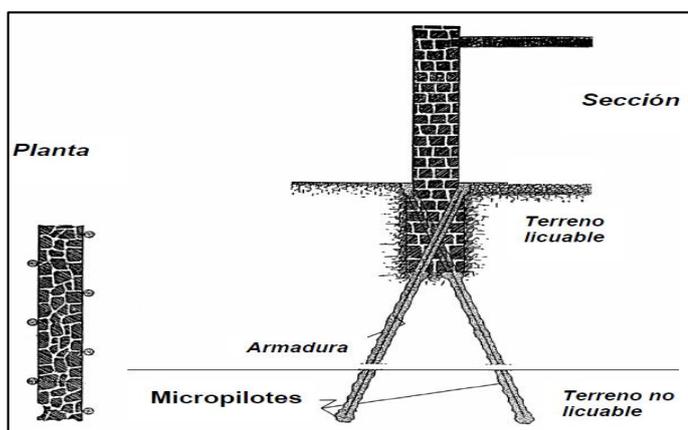


Ilustración 3.15: Recalce con micropilotes.

Fuente: Henríquez Carlos. (2007). *Mejora de terrenos potencialmente licuables*.

3.8.2.2 Jet Grouting.

Esta técnica utiliza columnas cilíndricas falsas de suelo-cemento, que se formaron con la desintegración del terreno a altas energías y mezclándola con la lechada de cemento. Aunque estas columnas vienen en ocasiones reforzadas por armaduras de acero situadas en su eje, lo habitual es que estén compuestas únicamente por la mezcla del suelo desintegrado y la lechada de cemento. (Ilustración 3.16)

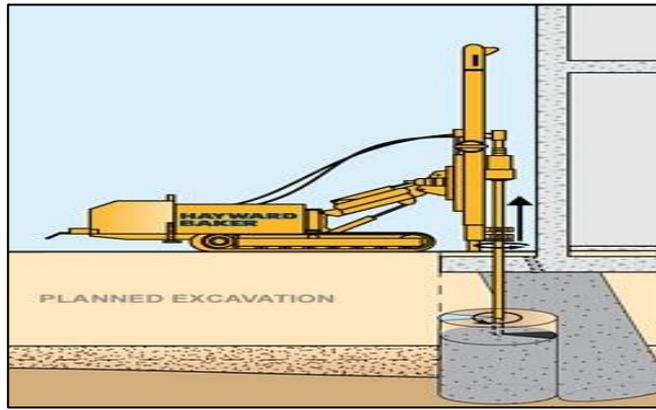


Ilustración 3.16: Jet Grouting.
Fuente: Hayward Bake Geotechnical.

3.8.2.3 Inyección de compactación

Esta técnica es aplicable a terrenos granulares que son susceptibles a la licuefacción, la cual, no se recomienda para suelos arcillosos saturados ni limos. El proceso consiste en inyectar al estrato licuable un mortero seco de baja trabajabilidad que se expande de forma homogénea de tal forma que ayuda a compactar y desplazar el suelo periférico.

Para obras existentes este método es el más adecuado ya que ayuda a mitigar fenómeno de la licuación. (Ilustración 3.17)

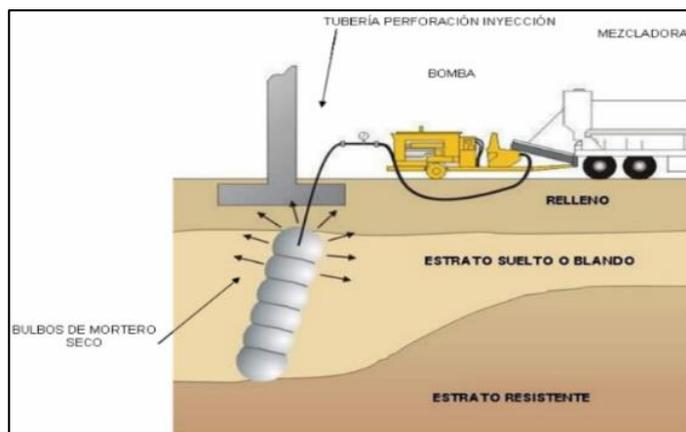


Ilustración 3.17: Inyección de compactación.
Fuente: Henríquez Carlos. (2007). Mejora de terrenos potencialmente licuables.

4 RESULTADOS GEOTÉCNICOS DE LOS SUELOS DE LA ZONA DE CHIPIPE

Antes de aplicar los métodos para evaluar el potencial de licuefacción y establecer las zonas susceptibles a la licuefacción, fue necesario recopilar la información que se requiere para el análisis respectivo, por lo que se obtuvo diferentes estudios de suelos en el área de Chipipe y zonas aledañas.

4.1 ESTUDIOS DE SUELOS RECOPIADOS EN LA ZONA DE CHIPIPE

Para poder caracterizar las posibles zonas de riesgo del fenómeno de licuación se analizó los estudios recopilados observando la similitud en las características del suelo. Para ello se utilizó la información que se encontraba en cada uno de los estudios recopilados, con la información necesaria como: nivel freático, ensayo de campo (Penetración Estándar) y de laboratorio. Con esos parámetros se obtuvo los perfiles estratigráficos que se observan en el Anexo F, los cuales son base para la respectiva evaluación. A continuación se muestra la división de los perfiles estratigráficos de los diferentes sondeos con su respectiva nomenclatura en cada uno de los estudios obtenidos.

Estudio recopilado	Perforación
Edificio Punta Pacífico	PT-1
	PT-2
	PT-3
	PT-4
Edificio Marenostrum	PT-5
	PT-6
Aeropuerto Gral. Ulpiano Páez de Salinas	PT-7
	PT-8
	PT-9
	PT-10
	PT-11

4.2 PERFIL ESTRATIGRÁFICO CON SUS ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS EN EL ESTUDIO

Para la presente investigación se tomó en cuenta la necesidad de realizar tres perforaciones en las que se obtuvieron muestras alteradas con el ensayo de penetración estándar (SPT) a cada metro de profundidad llegando a un total de 8m, las mismas que fueron protegidas para prevenir la pérdida de humedad, etiquetadas y trasladadas al laboratorio según la norma ASTM 4220 para realizar los ensayos respectivos.

Los resultados de las perforaciones de percusión y lavado se presentan en los perfiles estratigráficos que se muestran en el Anexo F, los cuales se dividieron de la siguiente forma:

Estudio	Perforación
Solar “Biblioteca Municipal”	PT-12
Solar “Aledaña a la Base Área”	PT-13
Condominio Vela Beach	PT-14

5 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN LA ZONA DE CHIPIPE DEL CANTÓN SALINAS

5.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

Mediante la exploración del subsuelo se pretende identificar las características que se encuentran bajo la superficie del mismo; para ello se utilizaron diferentes parámetros para su mejor análisis, así como también ensayos de campo y de laboratorio. En este capítulo se hace una descripción de estos parámetros con la finalidad de identificar estratos de suelos con posibilidad de riesgo de licuefacción.

5.1.1 Origen de los suelos de la zona de Chipipe.

Los suelos de la zona de Chipipe de acuerdo a los estudios analizados se caracterizan por ser depósitos aluviales, que están relacionados con los depósitos coluviales caracterizados por constituir una depositación de conglomerados, arenas, limos y arcillas de baja densidades dispuestas en terrazas y de acuerdo a la tabla realizada por Falcón y Ramírez, (2012), da un rango de medio a baja ocurrencia del fenómeno de licuefacción. (Ver Tabla 5.1)

Tabla 5.1: Evaluación de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo al origen del suelo

Origen del suelo de Chipipe	Rangos de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo al origen del suelo según Falcón y Ramírez	
Aluviales constituidos por depositaciones de conglomerados, arenas, limos y arcillas de baja densidades dispuestas en terrazas	Medio (2)	Bajo (1)

Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

5.1.2 Distribución granulométrica.

La distribución granulométrica de los suelos presentes en la zona de Chipipe se obtuvo de los ensayos de laboratorio y de la información recopilada de anteriores estudios de suelos que contienen la estratigrafía y características mecánicas de diversos sitios pertenecientes a la zona en estudio.

Para su análisis se basó en la tabla de Falcón y Ramírez, que establece algunos criterios para su mejor entendimiento, así como la gráfica realizada por Berril *et al.*, (1993), que establecen los límites licuables para suelos uniformemente graduados, mediante fajas granulométricas. Los datos de las curvas granulométricas se encuentran en el Anexo D.

En la zona de Chipipe de acuerdo a la información analizada se encontraron varios tipos de suelos como arenas, arenas limosas y limos, que de acuerdo a la tabla de Falcón y Ramírez, tienen un valor alto de posible licuefacción. (Ver Tabla 5.2)

Tabla 5.2: Evaluación de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo a la granulometría

Granulometría de los suelos de Chipipe	Rangos de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo a la granulometría del suelo según Falcón y Ramírez
Arenas limpias, finos limosos, arenas con finos o arenas con gravas y finos	Alto (3)

Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Se analizó la gráfica realizada por Berril *et al.*, con las curvas granulométricas del estudio de suelo del edificio Punta Pacífico (Ilustración 5.1), las cuales se encuentran en mayor porcentaje en la parte céntrica de las fajas patrón, clasificando a los suelos como muy fáciles de licuar.

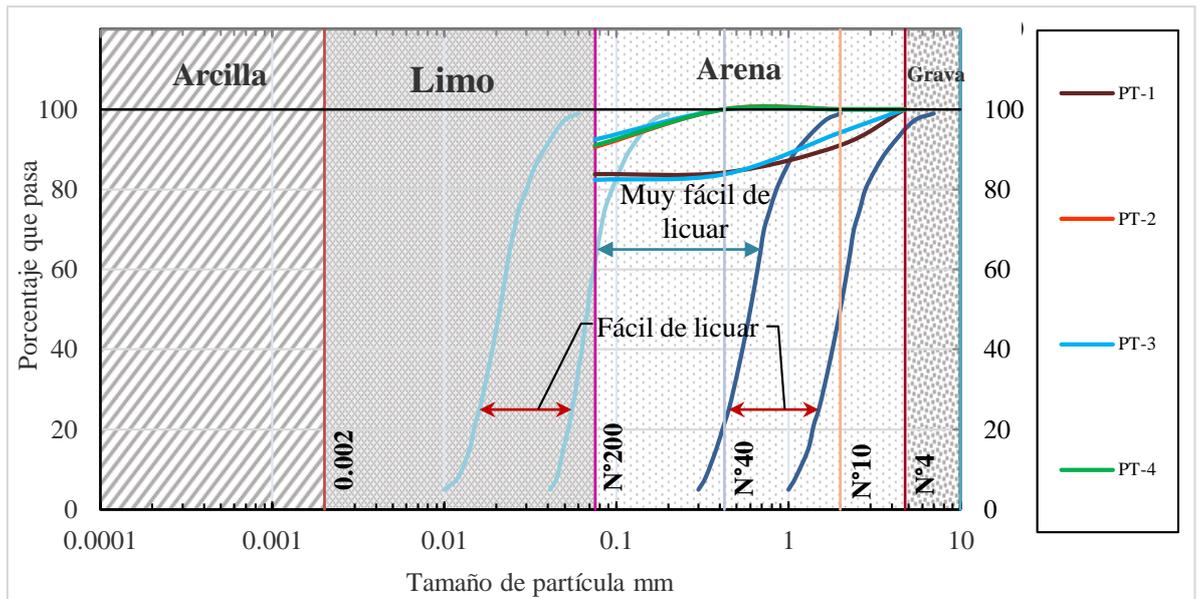


Ilustración 5.1: Evaluación de las curvas granulométricas del estudio de suelo del edificio Punta Pacifico
Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Se puede observar en las curvas granulométricas del estudio de suelo del edificio Marenostrom (Ilustración 5.2), que un alto porcentaje se encuentra en la parte céntrica de las fajas granulométricas, lo que nos indica que el suelo evaluado es muy fácil de licuar.

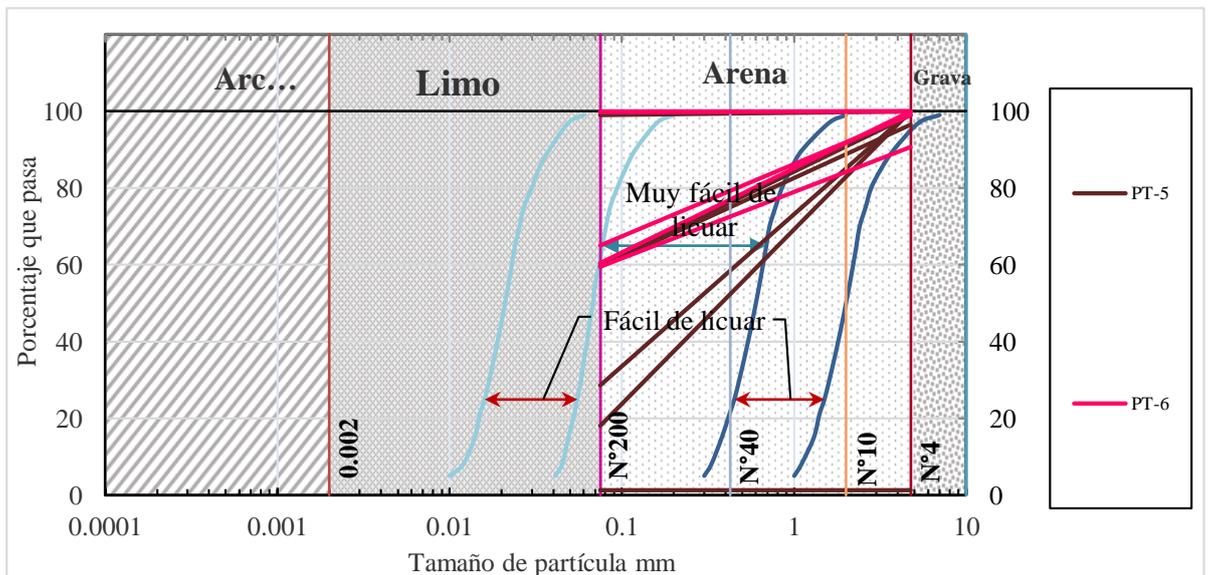


Ilustración 5.2: Evaluación de las curvas granulométricas del estudio de suelo del edificio Marenostrom.
Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

En el caso del estudio de suelo del aeropuerto Ulpiano Páez de Salinas (Ilustración 5.3), las curvas granulométricas se encuentran en la parte céntrica de las

fajas patrón, lo que nos indica que el suelo es muy fácil de licuar, sin embargo hay que mencionar que no se obtuvo la información completa de los parámetros geomecánicos, por lo que para corroborar que el suelo es licuable se deberán obtener los parámetros geomecánicos faltantes.

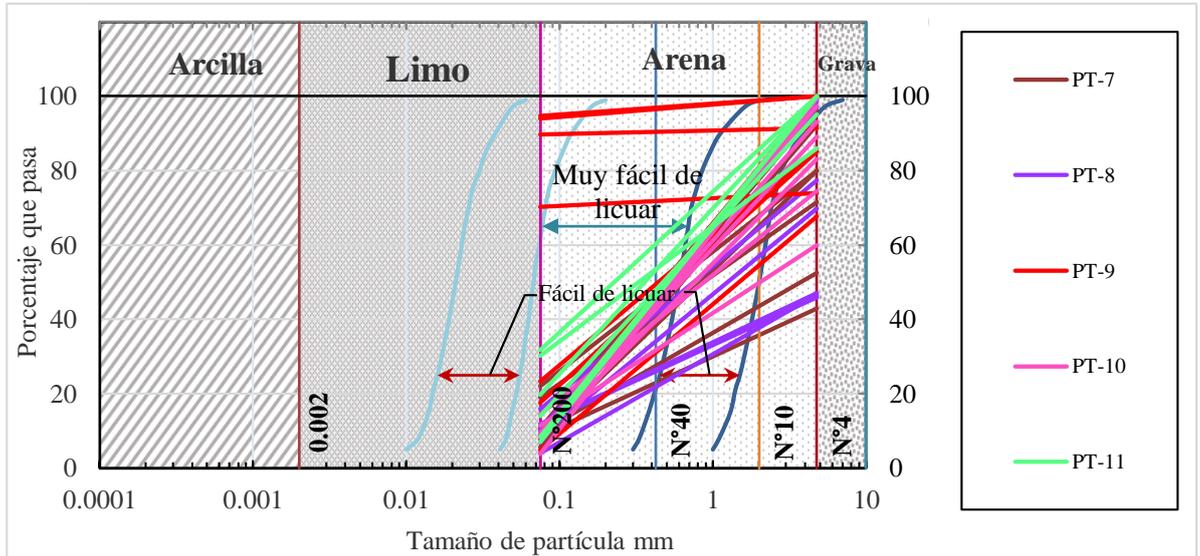


Ilustración 5.3: Evaluación de las curvas granulométricas del estudio de suelo aeropuerto Ulpiano Páez. Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

De las curvas granulométricas de la perforación realizada en el solar de la biblioteca municipal (Ilustración 5.4), se observó que en su mayoría se encuentran en la parte céntrica de las fajas patrón, por lo que se considera que es un suelo muy fácil de licuar, estos resultados se analizarán más a fondo en los capítulos siguientes.

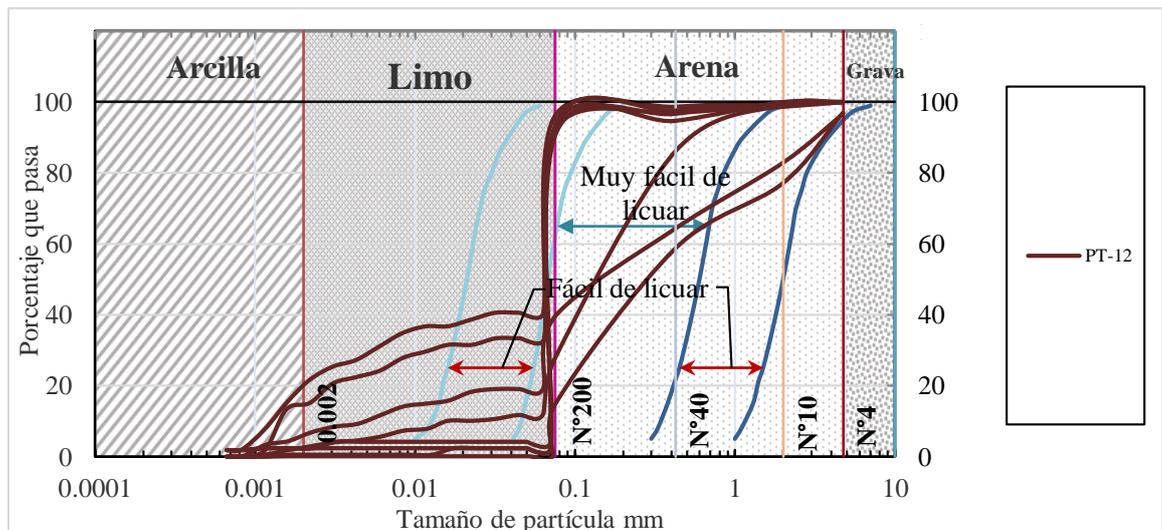


Ilustración 5.4: Evaluación de las curvas granulométricas de sondeo realizado en Biblioteca municipal. Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

En la perforación realizada cerca a la base aérea FAE (Ilustración 5.5), las curvas granulométricas se encuentran en la parte céntrica de las fajas patrón, por lo que se considera que es un suelo muy fácil de licuar, estos resultados se analizarán más a fondo en los capítulos siguientes.

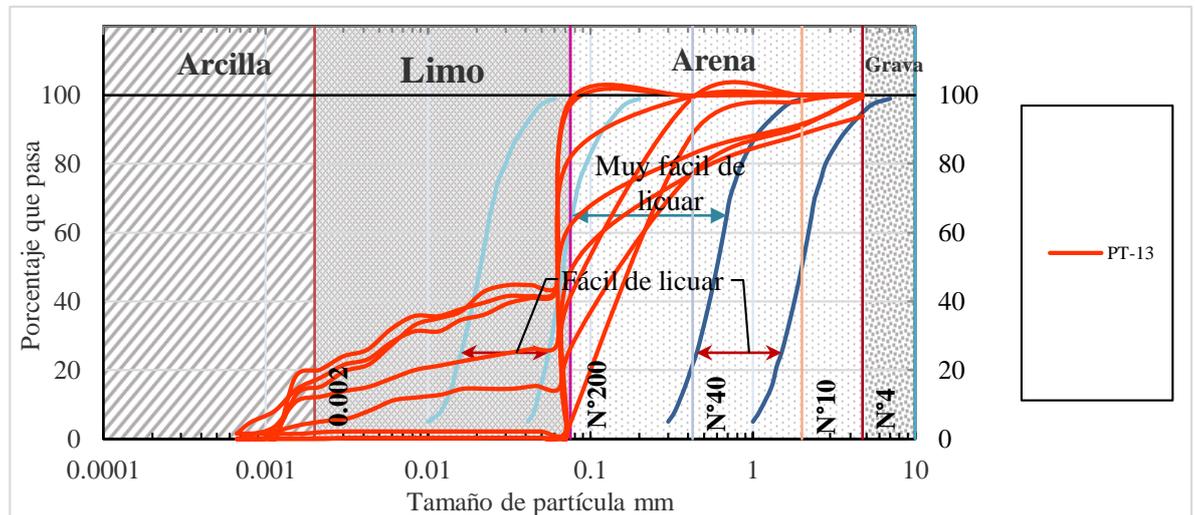


Ilustración 5.5: Evaluación de las curvas granulométricas de sondeo realizado cerca a base aérea FAE
Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Como se observa en la ilustración 5-6, las curvas granulométricas del estudio de suelo del condominio Vela Beach, se encuentran en la parte céntrica de las fajas patrón, por lo que nos indica que el suelo es muy fácil de licuar, sin embargo su estructura geológica nos garantiza que es un suelo sin problemas de licuefacción, ya que se encontró una roca blanda de la formación Cayo, dándonos en el ensayo de SPT numero de golpes mayores a 50.

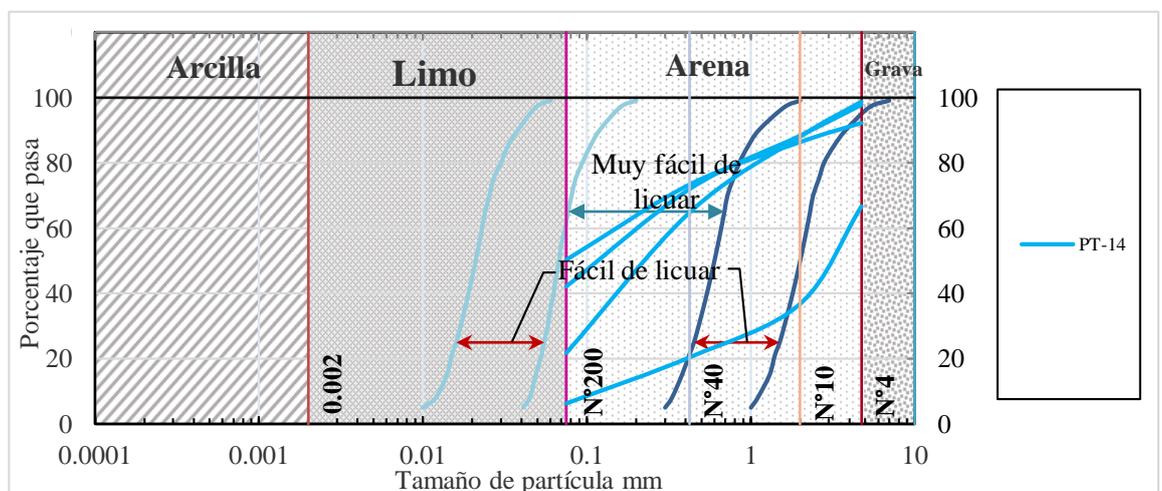


Ilustración 5.6: Evaluación de las curvas granulométricas del estudio de suelo del condominio Vela Beach.
Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

5.1.3 Edad de los depósitos en la zona de Chipipe

El estudio realizado por Tinsley *et al.*, (1985), es el que mejor se adapta para este tipo de análisis; sin embargo, es necesario obtener las edades de los depósitos lo más precisas posible, limitándose para nuestra evaluación, por lo que se tiene un estimado de los periodos de tiempo de los depósitos de la zona de estudio.

La investigación de Falcón & Ramírez, se encuentra algo ambigua ya que utilizan un mismo período de tiempo en dos niveles de susceptibilidad para definir un nivel de peligro, es por eso que finalmente para este análisis se ha utilizado el estudio propuesto por Youd & Perkins, 1978.

De acuerdo a la información geológica obtenida en la zona de Chipipe se determinó que la edad de los depósitos se encuentra en los periodos entre el pleistoceno y holoceno y de acuerdo a la clasificación de Youd & Perkins se la considera con un rango de moderado a bajo su riesgo de licuefacción. (Ver Tabla 5.3)

Tabla 5.3: Evaluación de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo a la edad del suelo

Período	Rangos de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo a la edad del suelo según Youd & Perkins	
Pleistoceno	Moderado	Bajo
Holoceno		

Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

5.1.4 Profundidad del nivel freático.

El nivel freático es un factor importante a considerar al momento de evaluar la susceptibilidad a la licuefacción, ya que el fenómeno sólo ocurre en un ambiente saturado. Durante la realización del presente estudio, se recopilaron datos de los niveles freáticos en base a sondeos realizados en varios sitios de la zona.

Realizando el respectivo análisis se observó que el nivel freático de la zona estudio se encuentra en un rango de 1.50 a 3.50 m de profundidad, de acuerdo a la tabla realizada por Tinsley *et al.*, lo clasifican con un riesgo de licuefacción de muy alto a moderado. (Ver Tabla 5.4)

Tabla 5.4: Evaluación de la susceptibilidad de licuefacción basada en el nivel freático.

Nivel freático	Rangos de la susceptibilidad de licuefacción de acuerdo al nivel freático según Tinsley <i>et al.</i>	
1.5 a 3.5 m	Muy Alto	Moderado

Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

5.1.5 Amplitud y duración de la vibración del terreno.

De acuerdo a las investigaciones realizadas por Chunga, 2013 en base a la falla tectónica más cercana y con mayor influencia a las costas de nuestra zona de estudio se pudo obtener como resultado un PGA de 0.42g, y de acuerdo a la tabla de Santucci de Magistris *et al.*, (2013), lo consideran con un grado de máxima a media susceptibilidad a la licuefacción.

Tabla 5.5: Evaluación de susceptibilidad de licuefacción basada en la aceleración.

Aceleración	Rangos de la susceptibilidad de licuefacción de basada en la aceleración según Santucci de Magistris <i>et al.</i>	
0.42g	Máxima	Media

Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

A continuación se muestra la Tabla 5.6 de resumen de resultados de los análisis realizados.

Tabla 5.6: Resumen de los resultados de exploración del suelo.

Resultados obtenidos del análisis de la Exploración del Suelo					
Parámetros	Origen del suelo	Granulometría de los depósitos	Nivel Freático	Edad del depósito	Aceleración
Datos de la zona de Chipipe	Aluviales constituidos por depositaciones de conglomerados, arenas, limos y arcillas de bajas densidades dispuestas en terrazas	Arenas limpias, finos limosos, arenas con finos o arenas con gravas y finos	1.5 a 3.5 m	Pleistoceno	0.42g
				Holoceno	
Rango	Medio	Alto	Muy Alto	Moderado	Máxima
	Bajo		Moderado	Bajo	Media

Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

5.2 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS SUELOS DE LA ZONA DE CHIPIPE

Para obtener las características geomecánicas de los suelos de Chipipe, como la fracción de finos, el índice de plasticidad, entre otros parámetros, se analizó los estudios de suelos recopilados y los sondeos respectivos realizados en la presente investigación. Los resultados de estos ensayos se muestran en los Anexos E y se detallan de manera general a continuación.

5.2.1 Estudio de suelo del edificio Punta Pacífico realizado por el Ing. Franklin Ordóñez

De acuerdo a las perforaciones que se realizaron en el estudio de suelo del edificio Punta Pacífico, el subsuelo presenta las siguientes características mecánicas:

Se encontró nivel freático a 3.5 m de profundidad considerando el nivel de la acera. Los suelos encontrados en el área de este estudio, se clasifican, como limos inorgánicos de alta compresibilidad para los primeros 2.5 m de profundidad; la norma SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos); los clasifica como MH, de

compacidad suelta a muy suelta. Para los siguientes 3 m de profundidad se encontraron arcillas arenosas de compacidad densa; la norma SUCS los clasifica como CL, a excepción de la perforación PT-2 en la que se encontró limos hasta los 5m de profundidad, con humedades entre 13.95% a 33.1%, con índices de plasticidad de 14.75% a 30.39% y pasante del tamiz # 200 de 83.5% a 92.40%.

5.2.2 Estudio de suelo del edificio Marenostrom realizado por la compañía Borleti S.A.

Los resultados obtenidos en el presente estudio del Edificio Marenostrom, el subsuelo presenta las siguientes características mecánicas.

El nivel freático varía entre 1.75 a 1.8 m de profundidad. Se presentan tres estratos definidos:

Estrato 1.- Capa de arena con alto contenido de limo color café fino limoso no plástico, cuyo espesor tiene un promedio de 1 m, compacidad relativa suelta a medianamente densa, con baja capacidad portante; el SUCS lo clasifica como SM, con humedades entre 4.16% a 10.13%, no presenta plasticidad y pasante del tamiz # 200 de 18.04% a 28.63%.

Estrato 2.- Capa arcillosa meteorizada detectada hasta una profundidad variable entre 1 y 3 m, de color gris algo blanca, con alto porcentaje de arena y presencia de gravilla, plástica, consistencia muy compacta a dura; el SUCS lo clasifica como CL, con humedades entre 22.34% a 32.74%, con índices de plasticidad de 16.22% a 33.22% y pasante del tamiz # 200 de 59.55% a 65.03%.

Estrato 3.- Roca blanda de matriz arcillosa color café y amarillo algo gris y verde de consistencia y compacidad relativa dura y muy densa con número de golpes mayores a 50, detectada a una profundidad promedio de 5.5 m, con alta capacidad portante, con humedades entre 10.51% a 49.48%, con índices de plasticidad de 21.17% a 39.42% y pasante del tamiz #200 de 8.32% a 99.92%.

5.2.3 Estudio de suelo del aeropuerto Gral. Ulpiano Páez de Salinas realizado por la consultora Asesoría y Estudios Técnicos c. Ltda.

Las características mecánicas de los suelos en el área de estudio de la Terminal Aérea, es bastante homogénea:

Se detectó nivel freático superficial de 1 a 1.5 m de profundidad, correspondiente a la cota del terreno.

El suelo es arenoso con pocos finos no plásticos, su clasificación SUCS es SM; en algunos casos a partir de los 4 m de profundidad se encuentra una mezcla de grava de canto rodado con arena de grano grueso y su clasificación SUCS es GM. Con humedad natural de 7.04 a 27.6%, pasante del #200 del 4.03% a 23.36% y número de golpes de 10 a 75.

Los resultados obtenidos para el área de la Torre de Control, muestran por estrato las siguientes características mecánicas.

El nivel freático se encontró a una profundidad de 2.1 m.

Estrato 1.- Arena con algo de grava, color café, algo verde y amarilla, con variable porcentaje de fino, cuya plasticidad varia de ligeramente plástica a plástica, compacidad relativa densa que revela una buena capacidad portante, alcanza una profundidad de 1.95 m, que se lo considera constante en el área de la cimentación de la estructura debido a que solo se tiene como referencia un solo sondeo; el SUCS lo clasifica entre SC y SM, con humedades entre 4.35% a 21% y pasante del tamiz # 200 de 14.04% a 30.25%.

Estrato 2.- Capa de arena color café algo amarilla, finos limosos no plásticos de compacidad relativa medianamente densa en una profundidad de 3.30 m; el SUCS lo clasifica como SM, con humedad de 14.46% y pasante del tamiz # 200 de 31.70%.

Estrato 3.- Capa de arena color café algo gris, finos limosos no plásticos de compacidad relativa muy densa, capacidad portante alta, a la profundidad estudiada; el SUCS lo clasifica como SM, con humedades entre 12.05% a 20.91% y pasante del tamiz # 200 desde 6.98% a 19.69%.

5.2.4 Perforaciones realizadas en el estudio por la compañía Ingetop S.A.

De los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se puede observar los siguientes estratos:

Perforación PT-12

0.00m –1.00m de profundidad.- Arena limosa con baja plasticidad de color marrón, de compacidad suelta, con humedad natural de 18.80% y pasante del #200 de 27.84%; el SUCS lo clasifica como SM – SC.

1.00m – 2.00 m de profundidad.- Arena limosa de color marrón, de compacidad densa no plástica, con humedad natural de 28.51% y pasante del #200 de 14.65%; el SUCS lo clasifica como SM.

2.00m – 3.00 m de profundidad.- Matriz limosa color café claro de baja plasticidad de consistencia compacta, con una humedad de 24.97% y pasante del #200 de 92.01%; el SUCS lo clasifica como ML.

3.00m – 4.00 m de profundidad.- Arena limosa de color marrón de baja plasticidad de compacidad medianamente densa, con una humedad de 20,67% y pasante del #200 de 39.53%; el SUCS lo clasifica como SM-SC.

4.00m – 5.00 m de profundidad.- Matriz limosa de color café de baja plasticidad de consistencia dura, con una humedad de 24.52% y pasante del #200 de 96.17%; el SUCS lo clasifica como ML.

5.00m – 6.00 m de profundidad.- Matriz limosa de color gris de baja plasticidad con pintas de oxidación con vetas de arcilla café clara de consistencia dura,

con una humedad de 24.60% y pasante del #200 de 92.29%; el SUCS lo clasifica como ML.

6.00m – 8.00 m de profundidad.- Matriz limosa de color café claro de baja plasticidad con pintas de oxidación con vetas de arcilla gris de consistencia dura, con una humedad entre 23.29% a 24.45% y pasante del #200 desde 90.46% a 93.27%; el SUCS lo clasifica como ML.

Perforación PT-13

0.00m –1.00m de profundidad.- Arena Limosa color café oscuro de baja plasticidad con vetas de arcilla gris, de compacidad muy suelta, con humedad natural de 19.56% y pasante del #200 de 41.39%; el SUCS lo clasifica como SM – SC.

1.00m – 2.00 m de profundidad.- Arena limosa de color gris no plástica con pintas de yeso, de compacidad medianamente densa, con humedad natural de 19.74% y pasante del #200 de 41.55%; el SUCS lo clasifica como SM.

2.00m – 3.00 m de profundidad.- Arena de color gris no plástica con fragmentos de arenisca de compacidad medianamente densa, con una humedad de 24,55% y pasante del #200 de 4.5%; el SUCS lo clasifica como SM.

3.00m – 4.00 m de profundidad.- Matriz limosa de color café de baja plasticidad con capitas de arcilla gris con yeso y fragmentos de arenisca blanca de consistencia dura, con una humedad de 15.88% y pasante del #200 de 48.73%; el SUCS lo clasifica como ML.

4.00m – 6.00 m de profundidad.- Matriz limosa de color café clara de baja plasticidad con oxidación y vetas de arcilla gris de consistencia dura, con una humedad entre 19.95% a 24.62% y pasante del #200 desde 81.91% a 97.01%; el SUCS lo clasifica como ML.

6.00m – 7.00 m de profundidad.- Arena limosa de color café oscuro de baja plástica con pintas de oxidación, de compacidad densa, con humedad natural de 24.12% y pasante del #200 de 62.04%; el SUCS lo clasifica como SM-SC.

7.00m – 8.00 m de profundidad.- Matriz limosa de color café claro de baja plasticidad con pintas de oxidación de consistencia dura, con humedad de 23.73% y pasante del #200 de 98.52%; el SUCS lo clasifica como ML.

Perforación PT-14

0.00m – 1.00m de profundidad.- Fragmentos de arenisca consolidada de color café claro, con humedad natural de 13.56%, no presenta plasticidad ya que es una arenisca y pasante del #200 del 31.08%.

1.00m - 3.00 m de profundidad.- Arcilla de color café claro de consistencia dura de baja plasticidad con vetas de arenisca color blanco hueso, con humedad natural entre 14.61% y 18.08%, con índice de plasticidad entre 12.79% a 12.90% y pasante del #200 varía entre 50.94% al 56.34%.

3.00m - 4.00 m de profundidad.- Arenisca consolidada de consistencia dura, con humedad natural de 15.73%, esta muestra no presentan plasticidad ya que se tratan de areniscas y pasante del #200 del 17.63%.

4.00m - 7.50 m de profundidad.- Formación Cayo roca blanda color café claro.

5.3 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN POR EL MÉTODO BASADO EN EL NÚMERO DE GOLPES DEL ENSAYO DEL SPT

Para determinar el potencial de licuefacción de los suelos en la zona de estudio, se utilizó el método propuesto por Seed & Idriss evaluado con la magnitud de sismo $M_w=7.5$ por ser la más desfavorable de acuerdo a los parámetros analizados, como se explicó en el ítem 3.7.1, primero se realizó los cálculos respectivos para luego mostrar los resultados y efectuar las comparaciones.

Al aplicar el método requiere de cálculos repetitivos, por lo que se utilizó hojas de cálculo realizadas en Excel para hacer menos tedioso el análisis. Ver hojas de cálculo en el Anexo H-1.

En cada zona de estudio se requiere ingresar en la hoja de cálculo de Excel los siguientes datos:

- ✓ Magnitud del sismo. $M_w = 7.5$, de acuerdo a Seed & Idriss.
- ✓ Aceleración máxima. 0.42 g, de acuerdo a Chunga *et al.*
- ✓ Profundidad de los estratos, en metros.
- ✓ Nivel freático, en metros
- ✓ Porcentajes de finos del suelo
- ✓ Peso específico de cada estrato de suelo en KN/m^3
- ✓ Número de golpes del ensayo del SPT

Se realizaron las hojas de cálculo en base a los siguientes parámetros.

- ✓ Cálculo de los esfuerzos efectivo y total, para cada profundidad de análisis.
- ✓ Cálculo del factor de reducción de tensiones de corte a cada profundidad de análisis
- ✓ Cálculo de las tensiones de corte cíclicas (CSR) para cada profundidad de análisis
- ✓ Corrige el ensayo SPT para cada profundidad de análisis de acuerdo a la energía del martillo del ensayo de SPT y luego por la fracción fina del suelo.
- ✓ Determina la resistencia cíclica (CRR) para cada profundidad de análisis
- ✓ Aplica el factor de corrección por magnitud sísmica
- ✓ Cálculo del factor de seguridad a la licuefacción (FS)
- ✓ Evalúa a cada profundidad de análisis si el suelo es licuable o no.

Luego del respectivo cálculo se analizó cada estrato susceptible a la licuefacción. Los resultados se detallan en la Tabla 5.7 a 5.12.

Además se graficó los diferentes valores de CSR versus el número de golpes del ensayo del SPT corregido de todos los estudios analizados, de acuerdo al gráfico

propuesto por Vallejo que se observó en la Ilustración 3.5, los mismos que se detallan en el Anexo G.

Analizando los estudios recopilados y las perforaciones realizadas mediante el criterio de Vallejo (2002), el cual estima la magnitud de momento en función del esfuerzo de corte cíclico (CSR) y el número de golpes corregido por finos $((N_1)_{60cs})$, se obtuvo como resultados aproximados de magnitud de momento Mw entre 6.75 a 7.5 coincidiendo estos resultados con el calculado de la magnitud estimada desde relaciones empíricas propuestas por Well & Coppermish, (1994), en el catálogo de fallas activas del Dr. Chunga Kervin, (2013) de 7.2.

Tabla 5.7: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT.

Resultados obtenidos del análisis del Potencial de Licuefacción de suelos en la zona de Chipipe								
Método basado en el numero de golpes del Ensayo del SPT								
Estudio	Perforación				Descripción	Resultados		
	Nº	Prof.	N.F	Estrato		(N ₁) _{60cm}	FS	Evaluación
Punta Pacifico	PT-2	1			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad suelta	34.85		No Licuable
		1.5			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad suelta	41.94		No Licuable
		2			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad media	52.5		No Licuable
		2.5			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad media	53.3		No Licuable
	PT-3	1			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad muy suelta	12.96	0.82	Licuable
		1.5			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad muy suelta	12.77	0.82	Licuable
		2			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad suelta	5.00	1.28	Licuable
		2.5			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad suelta	38.44		No Licuable
	PT-4	1			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad suelta	20.92	0.98	Licuable
		1.5			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad suelta	24.44	1.15	Licuable
		2			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad media	67.7		No Licuable
		2.5			Limos Inorgánicos de alta compresibilidad compacidad media	77.45		No Licuable

Nota. Desde la profundidad de 2.5 a 5.5 se encontró un estrato competente no susceptible a la licuefacción.

Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Tabla 5.8: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT

Resultados obtenidos del análisis del Potencial de Licuefacción de suelos en la zona de Chipipe								
Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT								
Estudio	Perforación				Descripción	Resultados		
	N°	Prof.	N.F	Estrato		(N ₁) _{60cm}	FS	Evaluación
Marenostrum	PT-5	1			Arena fina, color café, no plástica, compacidad Relativa medianamente densa	15.42	0.851	Licuable
		2	1.8	NF	Arcilla color gris y blanco meteorizado, con arena fina, plástica, consistencia muy compacta.	26.09	1.215	Licuable
		3			Arcilla color gris y blanco meteorizado, con arena fina, plástica, consistencia muy compacta.	54.18		No Licuable
		4			Gravas de formación rocosa, color café, se recuperó poco material.	60.84		No Licuable
	PT-6	1			Arena fina, color café, no plástica, compacidad Relativa suelta	8.08	0.979	Licuable
		2	1.8	NF	Arcilla color gris y blanco meteorizado, con arena fina, medianamente plástica, consistencia muy compacta.	42.44		No Licuable
		3			Arcilla color gris y blanco meteorizado, con arena fina, medianamente plástica, consistencia dura	63.67		No Licuable
		4			Formación rocosa blanda de matriz arcillosa, color café, con pintas de arena fina, medianamente plástica, consistencia dura.	78.43		No Licuable
		5			Formación rocosa blanda de matriz arcillosa, color amarillo algo gris y verde, con pintas de arena fina, plástica, consistencia muy compacta.	45.6		No Licuable
		6			Formación rocosa blanda de matriz arcillosa, color amarillo algo gris y verde, con pintas de arena fina, plástica, consistencia dura.	71.89		No Licuable
		7			Formación rocosa blanda de matriz arcillosa, color amarillo algo gris y verde, con pintas de arena fina, plástica, consistencia dura.	51.11		No Licuable
		8			Formación rocosa blanda de matriz arcillosa, color amarillo algo gris y verde, con pintas de arena fina, plástica, consistencia muy compacta.	29.57	1.03	Licuable

Nota. En la perforación PT-6 se evaluó hasta los 8 m de profundidad puesto que se encontró con un estrato con número de golpes menores a 30

Elaborada por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Tabla 5.9: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT.

Resultados obtenidos del análisis del Potencial de Licuefacción de suelos en la zona de Chipipe								
Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT								
Estudio	Perforación				Descripción	Resultados		
	N°	Prof.	N.F	Estrato		(N ₁) _{60cs}	FS	Evaluación
Aeropuerto Ulpiano Paéz de Salinas	PT-7	1			Arena con pintas de conchilla y poco finos no plásticos, grano fino, compacidad relativa medianamente densa.	19.54	0.252	Licuable
		2	NF		Arena con pintas de conchilla y poco finos no plásticos, gris, compacidad relativa medianamente densa.	29.77	0.474	No Licuable
		3			Arena con residuos calcáreos(conchilla), grano fino, gris, compacidad relativa medianamente densa.	31.69		No Licuable
		4			Arena gris con conchilla, pocos finos no plásticos, grano fino, compacidad relativa densa.	41.38		No Licuable
	PT-8	1			Arena con poco finos no plásticos, grano fino, café amarillenta con oxido, compacidad relativa suelta.	13.22	0.83	Licuable
		2	NF		Arena con pintas de conchilla y poco finos no plásticos, gris, compacidad relativa medianamente densa.	36.01		No Licuable
		3			Arena con pintas de gravilla y conchilla, poco finos no plástico, grano fino, compacidad relativa densa.	53.59		No Licuable
		4			Grava arenosa(canto rodado), con pocos finos de baja plasticidad, gris amarillento, compacidad relativa densa.	45.84		No Licuable

Elaborado por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Tabla 5.10: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT.

Resultados obtenidos del análisis del Potencial de Licuefacción de suelos en la zona de Chipipe								
Método basado en el numero de golpes del Ensayo del SPT								
Estudio	Perforación				Descripción	Resultados		
	N°	Prof.	N.F	Estrato		(N ₁) _{60cs}	FS	Evaluación
Aeropuerto Ulpiano Paéz de Salinas	PT-9	1			Arena con poco finos no plásticos, pintas de conchilla gris, compacidad relativa suelta.	18.33	0.913	Licuable
		2	NF		Arena con pintas de gravilla y conchilla; finos no plásticos, café gris, compacidad relativa medianamente densa.	23.94	0.995	Licuable
		3			Mezcla de arena grava y poco finos de baja plasticidad, gris amarillenta, compacidad relativa medianamente densa.	26.65	0.998	Licuable
		4			Arena con alto porcentaje de conchilla y gravilla color café amarillenta, compacidad relativa densa.	51.41		No Licuable
	PT-10	1			Arena con pintas de conchilla y poco finos no plásticos, grano fino gris, compacidad relativa suelta.	18.28	0.911	Licuable
		2	NF		Arena con pintas de conchilla y poco finos no plásticos, café gris, compacidad relativa medianamente densa.	31.12		No Licuable
		3			Arena con pintas de gravilla y conchilla, finos no plásticos, gris, compacidad relativa densa.	51.18		No Licuable
		4			Arena con gravilla y conchilla, poco finos no plásticos, grano fino, compacidad relativa densa.	45.42		No Licuable

Elaborado por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Tabla 5.11: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT.

Resultados obtenidos del análisis del Potencial de Licuefacción de suelos en la zona de Chipipe								
Método basado en el numero de golpes del Ensayo del SPT								
Estudio	Perforación				Descripción	Resultados		
	N°	Prof.	N.F	Estrato		(N ₁) _{60cs}	FS	Evaluación
Aeropuerto Ulpiano Paéz de Salinas	PT-11	1			Arena con algo de grava, color café algo verde y amarilla, finos limo arcillosos ligeramente plásticos, compacidad relativa densa.	51.52		No Licuable
		2		NF	Arena arcillosa con grava, color café algo amarilla, finos plásticos, compacidad relativa densa.	39.56		No Licuable
		3			Arena limosa, color café algo amarilla, finos no plásticos, compacidad relativa medianamente densa.	24.75	0.984	Licuable
		4			Arena limosa, color café algo gris, finos no plásticos, compacidad relativa muy densa.	54.14		No Licuable
Perforaciones realizadas Solar Biblioteca Municipal	PT-12	1			Arena Limosa con baja plasticidad color marrón con compacidad suelta	15.27	0.848	Licuable
		2	1.5	NF	Arena Limosa no plástica color marrón con compacidad densa	53.96		No Licuable
		3			Matriz limosa de baja plasticidad de color café claro con compacidad medianamente densa	29.03	1.24	Licuable
		4			Arena limosa de baja plasticidad color marrón con compacidad medianamente densa	28.99	1.133	Licuable

Elaborado por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Tabla 5.12: Resumen de los resultados. Método basado en el número de golpes del Ensayo del SPT.

Resultados obtenidos del análisis del Potencial de Licuefacción de suelos en la zona de Chipipe									
Método basado en el numero de golpes del Ensayo del SPT									
Estudio	Perforación				Descripción	Resultados			
	N°	Prof.	N.F	Estrato		(N ₁) _{60cs}	FS	Evaluación	
Perforaciones realizadas Aledaña a la Base Aérea	PT-13	1.5	N.F	1	Arena Limosa de baja plasticidad color café oscuro con vetas de arcilla gris de compacidad muy suelta	13.89	0.834	Licuable	
				2	Arena Limosa no plástica de color gris con pintas de yeso de compacidad medianamente densa	27.76	1.273	Licuable	
				3	Arena no plástica de color gris con fragmentos de areniscas de compacidad medianamente densa	28.85	1.211	Licuable	
				4	Matriz limosa de baja plasticidad color café con capitas de arcilla gris con yeso y fragmentos de arenisca blanca con compacidad densa	80.26		No Licuable	
Perforaciones realizadas Condominio Vela Beach	PT-14			1	Fragmentos de arenisca consolidada de color café en matriz limosa carente de plasticidad.	50		No Licuable	
				2	Arcilla de color café claro de consistencia dura de baja plasticidad con vetas de arenisca color hueso.	50		No Licuable	
				3		50		No Licuable	
				4	Arenisca consolidada de consistencia dura.	50		No Licuable	

Elaborado por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

5.4 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN BASADO EN LAS PROPIEDADES DE LA FRACCIÓN FINA DEL SUELO

Para la evaluación del potencial de licuefacción basado en la fracción fina de la zona de estudio se analizó de acuerdo a:

- Método chino de Wang
- Método chino modificado de Finn
- Método chino modificado de acuerdo a las normas ASTM
- Método de Seed & Cetin *et al.*
- Propuesta de norma francesa de Durville *et al.*

Los cuales se describieron detalladamente en el ítem 3.7.2, en base a los parámetros geomecánicos obtenidos en los ensayos de laboratorio como:

- ✓ Humedad natural
- ✓ Límites de Atterberg
- ✓ Porcentaje de fracción de finos
- ✓ Índice de liquidez
- ✓ Grado de saturación
- ✓ Granulometría
- ✓ Coeficiente de uniformidad

Se requirió para su mejor entendimiento de hojas de cálculo realizadas en Excel las cuales se encuentran en el Anexo H-2. Una vez realizado su análisis respectivo se obtuvieron los resultados que se detallan a continuación en la Tabla 5.13 a 5.14.

Tabla 5.13: Resumen de los resultados. Método basado en la fracción fina del suelo.

Resultados obtenidos del análisis del Potencial de Licuefacción de suelos en la zona de Chipipe										
Método basado en la fracción fina del suelo										
Estudio	Perforación				Descripción	Resultados				
	N°	Prof.	N.F	Estrato		Wang (1979)	Finn (1991 -1994)	Andrews y Martin (2000)	Seed & Cetin et al (2003)	Norma Francesa. Durville et al. (1985)
Perforaciones realizadas Solar Biblioteca Municipal PT-12	1				Arena limosa con baja plasticidad color marrón con compacidad suelta	No Licuable	No Licuable	Licuable	No Aplica	Licuable
	2	1.5	NF		Arena limosa no plástica color marrón con compacidad densa	Licuable	Licuable	Licuable	No Aplica	Licuable
	3				Matriz limosa de baja plasticidad de color café claro con compacidad medianamente densa	No Licuable	No Licuable	Requiere de estudios mas profundos	Potencialmente Licuable	No Licuable
	4				Arena limosa de baja plasticidad color marrón con compacidad medianamente densa	Licuable	Licuable	Licuable	Potencialmente Licuable	No Licuable
	5				Matriz limosa de baja plasticidad de color café claro con compacidad densa	No Licuable	No Licuable	Requiere de estudios mas profundos	Potencialmente Licuable	No Licuable
	6				Matriz limosa de baja plasticidad de color gris con pintas de oxidación con vetas de arcilla café claro y de compacidad densa	No Licuable	Licuable	Licuable	Potencialmente Licuable	Licuable
	7				Matriz limosa de baja plasticidad de color café clara con pintas de oxidación con vetas de arcilla gris y de compacidad muy densa	Licuable	Licuable	Licuable	Potencialmente Licuable	Licuable
	8				Matriz limosa de baja plasticidad de color café clara con pintas de oxidación con vetas de arcilla gris y de compacidad muy densa	No Licuable	No Licuable	Licuable	Potencialmente Licuable	Licuable

Elaborado por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Tabla 5.14: Resumen de los resultados. Método basado en la fracción fina del suelo

Resultados obtenidos del análisis del Potencial de Licuefacción de suelos en la zona de Chipipe										
Método basado en la fracción fina del suelo										
Estudio	Perforación				Descripción	Resultados				
	N°	Prof.	N.F	Estrato		Wang (1979)	Finn (1991 -1994)	Andrews y Martin (2000)	Seed & Cetin et al (2003)	Norma Francesa. Durville et al. (1985)
Perforaciones realizadas Aledaña a la Base Aérea PT-13	1				Arena limosa de baja plasticidad color café oscuro con vetas de arcilla gris de compacidad muy suelta	No Licuable	No Licuable	Licuable	No Licuable	No Licuable
	2	1.5	NF		Arena limosa no plástica de color gris con pintas de yeso de compacidad medianamente densa	Licuable	Licuable	Licuable	No Aplica	Licuable
	3				Arena no plástica de color gris con fragmentos de areniscas de compacidad medianamente densa	Licuable	Licuable	Licuable	No Aplica	Licuable
	4				Matriz limosa de baja plasticidad color café con capitas de arcilla gris con yeso y fragmentos de arenisca blanca con compacidad densa	No Licuable	No Licuable	Licuable	No Licuable	No Licuable
	5				Matriz limosa de baja plasticidad color café claro con oxidación y vetas de arcilla gris con compacidad muy densa	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable
	6				Matriz limosa de baja plasticidad color café claro con oxidación y vetas de arcilla gris con compacidad muy densa	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable
	7				Arena limosa de baja plasticidad color café oscuro con pintas de oxidación de compacidad densa	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable
	8				Matriz limosa de baja plasticidad color café claro con pintas de oxidación de compacidad densa	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable

Elaborado por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

5.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS EVALUADOS

Luego de aplicar las metodologías para los estudios recopilados y los sondeos realizados se observó entre ambos análisis las diferencias como se muestra en la Tabla 5-15 a 5.16.

De acuerdo a la comparación de resultados el que más se asemeja a los datos obtenidos por el método de Seed & Idriss es el método de Andrews y Martin.

Tabla 5.15: Comparación de los resultados del Potencial de Licuefacción de acuerdo a los métodos aplicados.

Resultados obtenidos del analisis del Potencial de Licuefacción de suelos en la zona de Chipipe													
Comparacion de los Metodos aplicados													
Estudio	Perforación				Descripción	Resultados							
	N°	Prof.	N.F	Estrato		Fracción fina del suelo							
						Numero de golpes del SPT			Wang (1979)	Finn (1991 -1994)	Andrews y Martin (2000)	Seed & Cetin et al (2003)	Norma Francesa. Durville et al. (1985)
Seed & Idriss, (1971, 1982)													
Perforaciones realizadas Solar Biblioteca Municipal PT-12	1				Arena Limosa con baja plasticidad color marrón con compacidad suelta	15.274	0.848	Licuable	No Licuable	No Licuable	Licuable	No Aplica	Licuable
	2				Arena Limosa no plastica color marrón con compacidad densa	53.96		No Licuable	Licuable	Licuable	Licuable	No Aplica	Licuable
	3				Matriz limosa de baja plasticidad de color café claro con compacidad medianamente densa	29.029	1.24	Licuable	No Licuable	No Licuable	Requiere de estudios mas profundos	Potencialmente Licuable	No Licuable
	4				Arena limosa de baja plasticidad color marrón con compacidad medianamente densa	28.98	1.133	Licuable	Licuable	Licuable	Licuable	Potencialmente Licuable	No Licuable
	5				Matriz limosa de baja plasticidad de color café claro con compacidad densa				No Licuable	No Licuable	Requiere de estudios mas profundos	Potencialmente Licuable	No Licuable
	6				Matriz limosa de baja plasticidad de color gris con pintas de oxidación con vetas de arcilla café claro y de compacidad densa				No Licuable	Licuable	Licuable	Potencialmente Licuable	Licuable
	7				Matriz limosa de baja plasticidad de color café clara con pintas de oxidación con vetas de arcilla gris y de compacidad muy densa				Licuable	Licuable	Licuable	Potencialmente Licuable	Licuable
	8				Matriz limosa de baja plasticidad de color café clara con pintas de oxidación con vetas de arcilla gris y de compacidad muy densa				No Licuable	No Licuable	Licuable	Potencialmente Licuable	Licuable

Elaborado por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Tabla 5.16: Comparación de los resultados del Potencial de Licuefacción de acuerdo a los métodos aplicados.

Resultados obtenidos del analisis del Potencial de Licuefacción de suelos en la zona de Chipipe													
Comparacion de los Metodos aplicados													
Estudio	Perforación				Descripción	Resultados							
	N°	Prof.	N.F	Estrato		Fracción fina del suelo							
						Numero de golpes del SPT			Wang (1979)	Finn (1991 -1994)	Andrews y Martin (2000)	Seed & Cetin et al (2003)	Norma Francesa. Durville et al. (1985)
Seed & Idriss, (1971, 1982)													
Perforaciones realizadas Aledaña a la Base Aérea PT-13	1				Arena Limosa de baja plasticidad color café oscuro con vetas de arcilla gris de compacidad muy suelta	13.896	0.834	Licuable	No Licuable	No Licuable	Licuable	No Licuable	No Licuable
	2	1.5	NF		Arena Limosa no plastica de color gris con pintas de yeso de compacidad medianamente densa	27.764	1.273	Licuable	Licuable	Licuable	Licuable	No Aplica	Licuable
	3				Arena no plastica de color gris con fragmentos de areniscas de compacidad medianamente densa	28.85	1.211	Licuable	Licuable	Licuable	Licuable	No Aplica	Licuable
	4				Matriz limosa de baja plasticidad color café con capitas de arcilla gris con yeso y fragmentos de arenisca blanca con compacidad densa	80.256		No Licuable	No Licuable	No Licuable	Licuable	No Licuable	No Licuable
	5				Matriz limosa de baja plasticidad color café claro con oxidacion y vetas de arcilla gris con compacidad muy densa				No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable
	6				Matriz limosa de baja plasticidad color café claro con oxidacion y vetas de arcilla gris con compacidad muy densa				No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable
	7				Arena limosa de baja plasticidad color café oscuro con pintas de oxidacion de compacidad densa				No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable
	8				Matriz limosa de baja plasticidad color café claro con pintas de oxidacion de compacidad densa				No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable	No Licuable

Elaborado por: Liliana Polonio y Jennifer Lindao.

Posteriormente se realizó un mapa del área de Chipipe (ver Anexo I), en el que se identificó de acuerdo a los resultados obtenidos, zonas de alta, media o no susceptibles a la licuefacción.

El mapa presentado, se lo realizó a partir de los resultados obtenidos del método propuesto de Seed & Idriss con el ensayo del SPT analizados con un 0.42 g de aceleración máxima, con magnitud de $M_w = 7.5$; y en concordancia con los métodos propuestos para la evaluación de la fracción fina del suelo. Además se consideraron la correlación entre la geología y las características mecánicas de la zona para identificar las áreas susceptibles a la licuefacción.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Con la información recopilada para realizar el presente estudio, se puede concluir que no hubo antes estudios de licuefacción en esta zona costera, a pesar de que técnicamente se ha tenido conocimiento de que el nivel freático se encuentra a poca profundidad y que la mayor parte del suelo está formado por arenas flojas y suelos finos de baja densidad en toda el área estudiada.
- De acuerdo a los resultados obtenidos de las diferentes metodologías propuestas para el análisis del Potencial de Licuefacción en el presente estudio, se concluyó que el perfil costero de la zona de Chipipe es más propenso a sufrir problemas de licuefacción en comparación con las zonas altas del mismo sector, debido a que se encuentran depositaciones de conglomerados, arenas, limos y arcillas de baja densidades dispuestas en terrazas y nivel freático de aproximadamente 2.00 m de profundidad.
- En las zonas analizadas correspondientes al sector de Chipipe, Edificio Punta Pacifico, aeropuerto Gral. Ulpiano Páez, y las perforaciones realizadas en el sector de la FAE y solar destinado a la Biblioteca Municipal, se obtuvieron resultados de suelos licuables a profundidades aproximadas de 4.m. En el caso del estudio del Edificio Marenostrum se encontró a 8.0 m un estrato susceptible a este fenómeno, ya que nos dan factores de seguridad $FS < 1.3$.

6.2 RECOMENDACIONES

- Los consultores y proyectistas de toda obra de construcción en los sectores de estudios, además de analizar las fallas por capacidad de carga, por asentamientos, expansión deben tomar en cuenta la falla del suelo por el fenómeno de licuefacción ya que de otra manera, a pesar del esfuerzo invertido en el diseño estructural, podría colapsar por esta causa.

- Realizar estudios de licuefacción, en las zonas que en el presente estudio no han sido consideradas, para zonificar los suelos del cantón Salinas con respecto al posible riesgo de licuefacción en momentos de sismos.
- Para incrementar la compacidad del suelo, se recomienda la sustitución del suelo incompetente, siendo esta técnica una de las más viables, siempre y cuando el estrato licuable se encuentre en los primeros 4 m de profundidad. A profundidades aproximadas a 8m se recomienda la densificación del suelo, mediante la utilización, compactación dinámica, vibroflotacion e inclusiones rígidas como columnas de grava o pilotes de concreto entre otras.

7 GLOSARIO

Acantilado: Es un accidente geográfico que consiste en una pendiente o vertical abrupta.

Aceleración: Es una magnitud vectorial que nos indica el cambio de velocidad por unidad de tiempo.

Aluviales: Es un material detrítico transportado y depositado transitoria o permanentemente por una corriente de agua.

Arcilla: Es un suelo o roca sedimentaria constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco cuando es pura.

Asentamientos: Es la deformación vertical en la superficie de un terreno proveniente de la aplicación de cargas o debido al peso propio de las capas.

Basamento: Corteza terrestre situada por debajo de los depósitos sedimentarios.

Calicata: Son una de las técnicas de inspección empleadas para facilitar el reconocimiento geotécnico.

Cherts: Es una roca sedimentaria rica en sílice de grano fino microcristalina, criptocristalina o microfibrosa que pueden contener pequeños fósiles. Tiene gran variedad de color (desde el blanco al negro), pero más a menudo se manifiesta en gris, verde claro, marrón, marrón grisáceo y rojo oxidado, su color es una expresión de las trazas de elementos

presentes en la roca, y el rojo y el verde son los que más a menudo se relacionan con trazas de hierro.

Cíclicas: Que se repiten con cierto período de tiempo.

Cohesivos: Acción y efecto de reunirse o adherirse las cosas entre sí, o la materia de que están formadas.

Colindante: Contiguo a otro.

Clay Pebble Beds: Capa de arcilla y gravilla.

Disipar: Esparcir o hacer desaparecer de la vista poco a poco las partes que forman un cuerpo por aglomeración.

Densificación: Hacer que algo adquiera mayor densidad.

Estabilización: Acción y efecto de hacer algo estable.

Estrato: Masa mineral en forma de capa de espesor más o menos uniforme, que constituye los terrenos sedimentarios.

Fricción: Fuerza entre dos superficies en contacto, a aquella que se opone al movimiento relativo entre ambas superficies de contacto o a la fuerza que se opone al inicio del deslizamiento.

Grava: Rocas de tamaño comprendido entre 2 y 64 milímetros. Pueden ser producidas por el ser humano, en cuyo caso suele denominarse piedra partida o caliza, o resultado de procesos naturales.

Humedad: Agua que impregna un cuerpo o al vapor presente en la atmósfera.

Licuefacción: Es la transformación de un material en estado sólido a su estado líquido, como consecuencia del incremento de presión de poros.

Mitigar: Moderar, aplacar, disminuir o suavizar algo riguroso o áspero.

Magnitud de momento: Es una escala logarítmica usada para medir y comparar terremotos.

Nivel freático: Corresponde al nivel superior de una capa freática o de un acuífero en general.

Oscilación: Es el movimiento repetido de un lado a otro en torno a una posición central, o posición de equilibrio.

Passage Beds: Es un estrato que forma una transición entre las rocas de dos sistemas geológicos.

Subducción: Es un proceso de hundimiento de una placa litosférica bajo otra en un límite convergente, según la teoría de tectónica de placas.

Susceptibilidad: Capaz de recibir el efecto o acción que se indica.

Tectónica: Pertenece o relativo a la estructura de la corteza terrestre.

Vibrocompactación: Compactar de forma dinámica y cíclica.

Vibroflotación: Vibrar hasta que el material fino aflore.

Viscosidad: Es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales, es debida a las fuerzas de cohesión moleculares.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y BIBLIOGRAFÍA

8.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Rodas Erick, M. I. (2011). *Susceptibilidad a la licuefacción por medio del sondeo de penetración estándar.*

Alva Jorge, D. I. (2002). *Breve historia del fenómeno de licuación de suelos. Lima: IV Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones.*

Chunga Kervin, D. I. (2009). *Riesgo en el Golfo de Guayaquil: Revisión de datos sísmológicos y de fallas activas.*

Chunga Kervin, D. I. (2010). *Análisis estructural de fallas geológicas y potenciales deslizamientos en Anconcito, Provincia de Santa Elena.*

Núñez del Arco Eugenio. I. (2003). *Geología del Ecuador.*

Núñez Jesús. (2007). *Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas. Aplicación a Tumaco. Barcelona.*

Esmeraldas News. (2011). Historia de los terremotos en Ecuador. Obtenido de: <http://esmeraldasnoticias.blogspot.com/2011/03/historia-de-los-terremotos-en-ecuador.html>

Obando Tupak. (2009). *Metodología y técnicas para la cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a solicitaciones dinámicas. Ejemplos de casos.*

Henríquez Carlos. (2007). *Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación.*

Santibáñez Daniel. (2006). *Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar.*

Seed & Idriss. (1971). *Procedimiento simplificado para la evaluación del potencial de licuefacción de suelos.*

Geostru Software. (2010). *Liquiter*.

Soledispa Bolívar. (2008). *Características geomorfológicas y sedimentológicas de la bahía de Santa Elena*.

Hoy. (2000). *La Sismicidad Siempre Acecha Al Ecuador*. Obtenido de:
<http://www.hoy.com.ec/noticias-ecuador/la-sismicidad-siempre-acecha-al-ecuador-50804.html>

Vallejo Luis. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

Cámara de la Construcción de Quito y Ministerio de Desarrollo Urbano de Vivienda. (2011). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*.

Yáñez Esteban. (2013). *Susceptibilidad de licuefacción en la comuna de Doñihue. Santiago de Chile*.

8.2 BIBLIOGRAFÍA

Braja M. Das. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Séptima Edición*.

Parra Denys y Alva Jorge. (2001) *Métodos simplificados para la evaluación del potencial de licuación de suelos*.

Martínez Alberto. (2006). *Licuación de Arenas*.

Alva Jorge. D. I. (2006). *Dinámica de suelo*.

Leoni Augusto. (2008). *Procesos de licuefacción de suelo*.

Parra Denys, Aguilar Zenón, Ayquipa Carmen y Alva Jorge. (2003). *Evaluación del potencial de licuación de suelos*.

9 ANEXOS

- Anexo A. Informe Geotécnico de la carretera San Vicente – Pedernales, Manabí.

- Anexo B. Estudios de Suelos Recopilados.
 - Anexo B-1. Edificio Punta Pacífico.
 - Anexo B-2. Edificio Marenostum.
 - Anexo B-3. Aeropuerto Gral. Ulpiano Páez de Salinas.

- Anexo C. Catálogo de fallas geológicas.

- Anexo D. Datos de curvas granulométricas para la evaluación de la gráfica de Berril *et al.* 1993.

- Anexo E. Ensayos de laboratorio.
 - Anexo E-1. Perforación realizada en Biblioteca Municipal.
 - Distribución Granulométrica.
 - Análisis Granulométrico por tamizado. Norma ASTM D-422.
 - Método del Hidrómetro. Norma ASTM D-422.
 - Límites de Atterberg:
 - Límite Líquido. Norma ASTM D-4318.
 - Límite Plástico. Norma ASTM D-4318.
 - Gravedad Específica del suelo. Norma ASTM D-854.
 - Peso Específico del suelo (Método de la parafina).

 - Anexo E-2. Perforación realizada aledaña Base Aérea FAE.
 - Distribución Granulométrica.
 - Análisis Granulométrico por tamizado. Norma ASTM D-422.
 - Método del Hidrómetro. Norma ASTM D-422.
 - Límites de Atterberg:
 - Límite Líquido. Norma ASTM D-4318.
 - Límite Plástico. Norma ASTM D-4318.

- Gravedad Específica del suelo. Norma ASTM D-854.
 - Peso Específico del suelo (Método de la parafina).
- Anexo E-3. Perforación realizada en condominio Vela Beach.
 - Distribución Granulométrica.
 - Análisis Granulométrico por tamizado. Norma ASTM D-422.
 - Límites de Atterberg:
 - Límite Líquido. Norma ASTM D-4318.
 - Límite Plástico. Norma ASTM D-4318.
 - Anexo E-4. Calicata realizada en Edificio Marenostrum.
 - Distribución Granulométrica.
 - Análisis Granulométrico por tamizado. Norma ASTM D-422.
 - Método del Hidrómetro. Norma ASTM D-422.
 - Límites de Atterberg:
 - Límite Líquido. Norma ASTM D-4318.
 - Límite Plástico. Norma ASTM D-4318.
 - Gravedad Específica del suelo. Norma ASTM D-854.
- Anexo F. Perfiles estratigráficos.
 - Anexo F-1. Perfiles estratigráficos de estudios recopilados.
 - Anexo F-2. Perfiles estratigráficos de perforaciones realizadas.
 - Anexo G. Grafica propuesta por Vallejo, 2002.
 - Anexo H. Cálculos del potencial de licuefacción.
 - Anexo H-1. Método basado en el número de golpes del ensayo del SPT.
 - Anexo H-2. Método basado en la fracción de finos del suelo.
 - Anexo I. Mapa de zonas susceptibles a la licuefacción.
 - Anexo J. Fotos.