



UNIVERSIDAD DE ESPECIALIDADES ESPÍRITU SANTO

FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**TÍTULO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN DE
SUELOS EN TARQUI, ECUADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN QUE SE PRESENTA COMO REQUISITO
PREVIO A OPTAR EL GRADO DE
INGENIERO CIVIL**

NOMBRE DEL ESTUDIANTE

JORGE ORDÓÑEZ

NOMBRE DEL(A) TUTOR(A)

Dra. OLGA ROA

SAMBORONDÓN, MAYO, 2017

APROBACIÓN DEL(A) TUTOR(A)

En mi calidad de tutor del estudiante Jorge David Ordóñez Rendón, estudiante de la Escuela de Ingeniería Civil, carrera dictada en la Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil de la UEES, certifico: Que he revisado el trabajo de tesis con el título: **EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN DE SUELOS EN TARQUI, ECUADOR**, presentado por el estudiante Jorge David Ordóñez Rendón con cédula de ciudadanía N°. 0924862147, como requisito previo para optar por el Grado Académico de Ingeniería Civil, y considero que dicho trabajo investigativo reúne los requisitos y méritos suficientes necesarios de carácter académico y científico, para presentarse a la Defensa Final.

Tutora: Olga Roa, Ph.D.

SAMBORONDÓN, MAYO, 2017

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mi familia, la cual me ha ofrecido apoyo incondicional durante todas las etapas que me han llevado a la realización de la misma; brindándome desde pequeño todas las herramientas que formaron tanto mi actitud como aptitud a nivel personal y profesional. Nunca dudaron de mí y siempre estuvieron alentándome hasta en los momentos más difíciles. Mi más grande gratitud hacia ellos.

RECONOCIMIENTO

La realización de esta investigación fue en gran parte posible gracias a la cooperación brindada por:

Olga Roa, Ph.D., mi mentora durante todo este proceso, quien, sobre todas las cosas, depositó su plena confianza en mí, siendo al mismo tiempo exigente sin conformarse con nada menos que lo mejor de mí.

Sebastian Lopez, M. Sc., gran profesional quien me propuso inicialmente estudiar el tema de licuación, es a él a quien le debo el apoyo técnico y teórico en lo que al tema estudiado respecta. Agradezco sus acertadas correcciones.

Xavier Vera-Grunauer, Ph.D., una de las más importantes figuras de la geociencia en Ecuador, cuyos conocimientos e investigaciones son suficientes para justificar su gran renombre. Gracias por la oportunidad brindada y su deseo de constante mejoramiento académico.

RESUMEN

El sector Tarqui, ubicado en la ciudad de Manta, en la provincia ecuatoriana de Manabí, fue destruido a causa del sismo del 16 de abril de 2016 con epicentro cercano a la misma provincia. El sismo de magnitud de momento (M_w) 7.8 desencadenó el fenómeno de licuación y consecuentemente asentamientos y desplazamientos en los suelos del sector. En base a las 27 perforaciones realizadas in-situ mediante el ensayo de penetración estándar (SPT) y los 26 sondeos realizados mediante el ensayo de piezocono ($CPTu$) se evaluó cuantitativamente el potencial de licuación en Tarqui en términos del factor de seguridad a la licuación (FS_{liq}), el índice de potencial de licuación (LPI) y el número de severidad de licuación (LSN), se estimaron los asentamientos verticales (S_{v-1D}) y desplazamientos laterales (LDI) basándose en los procedimientos semi-empíricos simplificados de (Boulanger & Idriss, 2014) mediante el desarrollo de una hoja de cálculo en Excel (JLiq SPT). Para los ensayos SPT , se evaluó la susceptibilidad de los suelos finos a licuarse; adicionalmente, para los ensayos SPT y $CPTu$, se evaluó la severidad del daño inducido por licuación en el terreno ($LIGD$) en base a las metodologías de (Bray & Sancio, 2006) e (Ishihara, 1985), respectivamente. Se elaboraron 11 comparaciones de los resultados obtenidos de los ensayos SPT y $CPTu$ cercanos. Se elaboraron mapas de contorno de la distribución espacial del LDI , LPI y LSN . La vulnerabilidad a la licuación del sitio se mostró como muy alta en la mayoría de los casos.

Palabras clave: Licuación, Evaluación, SPT , $CPTu$, Tarqui, Ecuador

ABSTRACT

The Tarqui zone, located in the city of Manta, in the Ecuadorian province of Manabí, was destroyed due to the earthquake of April 16, 2016 with epicenter near the same province. The earthquake with moment magnitude (M_w) 7.8 triggered the phenomenon of liquefaction and consequently settlements and displacements in the soils of the zone. Based on the 27 borings performed in-situ by the standard penetration test (*SPT*) and the 26 soundings performed by the piezocone test (*CPTu*) the liquefaction potential in Tarqui was evaluated quantitatively in terms of the factor of safety against liquefaction (FS_{liq}), liquefaction potential index (*LPI*) and the liquefaction severity number (*LSN*), vertical settlements (S_{v-1D}) and lateral displacements (*LDI*) were estimated based on the simplified semi-empirical procedures of (Boulanger & Idriss, 2014) through the development of an Excel spreadsheet (JLiq *SPT*). For the *SPT* borings, the liquefaction susceptibility of the fine-grained soils was evaluated; additionally, for the *SPT* and *CPTu* tests, the severity of the liquefaction induced ground damage (*LIGD*) was evaluated based on the methodologies proposed by (Bray & Sancio, 2006) and (Ishihara, 1985), respectively. 11 comparisons of the results obtained from nearby *SPT* and *CPTu* tests were made. Contour maps of the spatial distribution of the *LDI*, *LPI* and *LSN* were made. Site vulnerability of liquefaction was shown to be very high in most cases.

Keywords: Liquefaction, Assessment, *SPT*, *CPTu*, Tarqui, Ecuador

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. Generalidades.....	16
1.2. Antecedentes	18
1.3. Planteamiento del problema.....	20
1.3.1. Formulación del problema.....	21
1.4. Justificación e importancia	21
1.5. Objetivos.....	22
1.5.1. Objetivo general	22
1.5.2. Objetivos específicos.....	22
1.6. Alcance	23
1.7. Área de estudio	24
2. MARCO TEÓRICO.....	27
2.1. Licuación de suelos.....	27
2.1.1. Mecanismo del fenómeno de licuación de suelos.....	28
2.2. Evaluación de potencial de licuación de suelos	30
2.3. Análisis cuantitativo de la licuación de suelos.....	31
2.3.1. Análisis cuantitativo de la licuación de suelos a partir del ensayo SPT	31
2.3.1.1. Suelos granulares	31
2.3.1.2. Suelos finos.....	47
2.3.2. Análisis cuantitativo de la licuación de suelos a partir del ensayo CPTu	49
2.3.2.1. Suelos granulares	49
3. METODOLOGÍA	64
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
4.1. Resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación a partir del ensayo SPT (sismo 16 de abril, 2016).....	66
4.2. Resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación a partir del ensayo CPTu (sismo 16 de abril, 2016).....	73
4.3. Comparación de resultados del análisis cuantitativo de la licuación de suelos de ensayos SPT vs. sondeos CPTu cercanos (sismo 16 de abril, 2016).....	79
4.4. Mapas de valores promedio de LPI , LSN , y LDI en base al SPT y CPTu	83
4.4.1. Mapa de valores promedio de LPI en base al SPT y CPTu (sismo 16 de abril, 2016)	84
4.4.2. Mapa de valores promedio de LSN en base al SPT y CPTu (sismo 16 de abril, 2016)	85
4.4.3. Mapa de valores promedio de LDI en base al SPT y CPTu (sismo 16 de abril, 2016)	86

4.5.	Desarrollo de curvas de casos-historia CSR vs. N160cs y CSR vs. qc	87
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
7.	ANEXOS	96
7.1.	Flujograma del proceso de cálculo del (FSliq) según la metodología de (Boulanger & Idriss, 2014) basado en el ensayo SPT	96
7.2.	Análisis cuantitativo de potencial de licuación individual para P-1 y CPTu-1..	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla # 1. Clasificación del perfil del suelo de acuerdo a la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)	20
Tabla # 2: Planteamiento del problema de investigación.....	21
Tabla # 3. Resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación a partir del ensayo <i>SPT</i> (sismo 16 de abril, 2016).....	67
Tabla # 4: Resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación a partir del ensayo <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016).....	74
Tabla # 5. Comparación de resultados del análisis cuantitativo de la licuación de suelos de ensayos <i>SPT</i> vs. sondeos <i>CPTu</i> cercanos (sismo 16 de abril, 2016). ...	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área considerada para el estudio.	24
Figura 2. Subdivisión del área de estudio en 9 zonas y observaciones de daños en superficie inducidos por licuación en Tarqui. Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016). 25	
Figura 3. Campaña de exploración geotécnica en Tarqui (ensayos <i>SPT</i> y <i>CPTu</i>).	26
Figura 4. Esquema idealizado de los suelos licuables. (1) Antes de un sismo, los granos de suelo individuales se mantienen en su lugar por fuerzas de contacto friccionales o adhesivas, creando una sólida estructura del suelo con agua llenando los espacios entre los granos. Nótese el contacto entre grano y grano. (2) Después de la iniciación de la licuación, el reordenamiento de las partículas sin cambio de volumen (por ejemplo, un desplazamiento lateral de medio diámetro de cada otra fila de partículas en la figura) hace que las partículas pierdan contacto y entren en suspensión, La carga de gravedad se transfiere del esqueleto del suelo al agua de poros. (3) A medida que el agua fluye fuera del suelo, las partículas del suelo se asientan en una configuración más densa, el esqueleto del suelo vuelve a llevar la carga y la presión del agua de poros disminuye (regresa al valor inicial del estado estacionario). Fuente: (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016).....	29
Figura 5. Curvas limite propuestas por (Ishihara, 1985) para la identificación en sitio de daño en la superficie inducido por licuación.	46
Figura 6. Clasificación de la susceptibilidad a la licuación de suelos finos propuesta por (Bray & Sancio, 2006).	48
Figura 7. Resultados de <i>LPI</i> a partir del ensayo <i>SPT</i> (sismo 16 de abril, 2016). .	68

Figura 8. Resultados de <i>LSN</i> a partir del ensayo <i>SPT</i> (sismo 16 de abril, 2016).	68
Figura 9. Resultados de <i>LDI</i> a partir del ensayo <i>SPT</i> (sismo 16 de abril, 2016)..	69
Figura 10. Resultados de <i>Sv – 1D</i> a partir del ensayo <i>SPT</i> (sismo 16 de abril, 2016).	69
Figura 11. Resultados de <i>LIGD</i> a partir del ensayo <i>SPT</i> (sismo 16 de abril, 2016).	70
Figura 12. Resultados de la susceptibilidad de los suelos finos a licuarse a partir del ensayo <i>SPT</i> (sismo 16 de abril, 2016).....	71
Figura 13. Mapa de sondeos <i>SPT</i> según su potencial de licuación.	72
Figura 14. Resultados de <i>LPI</i> a partir del ensayo <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016).	75
Figura 15. Resultados de <i>LSN</i> a partir del ensayo <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016).	75
Figura 16. Resultados de <i>LDI</i> a partir del ensayo <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016).	76
Figura 17. Resultados de <i>Sv – 1D</i> a partir del ensayo <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016).	76
Figura 18. Resultados de <i>LIGD</i> a partir del ensayo <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016).	77
Figura 19. Mapa de sondeos <i>CPTu</i> según su potencial de licuación.....	78
Figura 20. Resultados de <i>LPI</i> a partir de la comparación <i>SPT</i> vs. <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016).	81
Figura 21. Resultados de <i>LSN</i> a partir de la comparación <i>SPT</i> vs. <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016).	82

Figura 22. Resultados de <i>LDI</i> a partir de la comparación <i>SPT</i> vs. <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016).	82
Figura 23. Resultados de <i>Sv – 1D</i> a partir de la comparación <i>SPT</i> vs. <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016).....	82
Figura 24. Mapa de valores promedio de <i>LPI</i> en base al <i>SPT</i> y <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016). Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).....	84
Figura 25. Mapa de valores promedio de <i>LSN</i> en base al <i>SPT</i> y <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016). Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).	85
Figura 26. Mapa de valores promedio de <i>LDI</i> en base al <i>SPT</i> y <i>CPTu</i> (sismo 16 de abril, 2016). Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).	86
Figura 27. Curvas de casos-historia CSR vs. <i>N160cs</i> desarrolladas para Tarqui. Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).	87
Figura 28. Curvas de casos-historia CSR vs. <i>qc1Ncs</i> desarrolladas para Tarqui. Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).	88
Figura 29. Convención de la simbología usada en el flujograma.	97
Figura 30. P.1 Flujograma del proceso de cálculo del (<i>FSliq</i>) según la metodología de (Boulangier & Idriss, 2014) basado en el ensayo <i>SPT</i>	98
Figura 31. P.2 Flujograma del proceso de cálculo del (<i>FSliq</i>) según la metodología de (Boulangier & Idriss, 2014) basado en el ensayo <i>SPT</i>	99
Figura 32. P.3 Flujograma del proceso de cálculo del (<i>FSliq</i>) según la metodología de (Boulangier & Idriss, 2014) basado en el ensayo <i>SPT</i>	100
Figura 33. P.3 Flujograma del proceso de cálculo del (<i>FSliq</i>) según la metodología de (Boulangier & Idriss, 2014) basado en el ensayo <i>SPT</i>	101
Figura 34. Análisis cuantitativo de potencial de licuación P-1.	102

Figura 35. Análisis cuantitativo de potencial de licuación CPTu-1. 103

SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

$(N_1)_{60}$ N_{60} corregido por presión de confinamiento	36
$(N_1)_{60cs}$ $(N_1)_{60}$ corregido por FC	36
BPT prueba de penetración de Becker	31
C_B factor de corrección por diámetro del pozo de perforación	35
C_E factor de corrección por ER	35
C_N factor de corrección por presión de confinamiento	36
cota elevación del terreno.....	32
CPT prueba de penetración cónica.....	31
CPTu ensayo de penetración de piezocono.....	5
C_R factor de corrección por logitud de barra.....	35
CRR razón de resistencia cíclica.....	38
C_S factor de corrección por tipo de muestrador	35
CSR razón de esfuerzo cíclico	33
ER porcentaje de energía aplicada al martillo.....	32
FC porcentaje de contenido de finos.....	33
FS_{liq} factor de seguridad a la licuación	5
GPS sistema de posicionamiento global	32
I_c índice de tipo de comportamiento de suelo	52
K_σ factor de corrección por esfuerzo de sobre carga vertical efectivo.....	39
LDI índice de desplazamiento lateral.....	5
LIGD daño inducido por licuación en el terreno	5, 23
LL límite líquido	40
LPI índice de pontencial de licuación	5

LSN número de severidad de licuación	5
MSF factor de escala de magnitud	38
M_w magnitud de momento del sismo	5
N.F. profundidad del nivel freático	32
N_{60} N_{SPT} corregido equivalente a 60 ciclos de carga	34
N_{SPT} número de golpes medidos en el ensayo SPT.....	32
P_a presión atmosférica.....	36
q_c resistencia de punta de cono	51
r_d coeficiente de reducción de esfuerzo.....	34
SPT ensayo de penetración estándar	5
S_{v-1D} asentamiento uni-dimensional por reconsolidación debido a licuación	5
T_e período elástico del suelo	20
u presión de poros	27
V_s velocidad de onda de corte	20
wc porcentaje de contenido de humedad	33
z profundidad de la muestra	32
σ'_v esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo	34
σ_v esfuerzo de sobrecarga vertical total.....	34

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Los suelos son materiales complejos que presentan un amplio rango de comportamientos mecánicos relacionados con su composición y estructura, el historial de tensiones, la densidad y las características de las fuerzas que le son aplicadas. La clasificación de los suelos según las fuerzas inter-granulares o atractivas y su efecto en el comportamiento mecánico es: suelos cohesivos y suelos no cohesivos (o granulares). En suelos cohesivos (arcillas y limos), las fuerzas inter-granulares tienen un efecto significativo en el comportamiento mecánico y en los suelos no cohesivos (rocas, gravas y arenas) las fuerzas inter-granulares o atractivas tienen un efecto despreciable en el comportamiento mecánico. Adicionalmente estos últimos son caracterizados en función de la densidad relativa, del índice de vacíos o del índice de porosidad como materiales densos o sueltos (Wood, 1991).

Los suelos están constituidos por un entramado de partículas sólidas, rodeadas de vacíos interconectados que pueden estar ocupados por aire y agua. Cuando el volumen de vacíos está ocupado por agua se denomina suelo saturado. Si un suelo no cohesivo saturado es sometido a sollicitaciones cíclicas se producen tensiones de corte que llevan a que se produzca el fenómeno de licuación, es decir, el suelo pierde bruscamente su resistencia mecánica ante una carga dinámica rápida como puede ser un sismo.

La pérdida de resistencia mecánica del suelo causada por la licuación produce un comportamiento momentáneo similar al del flujo de un fluido ocasionando importantes deformaciones en el terreno. En zonas que se

encuentran próximas a cuerpos de agua como son ríos, lagos o lagunas, bordes costeros o suelos con un nivel freático muy superficial y zonas de humedales están presentes los suelos arenosos saturados en agua, o de baja compactación. Por tanto, las estructuras allí cimentadas son propensas a hundimientos o asentamientos diferenciales en caso de un movimiento sísmico (Idriss & Boulanger, 2008).

El día 16 de abril de 2016 un sismo de magnitud de momento de 7.8 grados se registró en Ecuador causando grandes pérdidas humanas y el colapso de obras civiles, entre ellas viviendas, la red vial y parte del servicio de agua potable y alcantarillado. Su epicentro fue localizado cercano a la provincia de Manabí, dentro de la cual se encuentra la zona Tarqui, en la ciudad de Manta. Tarqui constituía una parte importante del sector comercial de Manta con su gran cantidad de edificios, hoteles y locales.

El suelo de Tarqui posee predominantemente depósitos arenosos saturados. Se evidenció en la exploración del sitio que estos depósitos fueron licuados. Es por esta razón que se plantea el proyecto de evaluar el potencial de licuación del suelo de la zona. El presente estudio se propone analizar cuantitativamente el fenómeno de licuación y sus efectos como asentamientos y desplazamientos laterales en el área de Tarqui, para así caracterizar geográficamente las posibles zonas de similar comportamiento dinámico del área de Tarqui, consiguiendo generar una base de datos para el correcto diseño sismo-resistente de las futuras estructuras sobre el sitio.

La evaluación del potencial de licuación del suelo será realizada haciendo uso de la metodología ampliamente utilizada propuesta por (Boulanger & Idriss,

2014) basada en los métodos de perforación *SPT* y *CPTu* mediante el procesamiento matemático de los datos de caracterización geológica y geotécnica del suelo del sitio, así como el comportamiento dinámico del suelo bajo la acción del sismo en el área de estudio estimado por el análisis de respuesta de sitio. Los datos obtenidos en la exploración del sitio llevada a cabo en el proyecto “Estudio geotécnico y de riesgo sísmico para lotes ubicados en el barrio Tarqui de la ciudad de Manta”, de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015, a cargo de la empresa (GEOESTUDIOS, 2016) bajo contrato del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) permitirán modelar cuantitativamente el potencial de la licuación del suelo.

1.2. Antecedentes

El Ecuador se encuentra sobre el cinturón de fuego del pacífico, zona de convergencia de placas tectónicas caracterizada por su alta actividad sísmica. Esto se evidenció el día 16 de abril de 2016, un sismo de magnitud de momento (M_w) de 7.8 grados sacudió Ecuador causando graves daños. Su epicentro estuvo ubicado cercano a la provincia de Manabí, dentro de la cual se encuentra la zona Tarqui, en la ciudad de Manta, zona que constituía una parte importante del sector comercial de Manta y que actualmente se encuentra destruida. El sismo afectó en gran medida la infraestructura vial, redes de servicios básicos y edificaciones de la zona de Tarqui, alterándose el sistema urbano preexistente tanto en la edificabilidad y viabilidad como en las dinámicas productivas y sociales.

El suelo de Tarqui posee predominantemente depósitos arenosos saturados, los cuales se evidenció en la exploración del suelo del sitio que fueron licuados. El colapso posterior al sismo de obras civiles debido a este fenómeno demuestra

el déficit histórico de estudios de licuación de suelos en Tarqui, en parte debido a la inexistencia previa de una norma de construcción cuyo cumplimiento requiera de una evaluación del potencial de licuación en los suelos o a que no se ha coordinado adecuadamente el trabajo de expertos en el tema para determinar y hacer permanente seguimiento a la problemática de licuación de suelos. Hoy en día se cuenta con la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015) que exige el correcto estudio de riesgo sísmico de suelos en obras civiles que lo ameriten, la evaluación del potencial de licuación y el análisis de respuesta de sitio son requisitos fundamentales según la norma para los tipos de suelos que posee Tarqui (tipo de perfil de suelo F1), como se muestra en la Tabla # 1.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ Kpa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50$ kPa
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50$ kPa
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1 —Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2 —Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3 —Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75)	
	F4 —Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30m)	

F5 —Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.
F6 —Rellenos colocados sin control ingenieril.

Tabla # 1. Clasificación del perfil del suelo de acuerdo a la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Teniendo en cuenta que la NEC-15 establece requisitos específicos adicionales inherentes a los suelos de tipo F como es el caso del análisis de respuesta dinámica del sitio y su potencial de licuación, es importante saber que la realización de estos análisis conlleva a la necesidad de ensayos adicionales como es el caso de la adquisición de sísmica de refracción, medición de periodos elásticos del suelo (T_e) usando el método de Nakamura y métodos de ondas superficiales para medición de velocidad de onda de corte (V_s).

1.3. Planteamiento del problema

Se lo presenta por medio de la tabla del planteamiento del problema.

Consiste en determinar los síntomas, causas, consecuencias, pronóstico y control de la temática a tratar, como se muestra en la Tabla # 2:

Síntomas	Causas	Consecuencias	Pronóstico	Control del pronóstico
Evaluación previa de licuación en Tarqui inexistente.	Incoordinación del trabajo de expertos en el tema para determinar y hacer permanente seguimiento a la problemática de licuación de suelos	Construcción de obras en espacios inapropiados. Utilización de técnicas de cimentación inapropiadas.	Se evaluará el potencial de la licuación del suelo en la zona de Tarqui de la ciudad de Manta, mediante el ensayo de penetración estándar SPT y de piezocono CPTu, aplicando el método simplificado de (Boulanger & Idriss, 2014) para prevenir y mitigar los catastróficos efectos que tiene la licuación sobre la resistencia mecánica los suelos.	Determinar las características geológicas y geotécnicas del suelo que se encuentra en la zona de estudio. Calcular el factor de seguridad de licuación de los estratos de suelo; calcular el índice de potencial de licuación y el número de severidad de licuación de las columnas de suelo a partir de los datos de exploración de suelo obtenidos en el proyecto
Construcción de obras civiles cimentadas sobre suelos que se desconocía que son altamente licuables.	Vigencia de la Norma Ecuatoriana de la Construcción a partir del año 2015, posterior a la construcción de la mayoría de obras sobre la ciudad.	Desplome y destrucción de obras, así como gran pérdida de vidas humanas a causa de la acción del sismo de abril del 2016 sobre los suelos licuables del sector.		
Alta probabilidad de recurrencia de un sismo de	Ubicación del Ecuador en el cinturón del fuego del Pacífico,	Alto peligro de falla de resistencia al esfuerzo		

gran magnitud en la costa del Ecuador	conocido por su alta sismicidad debido a la configuración de las placas tectónicas sobre las cuales se ubica.	impuesto sobre los suelos de Tarqui. Asentamientos y comportamiento licuado del suelo bajo cargas cíclicas como las presenciadas durante el sismo de abril del 2016.		“Microzonificación sísmica de Tarqui”.
Licuación evidenciada en la exploración de los suelos arenosos de Tarqui.	Presencia de suelo granular suelto predominantemente arenoso y saturado debido a su cercanía con el mar.			

Tabla # 2: Planteamiento del problema de investigación

1.3.1. Formulación del problema

Para la Ingeniería Civil reviste de gran importancia el estudio del comportamiento del suelo debido a que este es la base de toda obra civil, por lo tanto ¿ la construcción de una base de datos a partir del estudio del potencial de licuación de suelos arenosos en la zona de Tarqui en la ciudad de Manta, podrá servir como referente en el diseño sismo-resistente de cimentaciones para futuras estructuras permitiendo reducir los daños o colapsos de estas en caso de movimientos sísmicos?

1.4. Justificación e importancia

Toda obra civil cimentada sobre el suelo demanda el estudio geotécnico, geológico y geofísico del mismo para prevenir efectos a corto y largo plazo de falla por capacidad estructural del mismo, evitando así la pérdida de vidas humanas debido al colapso de las estructuras ante cargas dinámicas como las de un sismo. El sismo de abril de 2016 en la zona de Tarqui, el cual provocó el desencadenamiento del fenómeno de licuación del suelo del sitio, fue una lamentable demostración de la importancia de realizar estos estudios. Estudios que exige la actualmente vigente (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

El objeto de la investigación es estudiar el fenómeno de licuación y determinar las zonas de Tarqui que son susceptibles al mismo ante la presencia de un sismo, mediante ensayos de exploración del suelo y ensayos de laboratorio con los cuales se obtendrán parámetros geo-mecánicos a partir de los cuales poder analizar con los criterios adoptados el potencial de licuación.

El presente proyecto pretende que con el uso de la información del estudio propuesto se dé un mayor interés por el análisis de licuación en suelos del Ecuador, así como brindar un soporte técnico a las autoridades encargadas de futuras obras civiles a construirse en el sitio de Tarqui.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar el potencial de licuación de suelos en la zona de Tarqui, ciudad de Manta, Ecuador.

1.5.2. Objetivos específicos

- Identificar las características geológicas, topográficas y geotécnicas del suelo de Tarqui.
- Determinar los factores de seguridad contra la licuación, el índice de potencial de licuación, el número de severidad de licuación y la severidad del daño inducido por licuación en el terreno de los suelos explorados de la zona de Tarqui.
- Estimar los asentamientos verticales y desplazamientos laterales del suelo post-licuación.

- Elaborar mapas de contorno de la distribución espacial del índice de desplazamiento lateral (*LDI*), índice de potencial de licuación (*LPI*) y número de severidad de licuación (*LSN*) de los suelos de Tarqui.

1.6. Alcance

En el proyecto “Estudio geotécnico y de riesgo sísmico para lotes ubicados en el barrio Tarqui de la ciudad de Manta de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015”, a cargo de la empresa (GEOESTUDIOS, 2016) bajo contrato del MIDUVI se realizó la respectiva exploración de los sub-suelos del sitio de Tarqui. Se recopilaron los datos obtenidos a partir de los 27 ensayos de penetración estándar *SPT* y los 26 sondeos de piezocono *CPTu* realizados.

A partir de los datos obtenidos en base a la exploración del sub-suelo del sitio y el respectivo análisis de respuesta sísmica del mismo, aplicando el método simplificado de (Boulangier & Idriss, 2014), se procederá a modelar el potencial de la licuación del suelo. Para tal fin se propone identificar las características geológicas, topográficas, dinámicas y geotécnicas del suelo de Tarqui para así poder determinar los factores de seguridad contra la licuación (FS_{liq}), el índice de potencial de licuación (*LPI*), el número de severidad de licuación (*LSN*) y la severidad del daño inducido por licuación en el terreno (*LIGD*) de los suelos. Para los ensayos *SPT*, se determinará la susceptibilidad de los suelos finos a licuarse; adicionalmente, para los ensayos *SPT* y *CPTu*, se evaluará la severidad del daño inducido por licuación en el terreno (*LIGD*) en base a las metodologías de (Bray & Sancio, 2006) e (Ishihara, 1985), respectivamente. Finalmente, se propone elaborar comparaciones de los resultados obtenidos de los ensayos *SPT* y *CPTu*

cercanos y por último elaborar mapas de contorno de la distribución espacial del *LDI*, *LPI* y *LSN*.

1.7. Área de estudio

La ciudad de Manta limita al norte y al oeste con el océano Pacífico, al sur con el cantón Montecristi, y al este con los cantones Montecristi y Jaramijó, su ubicación es estratégica para el ingreso de todo tipo de embarcaciones, ya que se encuentra en el centro del litoral ecuatoriano y cuenta con un puerto de aguas profundas, convirtiéndose en una de las ciudades de mayor importancia para el país.

Dentro de los barrios más importantes para el desarrollo económico de la ciudad se encuentra el barrio Tarqui, que será objeto del presente estudio y cuya ubicación se muestra en la Figura 1.

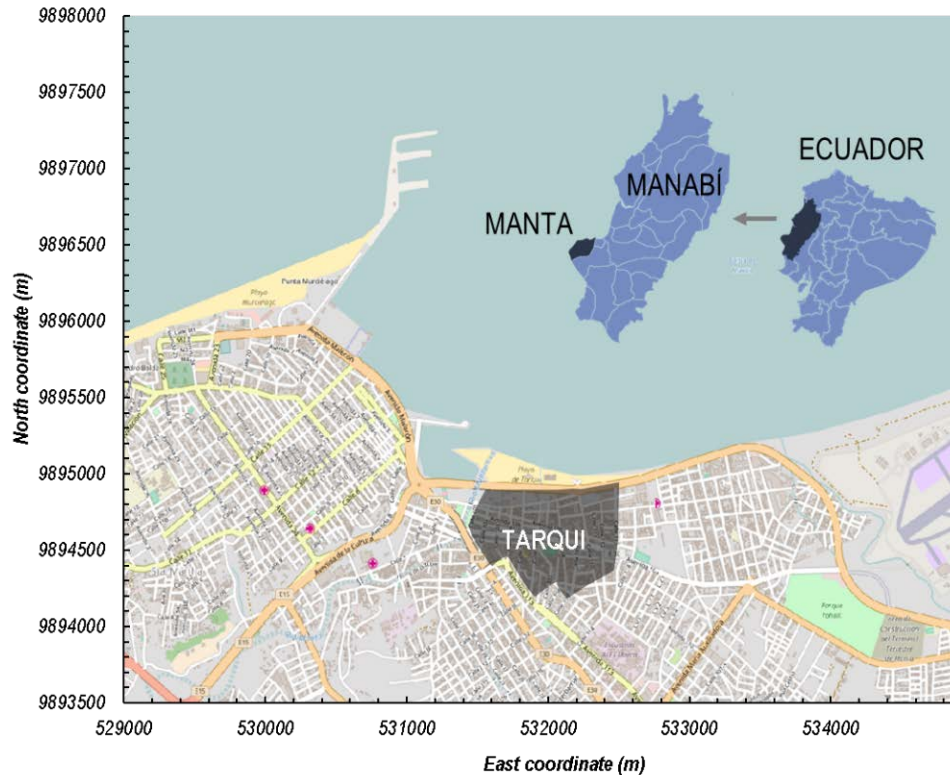


Figura 1. Área considerada para el estudio.

De acuerdo al alcance contractual del proyecto (Estudio geotécnico y de riesgo sísmico para lotes ubicados en el barrio Tarqui de la ciudad de Manta, 2016) se generó la necesidad, para una mejor coordinación del proyecto, de ampliar dicho estudio a 9 zonas del sector Tarqui, zonas que cubren un área total de aproximadamente 89 hectáreas de estudio.

Dentro de las 9 zonas se observó evidencias de haberse producido el fenómeno de licuación, desde grietas hasta brotes en la superficie por eyección de arena (conocidos también como volcanes de arena). La distribución espacial de las 9 zonas de estudio de Tarqui, así como evidencia fotográfica de las secuelas características del fenómeno de licuación observadas en la superficie del sitio se muestran en la Figura 2.

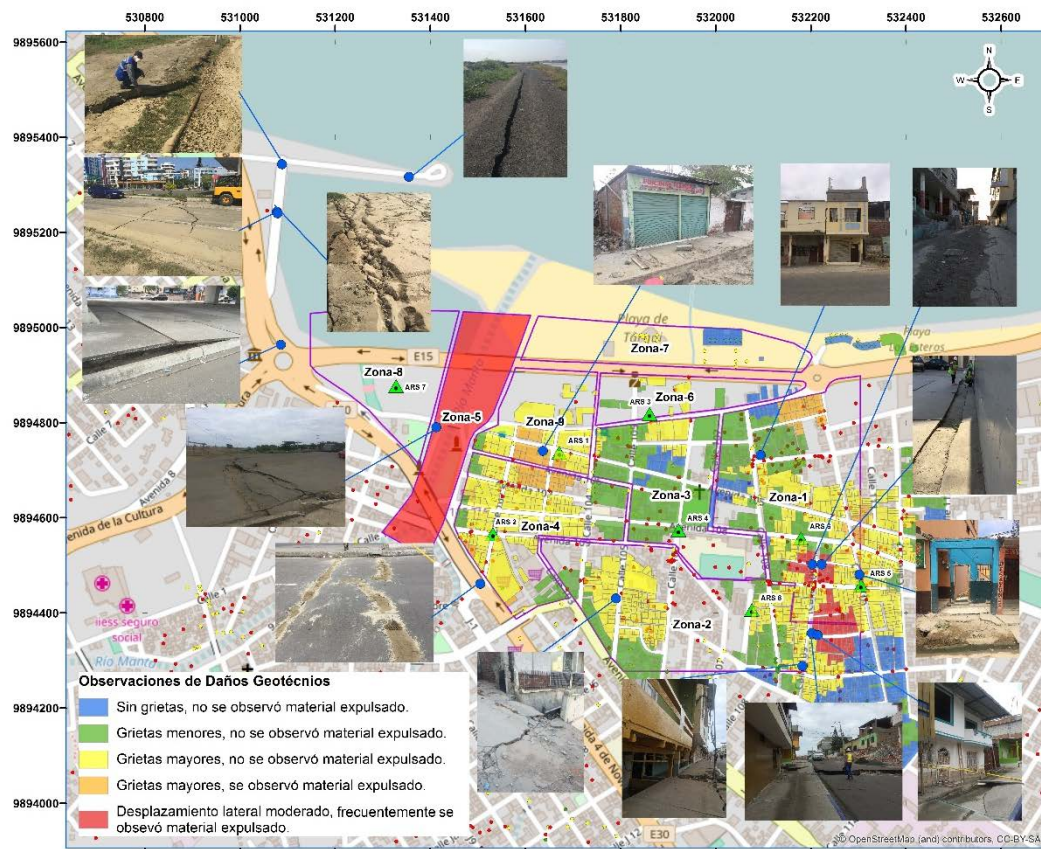


Figura 2. Subdivisión del área de estudio en 9 zonas y observaciones de daños en superficie inducidos por licuación en Tarqui. Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).

La distribución espacial de las 27 perforaciones *SPT* (color azul) y 26 sondeos *CPTu* (color rojo) se muestra a continuación en la campaña de exploración geotécnica (Figura 3), prestar especial atención a la cercanía de algunas perforaciones *SPT* con algunos sondeos *CPTu*.

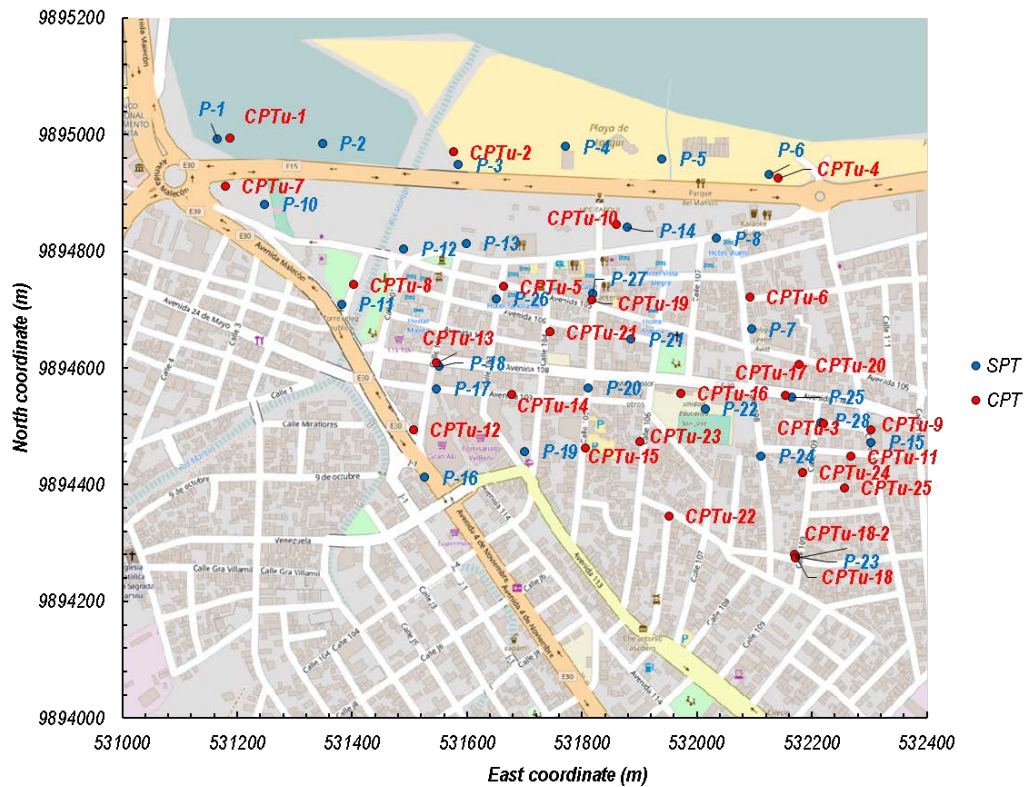


Figura 3. Campaña de exploración geotécnica en Tarquí (ensayos *SPT* y *CPTu*).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Licuación de suelos

El fenómeno de licuación ha sido ampliamente observado durante numerosos sismos. La licuación ocurre generalmente debido a la imposición rápida de una carga durante eventos sísmicos donde no hay suficiente tiempo para la disipación del exceso de presión de poros (u) a través del drenaje natural. Una situación de imposición rápida de carga aumenta la presión de poros resultando en un ablandamiento cíclico en materiales de grano fino y una transformación de los materiales granulares de un estado sólido a licuado. La resistencia al corte y la rigidez de los depósitos del suelo se reducen debido al aumento de la presión de poros. La licuación se observa en las arenas sueltas, saturadas y limpias a limosas. En el caso de los suelos finos se denomina ablandamiento cíclico.

Una definición técnica y comúnmente aceptada del fenómeno de licuación es:

La licuación es un fenómeno en el cual una masa de suelo pierde un gran porcentaje de su resistencia al corte, cuando se somete a carga monótona, cíclica o de impacto y fluye de una manera semejante a un líquido hasta que los esfuerzos de corte que actúan sobre la masa son tan bajos como la resistencia al corte reducida de la misma (Sladen, D'Hollander, & Krahn, 1985).

La licuación del suelo depende de la magnitud del sismo, la intensidad y duración del movimiento del suelo, la distancia a la fuente del sismo, las condiciones específicas del sitio, la aceleración del suelo, el tipo de suelo y el grosor del depósito, la densidad relativa, distribución granulométrica, el contenido

de finos, la plasticidad de los finos, el grado de saturación, la presión de confinamiento, las características de permeabilidad de la capa del suelo, la posición y las fluctuaciones de la capa de nivel freático, la reducción del esfuerzo efectivo y la degradación del módulo de corte (Youd & Idriss, 2001).

La falla del terreno inducida por licuación está influenciada por el espesor de las capas de suelo no licuado y licuado (Ishihara, 1985). Las medidas para mitigar los daños causados por la licuación requieren una evaluación precisa del potencial de licuación de los suelos.

2.1.1. Mecanismo del fenómeno de licuación de suelos

La licuación resulta de la tendencia de la estructura granular de un suelo saturado a colapsarse y contraerse, o densificarse, cuando se somete a una carga cíclica (es decir, a la aplicación de esfuerzos de corte repetidos) causada por el movimiento de un sismo. Antes de la licuación, las fuerzas de contacto entre los granos del suelo proporcionan la rigidez y la resistencia de un suelo saturado (Figura 4.1). La tendencia a la contracción de la estructura del suelo (o esqueleto del suelo) conduce a una transferencia de la carga que había sido transportada por la estructura granular al agua de poros llenando los vacíos entre granos de suelo individuales, dando lugar a un aumento de la presión del agua de poros. Cuando la presión del agua de poros aumenta, las fuerzas de contacto entre los granos se reducen, el suelo se deforma más fácilmente y, en el caso limitante, las partículas del suelo pueden perder contacto completamente entre sí y entrar en suspensión (Figura 4.2).

Cuanto más suelto se encuentre el suelo, mayor es el potencial de contracción bajo una carga cíclica y más fácil es que el suelo se licúe.

La pérdida de la resistencia del suelo asociada a la licuación puede dar lugar a grandes deformaciones del suelo y a la incapacidad del suelo licuado para soportar materiales superpuestos, incluidas las estructuras civiles.

La Figura 4 ofrece una descripción simplificada del fenómeno de licuación y no debe interpretarse como sugerencia de que la densidad del suelo siempre aumenta después de que el suelo se licue. El flujo ascendente debido a las presiones de agua de poros generado por el sismo puede soltar los suelos de tal manera que incluso después del reasentamiento, la densidad del suelo es menor de lo que era inicialmente. En algunos casos, el flujo lateral después de una licuación del suelo también puede resultar en una reducción de la densidad del suelo debido a un fenómeno llamado dilatación, en el que un suelo se expande en volumen cuando se carga bajo esfuerzos de corte.

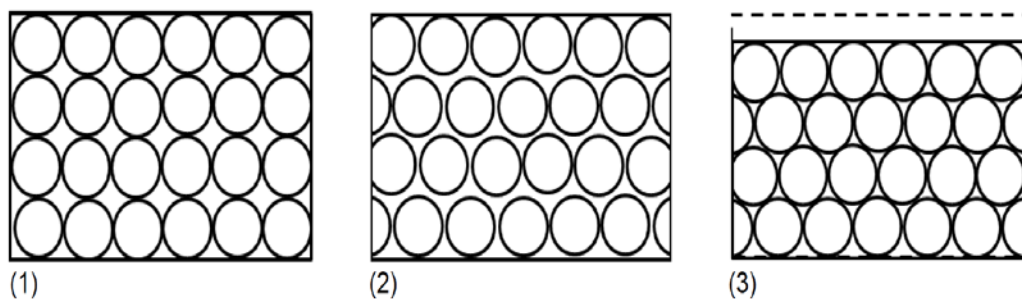


Figura 4. Esquema idealizado de los suelos licuables. (1) Antes de un sismo, los granos de suelo individuales se mantienen en su lugar por fuerzas de contacto friccionales o adhesivas, creando una sólida estructura del suelo con agua llenando los espacios entre los granos. Nótese el contacto entre grano y grano. (2) Después de la iniciación de la licuación, el reordenamiento de las partículas sin cambio de volumen (por ejemplo, un desplazamiento lateral de medio diámetro de cada otra fila de partículas en la figura) hace que las partículas pierdan contacto y entren en suspensión. La carga de gravedad se transfiere del esqueleto del suelo al agua de poros. (3) A medida que el agua fluye fuera del suelo, las partículas del suelo se asientan en una configuración más densa, el esqueleto del suelo vuelve a llevar la carga y la presión del agua de poros disminuye (regresa al valor inicial del estado estacionario). Fuente: (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016).

2.2. Evaluación de potencial de licuación de suelos

La licuación de un suelo puede incrementar substancialmente el costo de un proyecto civil, si la licuación no es reportada a tiempo, puede haber una incorrecta asignación de fondos y recursos dentro del desarrollo del mismo. Por ejemplo, si el suelo es erróneamente asumido como licuable, el encargado del proyecto se verá forzado a implementar un diseño preliminar de cimentaciones con pilas de diámetros sobre-dimensionados y a profundidades excesivas o incluso puede llevar a un movimiento de tierras innecesario. De igual manera, si se asume erróneamente que no existirá licuación durante la acción de un sismo, el diseño propuesto no será seguro.

Las investigaciones preliminares (fase de planeación) del proyecto civil con respecto a la evaluación del potencial de licuación de los suelos consisten en evaluar cualitativamente, utilizando información existente para el sitio, el potencial de licuación del mismo. De ser el potencial de licuación desconocido o indeterminable, el tipo de cimentación a usarse puede ser la incorrecta o la menos óptima en cuanto a costos.

Si las investigaciones preliminares (fase 1) concluyen en que existe un potencial substancial de que los suelos en el sitio se licuen, entonces se debe acudir a la siguiente fase que consiste en la exploración del subsuelo del sitio (fase 2) para reducir o eliminar el nivel de incertidumbre asociado a la evaluación preliminar de licuación.

Una vez realizadas las exploraciones en campo del subsuelo y los ensayos de laboratorio respectivos (de ser necesarios) se procede finalmente a realizar los

análisis cuantitativos del potencial de licuación (fase 3) a partir de la o las metodologías escogidas.

Cada una de las 3 fases a considerar durante el análisis de potencial de licuación de un sitio son de gran importancia, el propósito de este texto es describir la fase 3, correspondiente al análisis cuantitativo del potencial de licuación.

2.3. Análisis cuantitativo de la licuación de suelos

El análisis cuantitativo de la licuación se basa en los datos recopilados a partir de la exploración del subsuelo del sitio y los datos obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio correspondientes para determinar la susceptibilidad de un suelo a licuarse conocida como potencial de licuación. En estos análisis es común el uso de correlaciones, (Altares, y otros, 2003) definen a una correlación como una herramienta estadística para medir la asociación entre dos o más variables cuantitativas.

El análisis cuantitativo del potencial de licuación de un suelo se puede calcular en base a varias pruebas in situ tales como la prueba de penetración estándar *SPT*, la prueba de penetración cónica (*CPT*) o de piezocono *CPTu*, la prueba de penetración de Becker (*BPT*) y la prueba de velocidad de onda cortante V_s (Youd & Idriss, 2001).

2.3.1. Análisis cuantitativo de la licuación de suelos a partir del ensayo *SPT*

2.3.1.1. Suelos granulares

Para evaluar el potencial de licuación de las capas de suelo con partículas predominantemente granulares a partir del ensayo *SPT* se utiliza el procedimiento de (Boulangier & Idriss, 2014). Se debe tener en cuenta que el análisis se realiza

para cada una de las muestras obtenidas a lo largo de toda la profundidad de la perforación.

Previo a la realización del cálculo, es necesario llevar a cabo la exploración del subsuelo del sitio y ensayos de laboratorio, si así corresponde; además del análisis de respuesta de sitio que permite definir los datos sismológicos de entrada. Los datos obtenidos son los datos de entrada para el cálculo del análisis cuantitativo de potencial de licuación de la columna de suelo.

El procedimiento previo al cálculo, llevado a cabo durante la exploración del subsuelo en acuerdo con la normativa (ASTM D1586 - 11), consiste en los siguientes pasos generales:

1. Obtener las coordenadas geográficas del punto donde se realizó la perforación.
2. Medir la elevación del terreno (*cota*) y la profundidad del nivel freático (*N.F.*) en el sitio de la perforación por medio de la topografía del sitio o, de no disponerla, por medio del uso del sistema de posicionamiento global (*GPS*).
3. Registrar el diámetro del pozo de excavación, el porcentaje de nivel de energía (*ER*) aplicada al martillo, la extensión de barra sobre el terreno. y por último si se utilizó o no alineadores de muestreador.
4. Medir el número de golpes (N_{SPT}) de cada muestra, así como su profundidad (*z*).

El procedimiento previo al cálculo, llevado a cabo por medio de los ensayos de laboratorio, consiste en los siguientes pasos generales:

1. Medir el porcentaje de contenido de finos (FC) de la muestra de acuerdo a la normativa (ASTM D422-63) para así identificar cuáles son las capas de suelo a evaluar en el análisis. Descartando las muestras de suelos finos y de suelos no saturados.
2. De ser suelos finos, determinar los límites de Atterberg así como el contenido de humedad (w_c) de la muestra respetando las normativas (ASTM D4318 - 10) y (ASTM D2216 - 10), respectivamente. Estos valores serán de utilidad para evaluar posteriormente la susceptibilidad de los suelos finos a licuarse.

Es importante así mismo determinar la magnitud de momento M_w y aceleración horizontal máxima PGA del sismo de diseño para cada una de las zonas del sitio de estudio mediante el análisis de respuesta de sitio correspondiente.

Una vez realizados los pasos generales previos, se procede al cálculo de los siguientes factores:

2.3.1.1.1. Razón de esfuerzo cíclico (CSR)

La razón de esfuerzo cíclico (CSR) inducido por el sismo, a una dada profundidad z , es calculada usando el método de (Seed & Idriss, 1971):

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d$$

Donde:

CSR_{M,σ'_v} CSR para una magnitud M y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo σ'_v

0.65 Factor de ponderación, introducido por (Seed & Idriss, 1971), para calcular el número de ciclos de esfuerzo uniforme requerido para

producir el mismo aumento de presión de poros de agua que un movimiento de terreno irregular de un sismo

σ_v	Esfuerzo de sobrecarga vertical total
σ'_v	Esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo
a_{max}	Aceleración horizontal pico en el terreno como coeficiente de la gravedad (<i>PGA</i>)
r_d	Coeficiente de reducción de esfuerzo calculado por la siguiente ecuación:

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 - 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

Donde:

M	Magnitud de momento del sismo
z	Profundidad desde el nivel de terreno

2.3.1.1.2. Corrección de número de golpes del ensayo SPT (N_{SPT})

Debido a la variabilidad, sensibilidad e incertidumbre del ensayo SPT, los valores sin corregir de N_{SPT} tienen el potencial de proveer determinaciones erróneas del riesgo de licuación. Es por esto que los valores de N_{SPT} deben corregirse (normalizarse) para varios factores, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$N_{60} = C_E C_B C_R C_S N_m$$

Donde:

N_{60}	N_{SPT} corregido equivalente a 60 ciclos de carga
----------	--

C_E Factor de corrección por energía del martillo calculado como:

$$C_E = \frac{ER_m}{60}$$

Donde:

ER_m Razón de energía medida como un porcentaje del máximo teórico

C_B Factor de corrección por diámetro del pozo de perforación

Diámetro de 65-115 mm. $C_B = 1.00$

Diámetro de 115 mm. $C_B = 1.05$

Diámetro de 200 mm. $C_B = 1.15$

(Skempton, 1986)

C_R Factor de corrección por longitud de barra

Se lo determina a partir de (Tolga, 2014), quien propone en su tesis doctoral tomar en cuenta los efectos de “barra corta”. La ecuación propuesta es la siguiente:

$$C_R = 1 - 0.36e^{(-0.085*L)}$$

Donde:

L Longitud de barra total, desde el punto de impacto del martillo hasta la base del muestreador.

C_S Factor de corrección por muestreador con o sin alineadores de muestra

Para muestreador de cuchara partida sin espacio para alineadores:

$$C_S = 1$$

Para muestreador de cuchara partida con espacio para alineadores,
pero con los mismos ausentes:

$$C_S = 1.1 \quad (N_1)_{60} \leq 10$$

$$C_S = 1 + [(N_1)_{60}/100] \quad 10 \leq (N_1)_{60} \leq 30$$

$$C_S = 1.3 \quad (N_1)_{60} \geq 30$$

N_m Número de golpes N_{SPT} medidos en campo

2.3.1.1.3. Corrección del número de golpes equivalente por presión de confinamiento

La resistencia a la penetración debe ser corregida al valor equivalente que se hubiera obtenido en una arena idéntica si el esfuerzo efectivo hubiera sido igual a 1 atmósfera como se muestra en la siguiente ecuación:

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

Donde:

$(N_1)_{60}$ Resistencia a la penetración corregida por presión de confinamiento

C_N Factor de corrección por presión de confinamiento calculado como:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^{0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 1.7; (N_1)_{60} \leq 46$$

Donde:

P_a Presión atmosférica de 1 atm. equivalente a 101 kPa

σ'_v Esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo

$(N_1)_{60cs}$ $(N_1)_{60}$ corregido por contenido de finos

N_{60} N_{SPT} corregido equivalente a 60 ciclos de carga

El cálculo de C_N mediante estas expresiones requiere del uso de iteración numérica, debido a que el valor de $(N_1)_{60}$ depende del valor de C_N y viceversa.

Esta iteración puede realizarse con más facilidad con el uso de una hoja de cálculo en *Microsoft Office Excel*.

2.3.1.1.4. Corrección por contenido de finos

Las ecuaciones de la razón de resistencia cíclica (*CRR – Cyclic Resistance Ratio*) están diseñadas para su uso en arenas limpias. Es por esto que en los suelos que contienen finos como limos o arcillas el valor $(N_1)_{60}$ se debe corregir para el contenido de finos del suelo. Para entenderlo de mejor manera, se podría decir que el suelo que contiene finos es más resistente a la licuación que un suelo que no los contiene, y por lo tanto su número de golpes debería corregirse de tal manera que resulte en un valor mayor, representativo de una mayor resistencia. La ecuación para la corrección por contenido de finos es la siguiente:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

Donde:

$(N_1)_{60cs}$ $(N_1)_{60}$ corregido por contenido de finos

$(N_1)_{60}$ Resistencia a la penetración corregida por presión de confinamiento

$\Delta(N_1)_{60}$ Corrección por contenido de finos dada por la ecuación:

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01}\right)^2\right)$$

Donde:

FC Porcentaje de contenido de finos

2.3.1.1.5. Razón de resistencia cíclica (*CRR*)

La razón de resistencia cíclica (*CRR*) representa la máxima razón de esfuerzo cíclico (*CSR*) a la cual un suelo puede resistir licuación. La ecuación para calcular la *CRR* es la siguiente:

$$CRR_{M,\sigma'_v} = CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

Donde:

CRR_{M,σ'_v} *CRR* corregida para una magnitud *M* y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo σ'_v

$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1}$ *CRR* normalizada a una magnitud $M = 7.5$ y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo $\sigma'_v = 1 \text{ atm}$. Se lo calcula por medio de la siguiente expresión:

$$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.80\right)$$

Donde:

$(N_1)_{60cs}$ $(N_1)_{60}$ corregido por contenido de finos

MSF Factor de escala de magnitud (*MSF* – *Magnitud Scaling Factor*) utilizado para tener en cuenta los efectos de duración (es decir, el número y las amplitudes relativas de los ciclos de carga). Se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left(8.64 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 1.325\right)$$

Donde:

MSF Factor de escala de magnitud

M Magnitud de momento del sismo

MSF_{max} Factor de escala de magnitud máximo, calculado por:

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{31.5} \right)^2 \leq 2.2$$

Donde:

$(N_1)_{60cs}$ $(N_1)_{60}$ corregido por contenido de finos

K_σ Factor de corrección por esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right) \leq 1.1$$

Donde:

σ'_v Esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo

P_a Presión atmosférica de 1 atm. equivalente a 101 kPa

C_σ Coeficiente calculado por medio de la siguiente expresión:

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3$$

Donde:

$(N_1)_{60cs}$ $(N_1)_{60}$ corregido por contenido de finos

El coeficiente C_σ se puede limitar a su valor máximo de 0.3 restringiendo el valor de $(N_1)_{60cs} \leq 37$

2.3.1.1.6. Factor de seguridad a la licuación (FS_{liq})

El potencial de licuación que se produce a cierta profundidad en una columna de suelo se cuantifica en términos de los factores de seguridad contra la

licuación (FS_{liq}). (Seed & Idriss, 1971) propusieron un procedimiento simplificado para evaluar la resistencia a la licuación de los suelos en términos de factores de seguridad (FS_{liq}) al tomar la razón de capacidad de un elemento del suelo para resistir la licuación a la demanda sísmica que se le impuso. La capacidad de resistencia a la licuación se calcula como la razón de resistencia cíclica (CRR), y la demanda sísmica se calcula como la razón de esfuerzo cíclico (CSR).

Los factores de seguridad (FS_{liq}) a lo largo de la profundidad del perfil del suelo se evalúan generalmente usando los datos de aceleración horizontal máxima del terreno a nivel de la superficie (PGA), magnitud de momento del sismo (M_w) y data del SPT, específicamente el número de golpes (N_{SPT}), esfuerzo de sobrecarga (σ_v), contenido de finos (FC), contenido de arcilla, límite líquido (LL) y distribución granulométrica (Seed & Idriss, 1971; Seed, Tokimatsu, Harder, & Chung, 1985; Youd & Idriss, 2001).

La ecuación para el factor de seguridad a la licuación se muestra a continuación:

$$FS_{liq} = \frac{CRR_{M,\sigma'_v}}{CSR_{M,\sigma'_v}}$$

Donde:

FS_{liq} Factor de seguridad a la licuación

CRR_{M,σ'_v} CRR corregida para una magnitud M y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo σ'_v

CSR_{M,σ'_v} CSR corregida para una magnitud M y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo σ'_v

Una capa de suelo con $FS_{liq} < 1$ generalmente se clasifica como licuable y con $FS_{liq} > 1$ se clasifica como no licuable (Seed & Idriss, 1971). Una capa puede licuarse durante un terremoto, incluso para $FS_{liq} > 1$. Un factor de seguridad de 1.2 a una profundidad determinada se considera como el valor límite para que la capa sea categorizada como no licuable (Sonmez, 2003). (Seed & Idriss, 1982) consideraron la capa del suelo con un valor de FS_{liq} entre 1.25 y 1.5 como no licuable. Las capas de suelo con FS_{liq} superior a 1.2 y FS_{liq} entre 1.0 y 1.2 se definen como capas no licuables y marginalmente licuables, respectivamente (Ulusay & Kuru, 2004).

2.3.1.1.7. Índice de potencial de licuación (*LPI*)

Aunque el FS_{liq} muestra el potencial de licuación de una capa de suelo a una profundidad particular dentro del suelo, no muestra el grado de severidad de licuación en un sitio propenso a la licuación. (Iwasaki, Tokida, Tatsuko, & Yasuda, 1978) propusieron el índice de potencial de licuación (*LPI*) para superar esta limitación de FS_{liq} . El índice de potencial de licuación (*LPI*) proporciona una integración del potencial de licuación a lo largo de la profundidad de un perfil de suelo y predice el rendimiento de toda la columna del suelo en comparación con una sola capa de suelo a una profundidad determinada y depende de la magnitud de la aceleración horizontal máxima del terreno (Luna & Frost, 1998). El *LPI* combina la profundidad, espesor y factor de seguridad contra la licuación (FS_{liq}) de las capas del suelo y predice el potencial de licuación regional para causar daños a nivel superficial en el sitio de interés.

La expresión propuesta por (Iwasaki, Tokida, Tatsuko, & Yasuda, 1978) para la determinación del *LPI* es la siguiente:

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) dz$$

Donde:

LPI Índice de potencial de licuación

z Profundidad hasta el punto medio de la capa de suelo

F(z) Factor de severidad calculado de la siguiente manera:

$$F(z) = 1 - FS_{liq} \text{ para } FS_{liq} < 1$$

$$F(z) = 0 \text{ para } FS_{liq} \geq 1$$

w(z) Factor de ponderación calculado de la siguiente manera:

$$w(z) = 10 - 0.5z \text{ para } z \leq 20 \text{ m.}$$

$$w(z) = 0 \text{ para } z > 20 \text{ m.}$$

dz Incremento diferencial de la profundidad

(Iwasaki, y otros, 1982) identificaron que los efectos de licuación son moderados para $5 < LPI < 15$ y altos para $LPI > 15$. (Toprak & Holzer, 2003) reportaron que se producen brotes o volcanes de arena para $LPI \geq 5$ y se producen esparcimientos laterales para $LPI \geq 12$. (Juang, Yuan, Li, Yang, & Christopher, 2005) estudiaron los efectos de la licuación sobre el daño de cimentaciones de terreno cercanas a la superficie. El *LPI* muestra una imagen clara de la gravedad de la licuación durante los eventos sísmicos, y el $LPI \geq 5$ generalmente se considera como un valor límite para la manifestación superficial de la licuación (Iwasaki, y otros, 1982; Toprak & Holzer, 2003; Holzer, Bennett, Noce, Padovani, & Tinsley, 2006). (Sonmez, 2003) clasificó los sitios con $LPI = 0$ como no propensos a licuarse y categorizó los sitios con $0 < LPI < 2$, $2 <$

$LPI < 5$, $5 < LPI < 15$ y $LPI > 15$ como de baja, moderada, alta, y severa susceptibilidad de licuación, respectivamente.

2.3.1.1.8. Índice de desplazamiento lateral (*LDI*)

El índice de desplazamiento lateral (*LDI*) consiste en la cuantificación del esparcimiento lateral que ocurre durante la licuación. Es calculado integrando las deformaciones de corte máximas a lo largo de la profundidad.

Partiendo del procedimiento de (Idriss & Boulanger, 2008) tenemos lo siguiente:

$$LDI = \int_0^{z_{max}} \gamma_{max} \cdot dz$$

Donde:

LDI Índice de desplazamiento lateral

dz Incremento diferencial de la profundidad

γ_{max} Deformación de corte máxima estimada con la siguiente ecuación:

$$y_{max} = \min \left(y_{lim}, 0.035(2 - FS_{liq}) \left(\frac{1 - F_\alpha}{FS_{liq} - F_\alpha} \right) \right) \text{ para } 2 > FS_{liq} > F_\alpha$$

$$y_{max} = y_{lim} \text{ para } FS_{liq} \leq F_\alpha$$

Donde:

FS_{liq} Factor de seguridad a la licuación

y_{lim} Deformación de corte limitante calculada como:

$$y_{lim} = 1.859 \left(1.1 - \sqrt{\frac{(N_1)_{60cs}}{46}} \right)^3 ; 0 \leq y_{lim} \leq 0.5$$

Donde:

$(N_1)_{60cs}$ $(N_1)_{60}$ corregido por contenido de finos

F_α Término de modificación de FS_{liq} calculado como:

$$F_\alpha = 0.032 + 0.69\sqrt{(N_1)_{60cs}} - 0.13(N_1)_{60cs}; (N_1)_{60cs} \geq 7$$

Donde:

$(N_1)_{60cs}$ $(N_1)_{60}$ corregido por contenido de finos

2.3.1.1.9. Asentamiento vertical de re-consolidación post-licuación unidimensional (S_{v-1D})

Los desplazamientos verticales post-licuación ocurren debido al asentamiento vertical por re-consolidación del suelo, así como por la deformación por corte debida a los esparcimientos laterales producidos.

Para condiciones de tierra nivelada, la cantidad de asentamiento vertical de re-consolidación post-licuación (S_{v-1D}) se puede calcular usando la deformación volumétrica de re-consolidación que resulta cuando las presiones de agua en exceso se disipan.

Para el cálculo del asentamiento vertical de re-consolidación en una dimensión (desconsiderando los movimientos causados por el esparcimiento lateral) se parte del procedimiento de (Idriss & Boulanger, 2008) utilizando la siguiente expresión:

$$S_{v-1D} = \int_0^{z_{max}} \varepsilon_v \cdot dz$$

Donde:

S_{v-1D} Asentamiento vertical de re-consolidación en una dimensión

dz Incremento diferencial de la profundidad

ε_v Deformación volumétrica de re-consolidación calculada como:

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \exp(-0.369\sqrt{(N_1)_{60cs}}) \cdot \min(0.08, y_{max})$$

Donde:

$(N_1)_{60cs}$ $(N_1)_{60}$ corregido por contenido de finos

y_{max} Deformación de corte máxima

2.3.1.1.10. Número de severidad de licuación (*LSN*)

De manera similar al *LPI*, el número de severidad de licuación (*LSN*) se calcula utilizando un factor de ponderación de profundidad de ley potencial ($1/z$) para determinar la respuesta de licuación acumulativa de un perfil de suelo. De igual manera, incluye las contribuciones de todas las capas que poseen un $FS_{liq} < 2$ (de manera opuesta a la consideración exclusiva de las capas con un $FS_{liq} < 1$ en el cálculo del *LPI*).

La ecuación definida por (van Ballegooy, y otros, 2014) para el cálculo del *LSN* es la siguiente:

$$LSN = 1000 \int_0^{z_{max}} \frac{\varepsilon_v}{z} \cdot dz$$

Donde:

LSN Número de severidad de licuación

z Profundidad hasta el punto medio de la capa de suelo

ε_v Deformación volumétrica de re-consolidación

dz Incremento diferencial de la profundidad

La severidad de licuación según el valor del *LSN* calculado se define de la siguiente manera: licuación poca o nula, baja, moderada, moderada a severa, alta y daños severos para valores de $0 < LSN < 10$, $10 < LSN < 20$, $20 < LSN < 30$, $30 < LSN < 40$, $40 < LSN < 50$, y $LSN > 50$, respectivamente.

2.3.1.1.11. Daño en la superficie inducido por licuación (*LIGD*)

La predicción de la severidad del daño inducido por licuación en el terreno (*LIGD*) es el resultado clave de una evaluación de licuación. (Ishihara, 1985) desarrolló un método simple y lógico para predecir la ocurrencia de volcanes de arena, fisuras en el suelo y otras características del daño en la superficie del terreno por licuación.

El método consiste en comparar el espesor del estrato licuable H_2 con el espesor del estrato no licuable H_1 para determinar si existirá o no daños superficiales por licuación en función de la correspondiente aceleración del sismo de diseño.

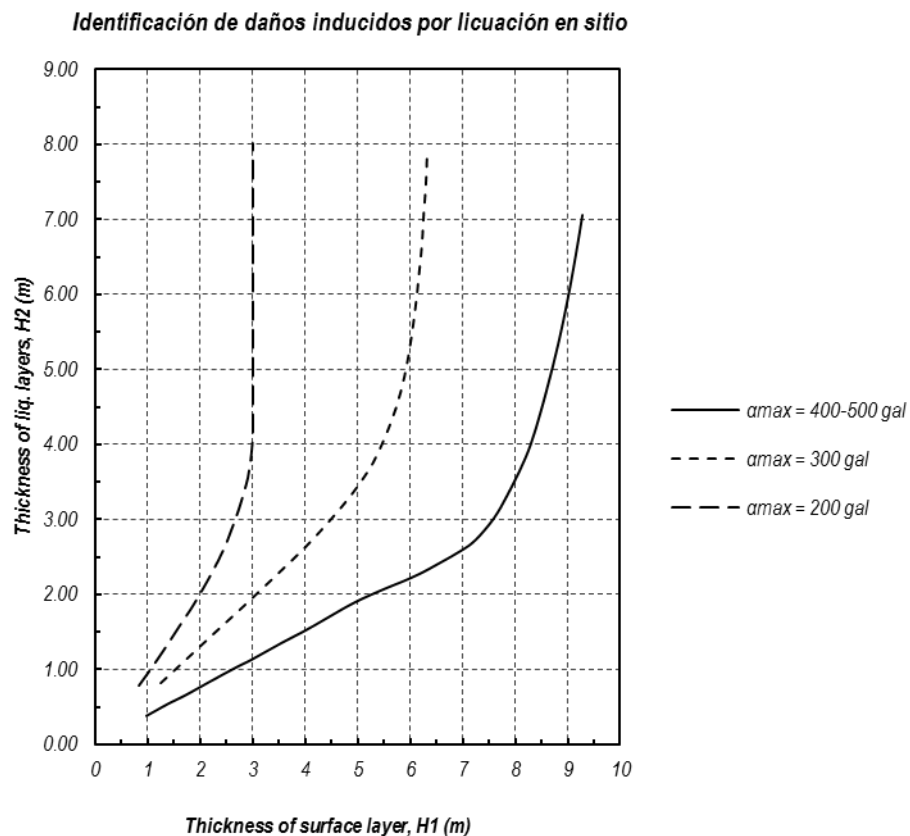


Figura 5. Curvas límite propuestas por (Ishihara, 1985) para la identificación en sitio de daño en la superficie inducido por licuación.

2.3.1.2. Suelos finos

Para evaluar la susceptibilidad de licuación de las capas de suelos con partículas predominantemente finas (limos y arcillas) se utiliza el procedimiento de (Bray & Sancio, 2006).

Se debe tener en cuenta que el análisis se realiza para cada una de las muestras obtenidas a lo largo de toda la profundidad de la perforación. Así mismo, en las muestras donde el contenido de finos (FC) determinado por medio del ensayo (ASTM D422-63) demuestra que se trata de un suelo fino, es decir, un limo o una arcilla, los siguientes ensayos deben llevarse a cabo adicionalmente:

- Límites de Atterberg (ASTM D4318 - 10)
- Contenido de humedad (ASTM D2216 - 10)

2.3.1.2.1. Evaluación de susceptibilidad de licuación de suelos finos (Bray & Sancio, 2006)

La clasificación de la susceptibilidad a la licuación de suelos finos propuesta por (Bray & Sancio, 2006) se resume en lo siguiente:

$$PI \leq 12 \text{ Y } \frac{w_c}{LL} > 0.85 \rightarrow \textit{Susceptible}$$

$$12 < PI \leq 18 \text{ Y } \frac{w_c}{LL} > 0.8 \rightarrow \textit{Moderadamente susceptible}$$

$$PI > 18 \rightarrow \textit{No susceptible}$$

Donde:

PI Índice plástico

w_c Contenido de humedad

LL Límite líquido

La clasificación de la susceptibilidad a la licuación de suelos finos propuesta por (Bray & Sancio, 2006) representada gráficamente se muestra en la Figura 6:

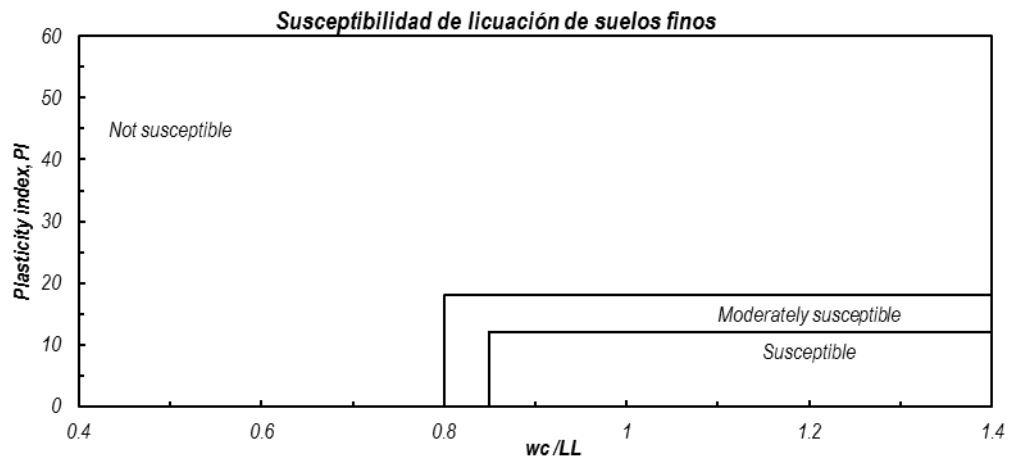


Figura 6. Clasificación de la susceptibilidad a la licuación de suelos finos propuesta por (Bray & Sancio, 2006).

2.3.2. Análisis cuantitativo de la licuación de suelos a partir del ensayo *CPT*

2.3.2.1. Suelos granulares

El ensayo de penetración cónica (*CPT*) y sus versiones mejoradas como la de piezocono (*CPTu*), tienen extensas aplicaciones en un amplio rango de suelos. El procedimiento a tener en cuenta al realizar el ensayo *CPT* esta normado en la (ASTM D3441 - 16) Aunque el ensayo *CPT* está limitado primariamente a suelos más suaves, con equipos de empuje modernos y conos más robustos, el *CPT* puede implementarse en suelos rígidos a muy rígidos, y en algunos casos roca suave.

Ventajas del *CPT*:

- Perfilamiento rápido y continuo del suelo
- Datos repetibles y confiables (no dependen del operador)
- Productividad y economía
- Base teórica fuerte para interpretación

Desventajas del *CPT*:

- Inversión de capital relativamente alta
- Requiere de operadores bien preparados
- No se recoge muestra durante el *CPT*
- La penetración puede estar restringida en capas de grava o cementadas

Para evaluar el potencial de licuación de las capas de suelo con partículas predominantemente granulares a partir del ensayo *CPTu* se utiliza el procedimiento de (Boulanger & Idriss, 2014). Se debe tener en cuenta que el análisis se realiza para cada una de las muestras obtenidas a lo largo de toda la profundidad de la perforación.

2.3.2.1.1. Razón de esfuerzo cíclico (*CSR*)

La razón de esfuerzo cíclico (*CSR*) inducido por el sismo, a una dada profundidad z , es calculada usando el método de (Seed & Idriss, 1971):

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d$$

Donde:

CSR_{M,σ'_v} *CSR* para una magnitud M y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo σ'_v

0.65 Factor de ponderación, introducido por (Seed & Idriss, 1971), para calcular el número de ciclos de esfuerzo uniforme requerido para producir el mismo aumento de presión de poros de agua que un movimiento de terreno irregular de un sismo

σ_v Esfuerzo de sobrecarga vertical total

σ'_v Esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo

a_{max} Aceleración horizontal pico en el terreno como coeficiente de la gravedad (*PGA*)

r_d Coeficiente de reducción de esfuerzo calculado por la siguiente ecuación:

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 - 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

Donde:

M Magnitud de momento del sismo

z Profundidad desde el nivel de terreno

2.3.2.1.2. Corrección de la resistencia de punta de cono del ensayo *CPTu* (q_c)

Los valores sin corregir de la resistencia de punta de cono (q_c) obtenidos en el ensayo *CPTu* tienen el potencial de proveer determinaciones erróneas del riesgo de licuación. Es por esto que los valores de q_c deben corregirse (normalizarse), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$q_{cN} = \frac{q_c}{P_a}$$

Donde:

q_{cN} q_c normalizada

q_c Resistencia de punta de cono medida en el ensayo *CPTu*

P_a Presión atmosférica de 1 atm. equivalente a 101 kPa

2.3.2.1.3. Corrección de la resistencia de punta de cono equivalente por presión de confinamiento

La resistencia de punta de cono debe ser corregida al valor equivalente que se hubiera obtenido en una arena idéntica si el esfuerzo efectivo hubiera sido igual a 1 atmósfera como se muestra en la siguiente ecuación:

$$q_{c1N} = C_N q_{cN}$$

Donde:

q_{c1N} Resistencia de punta de cono corregida y normalizada por presión de confinamiento

C_N Factor de corrección por presión de confinamiento calculado como:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^{1.338 - 0.249(q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 1.7; 21 \leq q_{c1Ncs} \leq 254$$

Donde:

P_a	Presión atmosférica de 1 atm. equivalente a 101 kPa
σ'_v	Esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo
q_{c1Ncs}	Resistencia a la penetración <i>CPT</i> normalizada equivalente a arenas limpias
q_{cN}	q_c normalizada

El cálculo de C_N mediante estas expresiones requiere del uso de iteración numérica, debido a que el valor de q_{c1Ncs} depende del valor de C_N y viceversa. Esta iteración puede realizarse con más facilidad con el uso de una hoja de cálculo en *Microsoft Office Excel*.

2.3.2.1.4. Índice de tipo de comportamiento de suelo (I_c)

El porcentaje de contenido de finos (FC) y la clasificación del suelo están a menudo correlacionados con el índice de tipo de comportamiento de suelo (I_c), el cual es una función de la resistencia de punta de cono del ensayo *CPT* (Q) y la razón de fricción de la manga del cono (F). El índice de tipo de comportamiento de suelo definido por (Robertson & Wride, Cyclic liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT, 1997) está dado por la siguiente ecuación:

$$I_c = [(3.47 - \log(Q))^2 + (1.22 + \log(F))^2]^{0.5}$$

Donde:

I_c Índice de tipo de comportamiento de suelo

Q Razón de resistencia normalizada de punta de cono dada por la ecuación:

$$Q = \left(\frac{q_c - \sigma_{vc}}{P_a} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vc}} \right)^n ; 0.5 \leq n \leq 1.0$$

Donde:

q_c	Resistencia de punta de cono medida en el ensayo CPTu
σ_{vc}	Esfuerzo de sobrecarga vertical total de consolidación
σ'_{vc}	Esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo de consolidación
P_a	Presión atmosférica de 1 atm. equivalente a 101 kPa
n	Exponente n que varía de 0.5 para arenas a 1.0 para arcillas (Robertson & Wride, Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, 1998)

F Razón de fricción normalizada de la manga del cono dada por la ecuación:

$$F = \left(\frac{f_s}{q_c - \sigma_{vc}} \right) \cdot 100\%$$

Donde:

f_s	Resistencia de la manga de fricción del cono
q_c	Resistencia de punta de cono medida en el ensayo CPTu
σ_{vc}	Esfuerzo de sobrecarga vertical total de consolidación

2.3.2.1.5. Corrección por contenido de finos

Las ecuaciones de la razón de resistencia cíclica (CRR) están diseñadas para su uso en arenas limpias. Es por esto que en los suelos que contienen finos como limos o arcillas el valor q_{c1N} se debe corregir para el contenido de finos del

suelo. Para entenderlo de mejor manera, se podría decir que el suelo que contiene finos es más resistente a la licuación que un suelo que no los contiene, y por lo tanto su resistencia de punta de cono debería corregirse de tal manera que resulte en un valor mayor, representativo de una mayor resistencia. La ecuación para la corrección por contenido de finos es la siguiente:

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

Donde:

q_{c1Ncs} Resistencia a la penetración *CPT* normalizada equivalente a arenas limpias

q_{c1N} Resistencia de punta de cono corregida y normalizada por presión de confinamiento

Δq_{c1N} Corrección por contenido de finos dada por la ecuación:

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \exp \left(1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left(\frac{15.7}{FC + 2} \right)^2 \right)$$

Donde:

FC Porcentaje de contenido de finos estimado mediante la siguiente ecuación:

$$FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137; 0\% \leq FC \leq 100\%$$

Donde:

I_c Índice de tipo de comportamiento de suelo

C_{FC} Parámetro de ajuste basado en datos específicos del sitio (cuando están disponibles)

2.3.2.1.6. Razón de resistencia cíclica (*CRR*)

La razón de resistencia cíclica (*CRR*) representa la máxima razón de esfuerzo cíclico (*CSR*) a la cual un suelo puede resistir licuación. La ecuación para calcular la *CRR* es la siguiente:

$$CRR_{M,\sigma'_v} = CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

Donde:

CRR_{M,σ'_v} *CRR* corregida para una magnitud *M* y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo σ'_v

$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1}$ *CRR* normalizada a una magnitud $M = 7.5$ y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo $\sigma'_v = 1 \text{ atm}$. Se lo calcula por medio de la siguiente expresión:

$$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} = \exp\left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.80\right)$$

Donde:

q_{c1Ncs} Resistencia a la penetración CPT normalizada equivalente a arenas limpias

MSF Factor de escala de magnitud (*MSF*) utilizado para tener en cuenta los efectos de duración (es decir, el número y las amplitudes relativas de los ciclos de carga). Se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left(8.64 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 1.325\right)$$

Donde:

MSF Factor de escala de magnitud

M Magnitud de momento del sismo

MSF_{max} Factor de escala de magnitud máximo, calculado por:

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{180}\right)^3 \leq 2.2$$

Donde:

q_{c1Ncs} Resistencia a la penetración CPT normalizada equivalente a arenas limpias

K_σ Factor de corrección por esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.1$$

Donde:

σ'_v Esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo

P_a Presión atmosférica de 1 atm. equivalente a 101 kPa

C_σ Coeficiente calculado por medio de la siguiente expresión:

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27(q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3$$

Donde:

q_{c1Ncs} Resistencia a la penetración CPT normalizada equivalente a arenas limpias

El coeficiente C_σ se puede limitar a su valor máximo de 0.3 restringiendo el valor de $q_{c1Ncs} \leq 211$

2.3.2.1.7. Factor de seguridad a la licuación (FS_{liq})

El potencial de licuación que se produce a cierta profundidad en una columna de suelo se cuantifica en términos de los factores de seguridad contra la licuación (FS_{liq}). (Seed & Idriss, 1971) propusieron un procedimiento simplificado para evaluar la resistencia a la licuación de los suelos en términos de factores de seguridad (FS_{liq}) al tomar la razón de capacidad de un elemento del suelo para resistir la licuación a la demanda sísmica que se le impuso. La capacidad de resistencia a la licuación se calcula como la razón de resistencia cíclica (CRR), y la demanda sísmica se calcula como la razón de esfuerzo cíclico (CSR).

La ecuación para el factor de seguridad a la licuación se muestra a continuación:

$$FS_{liq} = \frac{CRR_{M,\sigma'_v}}{CSR_{M,\sigma'_v}}$$

Donde:

FS_{liq}	Factor de seguridad a la licuación
CRR_{M,σ'_v}	CRR corregida para una magnitud M y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo σ'_v
CSR_{M,σ'_v}	CSR corregida para una magnitud M y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo σ'_v

Una capa de suelo con $FS_{liq} < 1$ generalmente se clasifica como licuable y con $FS_{liq} > 1$ se clasifica como no licuable (Seed & Idriss, 1971). Una capa puede licuarse durante un terremoto, incluso para $FS_{liq} > 1$. Un factor de seguridad de 1.2 a una profundidad determinada se considera como el valor límite

para que la capa sea categorizada como no licuable (Sonmez, 2003). (Seed & Idriss, 1982) consideraron la capa del suelo con un valor de FS_{liq} entre 1.25 y 1.5 como no licuable. Las capas de suelo con FS_{liq} superior a 1.2 y FS_{liq} entre 1.0 y 1.2 se definen como capas no licuables y marginalmente licuables, respectivamente (Ulusay & Kuru, 2004).

2.3.2.1.8. Índice de potencial de licuación (*LPI*)

Aunque el FS_{liq} muestra el potencial de licuación de una capa de suelo a una profundidad particular dentro del suelo, no muestra el grado de severidad de licuación en un sitio propenso a la licuación. (Iwasaki, Tokida, Tatsuko, & Yasuda, 1978) propusieron el índice de potencial de licuación (*LPI*) para superar esta limitación de FS_{liq} . El índice de potencial de licuación (*LPI*) proporciona una integración del potencial de licuación a lo largo de la profundidad de un perfil de suelo y predice el rendimiento de toda la columna del suelo en comparación con una sola capa de suelo a una profundidad determinada y depende de la magnitud de la aceleración horizontal máxima del terreno (Luna & Frost, 1998). El *LPI* combina la profundidad, espesor y factor de seguridad contra la licuación (FS_{liq}) de las capas del suelo y predice el potencial de licuación regional para causar daños a nivel superficial en el sitio de interés.

La expresión propuesta por (Iwasaki, Tokida, Tatsuko, & Yasuda, 1978) para la determinación del *LPI* es la siguiente:

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) dz$$

Donde:

LPI Índice de potencial de licuación

z Profundidad hasta el punto medio de la capa de suelo

$F(z)$ Factor de severidad calculado de la siguiente manera:

$$F(z) = 1 - FS_{liq} \text{ para } FS_{liq} < 1$$

$$F(z) = 0 \text{ para } FS_{liq} \geq 1$$

$w(z)$ Factor de ponderación calculado de la siguiente manera:

$$w(z) = 10 - 0.5z \text{ para } z \leq 20 \text{ m.}$$

$$w(z) = 0 \text{ para } z > 20 \text{ m.}$$

dz Incremento diferencial de la profundidad

(Iwasaki, y otros, 1982) identificaron que los efectos de licuación son moderados para $5 < LPI < 15$ y altos para $LPI > 15$. (Toprak & Holzer, 2003) reportaron que se producen brotes o volcanes de arena para $LPI \geq 5$ y se producen esparcimientos laterales para $LPI \geq 12$. (Juang, Yuan, Li, Yang, & Christopher, 2005) estudiaron los efectos de la licuación sobre el daño de cimentaciones de terreno cercanas a la superficie. El LPI muestra una imagen clara de la gravedad de la licuación durante los eventos sísmicos, y el $LPI \geq 5$ generalmente se considera como un valor límite para la manifestación superficial de la licuación (Iwasaki, y otros, 1982; Toprak & Holzer, 2003; Holzer, Bennett, Noce, Padovani, & Tinsley, 2006). (Sonmez, 2003) clasificó los sitios con $LPI = 0$ como no propensos a licuarse y categorizó los sitios con $0 < LPI < 2$, $2 < LPI < 5$, $5 < LPI < 15$ y $LPI > 15$ como de baja, moderada, alta, y severa susceptibilidad de licuación, respectivamente.

2.3.2.1.9. Índice de desplazamiento lateral (*LDI*)

El índice de desplazamiento lateral (*LDI*) consiste en la cuantificación del esparcimiento lateral que ocurre durante la licuación. Es calculado integrando las deformaciones de corte máximas a lo largo de la profundidad.

Partiendo del procedimiento de (Idriss & Boulanger, 2008) tenemos lo siguiente:

$$LDI = \int_0^{z_{max}} \gamma_{max} \cdot dz$$

Donde:

LDI Índice de desplazamiento lateral

dz Incremento diferencial de la profundidad

γ_{max} Deformación de corte máxima estimada con la siguiente ecuación:

$$y_{max} = \min \left(y_{lim}, 0.035(2 - FS_{liq}) \left(\frac{1 - F_{\alpha}}{FS_{liq} - F_{\alpha}} \right) \right) \text{ para } 2 > FS_{liq} > F_{\alpha}$$

$$y_{max} = y_{lim} \text{ para } FS_{liq} \leq F_{\alpha}$$

Donde:

FS_{liq} Factor de seguridad a la licuación

y_{lim} Deformación de corte limitante calculada como:

$$y_{lim} = 1.859(2.163 - 0.478(q_{c1Ncs})^{0.264})^3; 0 \leq y_{lim} \leq 0.5$$

Donde:

q_{c1Ncs} Resistencia a la penetración CPT
normalizada equivalente a arenas
limpias

F_{α} Término de modificación de FS_{liq} calculado como:

$$F_{\alpha} = -11.74 + 8.34(q_{c1Ncs})^{0.264} - 1.371(q_{c1Ncs})^{0.528}$$

$$q_{c1Ncs} \geq 69$$

Donde:

q_{c1Ncs} Resistencia a la penetración CPT
normalizada equivalente a arenas
limpias

2.3.2.1.10. Asentamiento vertical de re-consolidación post-licuación unidimensional (S_{v-1D})

Los desplazamientos verticales post-licuación ocurren debido al asentamiento vertical por re-consolidación del suelo, así como por la deformación por corte debida a los esparcimientos laterales producidos.

Para condiciones de tierra nivelada, la cantidad de asentamiento vertical de re-consolidación post-licuación (S_{v-1D}) se puede calcular usando la deformación volumétrica de re-consolidación que resulta cuando las presiones de agua en exceso se disipan.

Para el cálculo del asentamiento vertical de re-consolidación en una dimensión (desconsiderando los movimientos causados por el esparcimiento lateral) se parte del procedimiento de (Idriss & Boulanger, 2008) utilizando la siguiente expresión:

$$S_{v-1D} = \int_0^{z_{max}} \varepsilon_v \cdot dz$$

Donde:

S_{v-1D} Asentamiento vertical de re-consolidación en una dimensión

dz Incremento diferencial de la profundidad

ε_v Deformación volumétrica de re-consolidación calculada como:

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \exp(2.551 - 1.147(q_{c1Ncs})^{0.264}) \cdot \min(0.08, y_{max})$$

$$q_{c1Ncs} \geq 21$$

Donde:

q_{c1Ncs}	Resistencia a la penetración CPT normalizada equivalente a arenas limpias
y_{max}	Deformación de corte máxima

2.3.2.1.11. Número de severidad de licuación (*LSN*)

De manera similar al *LPI*, el número de severidad de licuación (*LSN*) se calcula utilizando un factor de ponderación de profundidad de ley potencial ($1/z$) para determinar la respuesta de licuación acumulativa de un perfil de suelo. De igual manera, incluye las contribuciones de todas las capas que poseen un $FS_{liq} < 2$ (de manera opuesta a la consideración exclusiva de las capas con un $FS_{liq} < 1$ en el cálculo del *LPI*).

La ecuación definida por (van Ballegooy, y otros, 2014) para el cálculo del *LSN* es la siguiente:

$$LSN = 1000 \int_0^{z_{max}} \frac{\varepsilon_v}{z} \cdot dz$$

Donde:

<i>LSN</i>	Número de severidad de licuación
<i>z</i>	Profundidad hasta el punto medio de la capa de suelo
ε_v	Deformación volumétrica de re-consolidación
<i>dz</i>	Incremento diferencial de la profundidad

La severidad de licuación según el valor del *LSN* calculado se define de la siguiente manera: licuación poca o nula, baja, moderada, moderada a severa, alta

y daños severos para valores de $0 < \text{LSN} < 10$, $10 < \text{LSN} < 20$, $20 < \text{LSN} < 30$, $30 < \text{LSN} < 40$, $40 < \text{LSN} < 50$, y $\text{LSN} > 50$, respectivamente.

3. METODOLOGÍA

El método de investigación planteado en el presente estudio es del tipo cualitativo y cuantitativo; se parte de los datos recopilados de los trabajos de campo del sitio y ensayos de laboratorio respectivos a partir de estos, para elaborar una base de datos que abarque todos los factores que influyen en la ocurrencia del fenómeno de licuación.

Obtenidos los resultados de los parámetros geo-mecánicos de las muestras, se procederá al análisis por medio de la metodología propuesta por (Boulanger & Idriss, 2014) para la evaluación del potencial de licuación en base a los ensayos *SPT* y *CPTu*. En base a esto se determinará el factor de seguridad contra la licuación, el índice de potencial de licuación y el número de severidad de licuación en los suelos de la zona de Tarqui, el cual por medio de la validación de observaciones geológicas realizadas en el sitio permite determinar la susceptibilidad de los suelos a sufrir licuación. De igual manera se elaborarán mapas de contorno en base a los valores del índice de potencial de licuación y número de severidad de licuación para obtener una distribución espacial de los mismos en el sitio.

En el caso del análisis en base a las perforaciones *SPT* utilizando el método propuesto por (Boulanger & Idriss, 2014) se formuló una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel 2016 denominada (JLiq *SPT*) que se encarga de todo el proceso de cálculo y presentación de gráficos. Adicionalmente, se codificó un programa utilizando macros en lenguaje de programación VBA (*Visual Basic for Applications*) en Microsoft Excel que se encarga de manera completamente automatizada de:

1. Importar los datos respectivos de las perforaciones *SPT* a analizar ubicados en los reportes de caracterización geotécnica de las muestras de suelo.
2. Generar una hoja de cálculo independiente para cada una de las perforaciones importadas.
3. Graficar la columna estratigráfica del suelo en base a los tipos de suelo y profundidades de cada perforación realizada.
4. Resumir los resultados obtenidos de los cálculos realizados en base al procedimiento de (Boulanger & Idriss, 2014) y presentarlos en una tabla de resumen que así mismo cuenta con gráficos donde se detallan los valores obtenidos de mayor importancia para cada una de las perforaciones analizadas.

En el caso del análisis en base a las perforaciones *CPTu* utilizando el método propuesto por (Boulanger & Idriss, 2014) se utilizó el programa CLiq v.2.0 – CPT liquefaction software desarrollado por la empresa GeoLogismiki, en colaboración con Gregg Drilling Inc. y el profesor Peter Robertson.

Los mapas de contorno en base a los valores del índice de potencial de licuación y número de severidad de licuación se desarrollaron utilizando el software líder especializado en sistemas de información geográfica denominado ArcGIS v.10.3.1.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación a partir del ensayo *SPT* (sismo 16 de abril, 2016)

A continuación, se presenta en la Tabla # 3 un resumen de los resultados obtenidos en base al análisis cuantitativo del potencial de licuación implementando los procedimientos de (Boulanger & Idriss, 2014) en base a las perforaciones *SPT* del sector de Tarqui, ubicado en la provincia de Manabí, Ecuador.

Resumen de análisis de desencadenamiento de licuación basado en el SPT																						
Proyecto:		Microzonificación Tarqui		Prof. límite análisis LDI & S (m)		18		Sismo		Design (Tr=475 yrs. R=70 km.)?		Observaciones: PGA values obtained from the Seismic Site Response Analysis performed based on the April 16, 2016 Ecuador earthquake.										
Localización:		Tarqui		Constante gravitacional, g (m/s ²)		9.81		Profundidad límite Ishihara		20.00												
Solicitado por:		MIDUVI		Presión atmosférica, (kPa)		101.325		Idoma		Español												
Revisado por:		Jorge Ordóñez: jorgeordonez@gmail.com		Fecha:		May 22, 2017		Proced. Implementado(s):		Fines Liq. Susc.: Bray & Sancio (2006) FS: Idriss & Boulanger (2014); LPI: Iwasaki (1982); LSN: Van Ballegooy (2014); LIGD: Ishihara (1985); CR: Tolga (2014) LDI; S: Idriss & Boulanger (2008)												
ID	UTM Northing	UTM Easting	PGA	M _w	Ground elevation (m)	Water table depth (m)	Drill	Borehole diameter (mm)	Correction for sampler liners	Above ground rod extension (m)	ER	Average y above water table (kN/m ²)	Average y below water table (kN/m ²)	Static shear stress, τ _s (kPa)	Depth (m)	Liquefaction?	LPI	LSN	LDI	S	Thickness of surface layer, H ₁ (m)	Thickness of liq. layers, H ₂ (m)
P-1	9894992	531166	0.31	7.8	4.00	0.70	Garrapata	75	NO	1.5	73.36	17	18	0.00	6.00	YES	6.04	44.46	0.4396	0.0555	0.45	1.8
P-2	9894985	531349	0.31	7.8	2.57	0.50	Garrapata	75	NO	1.5	73.36	17	18	0.00	7.40	YES	6.81	9.81	0.3535	0.0487	4.05	2.25
P-3	9894948	531586	0.51	7.8	3.34	0.80	Garrapata	75	NO	1.5	73.36	17	18	0.00	8.10	YES	11.77	29.79	0.4416	0.0699	0.90	4.05
P-4	9894979	531772	0.38	7.8	3.33	1.80	Garrapata	75	NO	1.5	73.36	17	18	0.00	8.22	YES	13.86	35.05	0.9716	0.1111	1.35	4.05
P-5	9894958	531940	0.38	7.8	3.68	1.35	Garrapata	75	NO	1.5	73.36	17	18	0.00	11.07	YES	13.62	23.60	1.0336	0.1132	1.80	4.05

P-6	9894932	532127	0.38	7.8	3.50	0.90	Petty	75	NO	1.5	69.81	17	18	0.00	9.55	YES	2.12	11.84	0.1438	0.0283	0.90	1.55
P-7	9894666	532096	0.35	7.8	6.00	1.81	LY24	75	NO	1.5	76.54	17	18	0.00	20.05	YES	12.23	29.60	1.1161	0.1444	1.60	6.15
P-8	9894822	532035	0.38	7.8	5.31	1.80	LY24	75	NO	1.5	76.54	17	18	0.00	18.40	NO	0.00	0.00	0.0000	0.0000	#N/A	#N/A
P-10	9894880	531248	0.31	7.8	5.50	1.61	LY24	75	NO	1.5	76.54	17	18	0.00	20.45	YES	8.97	29.53	0.7607	0.0843	1.80	3
P-11	9894709	531382	0.31	7.8	6.50	2.10	LY24	75	NO	1.5	76.54	17	18	0.00	18.20	YES	6.78	11.35	0.6102	0.0694	5.40	2.25
P-12	9894804	531491	0.51	7.8	5.00	2.00	LY38	75	NO	1.5	60.00	17	18	0.00	18.41	YES	26.95	32.97	1.5979	0.1877	1.95	7.5
P-13	9894813	531599	0.51	7.8	4.50	2.20	Petty	75	NO	1.5	69.81	17	18	0.00	17.77	YES	15.23	36.43	1.0594	0.1134	1.95	2.85
P-14	9894841	531879	0.38	7.8	4.00	2.00	LY24	75	NO	1.5	76.54	17	18	0.00	18.20	NO	0.00	0.06	0.0035	0.0006	#N/A	#N/A
P-15	9894472	532304	0.41	7.8	7.00	2.00	Acker	75	NO	1.5	66.22	17	18	0.00	20.30	YES	1.96	3.80	0.1426	0.0150	2.75	0.45
P-16	9894412	531527	0.38	7.8	5.00	2.35	LY24	75	NO	1.5	76.54	17	18	0.00	17.90	YES	6.18	11.30	0.4217	0.0524	2.70	2.1
P-17	9894564	531548	0.38	7.8	5.50	2.90	Acker	75	NO	1.5	66.22	17	18	0.00	20.15	YES	4.16	5.06	0.3366	0.0350	6.15	1.35
P-18	9894602	531552	0.38	7.8	5.00	2.85	Acker	75	NO	1.5	66.22	17	18	0.00	30.10	YES	7.32	12.17	0.5620	0.0637	4.50	2.7
P-19	9894456	531701	0.52	7.8	11.58	2.10	LY24	75	NO	1.5	76.54	17	18	0.00	20.00	YES	6.80	14.45	0.2972	0.0453	2.00	2.05
P-20	9894565	531811	0.29	7.8	7.00	4.25	Acker	75	NO	1.5	66.22	17	18	0.00	20.75	YES	0.04	1.40	0.0233	0.0065	4.25	0.45
P-21	9894649	531886	0.29	7.8	5.90	1.20	LY38	75	NO	1.5	60.00	17	18	0.00	26.90	YES	3.04	6.95	0.1924	0.0266	3.35	1.05
P-22	9894530	532015	0.29	7.8	6.02	3.00	LY38	75	NO	1.5	60.00	17	18	0.00	19.95	YES	8.39	18.85	1.0841	0.1167	3.45	3.9
P-23	9894277	532172	0.52	7.8	9.50	2.10	Petty	75	NO	1.5	69.81	17	18	0.00	15.20	YES	2.59	7.75	0.2098	0.0169	1.95	0.45
P-24	9894449	532112	0.52	7.8	13.50	5.30	LY38	75	NO	1.5	60.00	17	18	0.00	70.06	NO	0.00	0.28	0.0169	0.0033	#N/A	#N/A
P-25	9894550	532166	0.35	7.8	5.86	2.00	Petty	75	NO	1.5	69.81	17	18	0.00	18.10	YES	7.87	10.81	0.5118	0.0801	5.40	3.45
P-26	9894718	531651	0.51	7.8	5.00	2.10	Acker	75	NO	1.5	66.22	17	18	0.00	20.00	YES	15.74	28.25	0.8107	0.0956	1.65	4.05
P-27	9894727	531820	0.29	7.8	7.77	3.05	Acker	75	NO	1.5	66.22	17	18	0.00	20.00	YES	0.30	2.52	0.0672	0.0170	6.75	1.35
P-28	9894506	532216	0.41	7.8	7.50	1.15	Acker	75	NO	1.5	66.22	17	18	0.00	20.25	YES	5.01	26.06	0.3727	0.0347	0.90	1.65

Tabla # 3. Resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación a partir del ensayo *SPT* (sismo 16 de abril, 2016).

Los resultados obtenidos de *LPI*, *LSN*, *LDI*, S_{v-1D} , *LIGD* y la susceptibilidad de los suelos finos a licuarse expuestos en la Tabla # 3 se presentan gráficamente en la Figura 7, Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, y Figura 12, respectivamente:

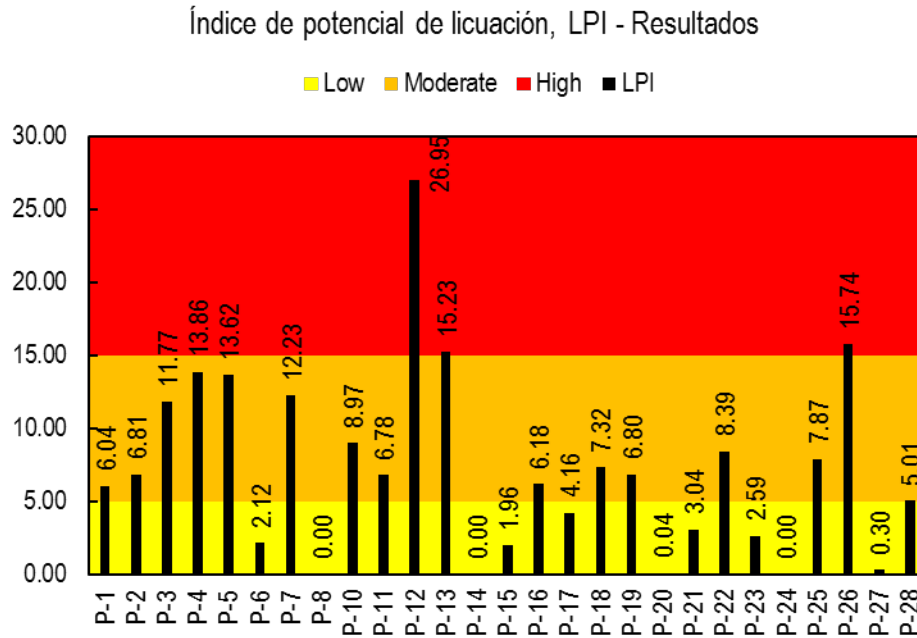


Figura 7. Resultados de *LPI* a partir del ensayo *SPT* (sismo 16 de abril, 2016).

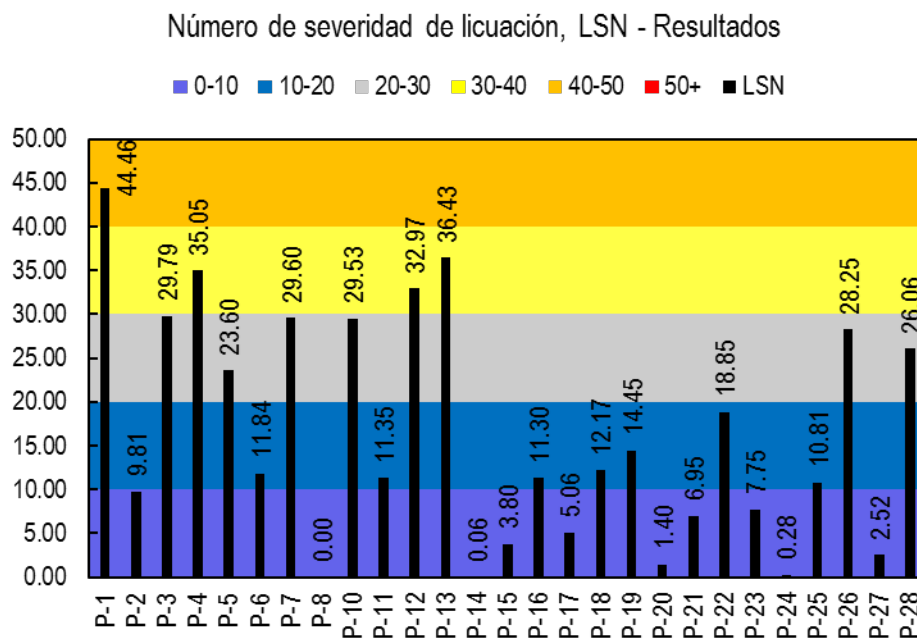


Figura 8. Resultados de *LSN* a partir del ensayo *SPT* (sismo 16 de abril, 2016).

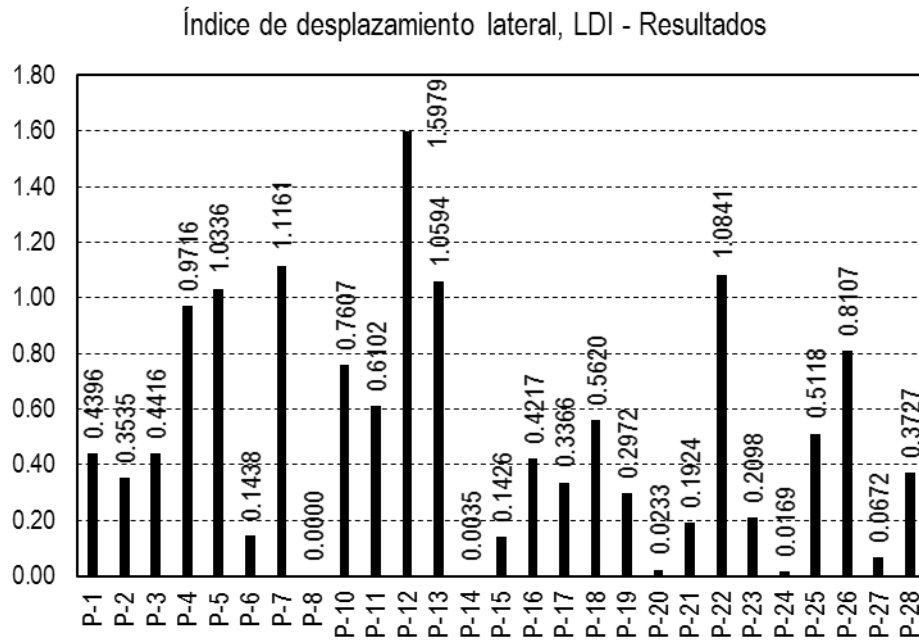


Figura 9. Resultados de LDI a partir del ensayo SPT (sismo 16 de abril, 2016).

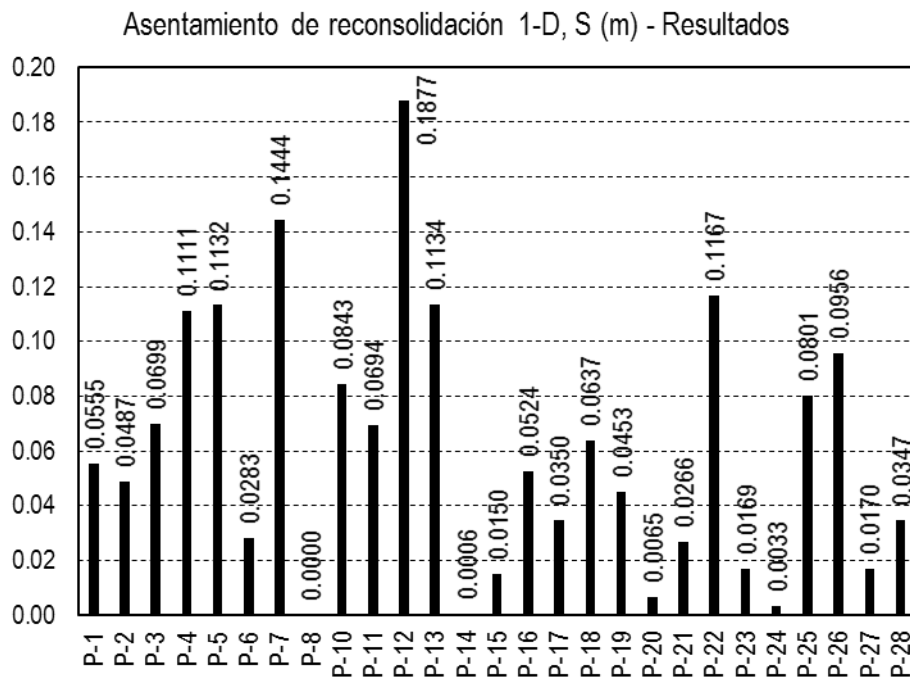


Figura 10. Resultados de S_{v-1D} a partir del ensayo SPT (sismo 16 de abril, 2016).

Identificación de daños inducidos por licuación en sitio

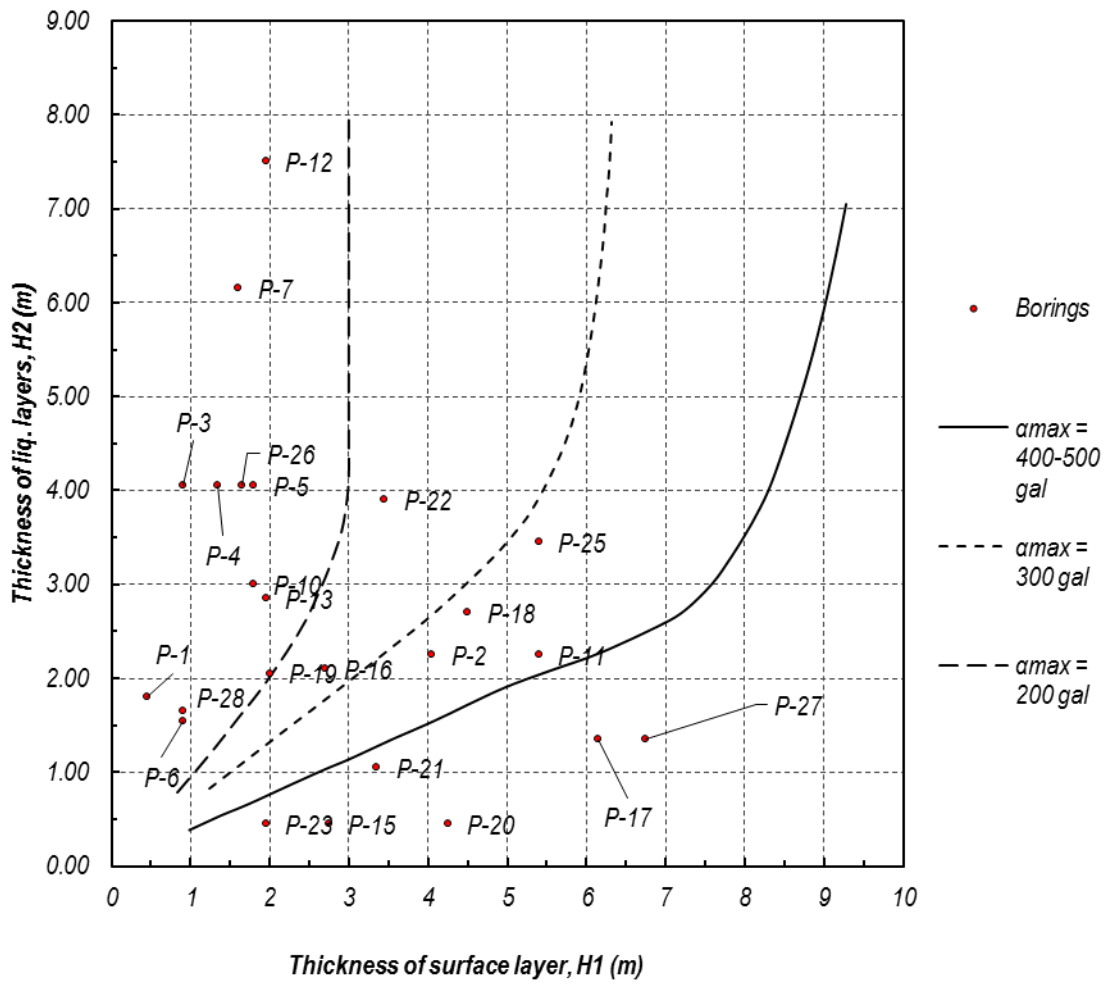


Figura 11. Resultados de *LIGD* a partir del ensayo *SPT* (sismo 16 de abril, 2016).

Susceptibilidad de licuación de suelos finos (Profundidades menores o iguales a 20 m.)

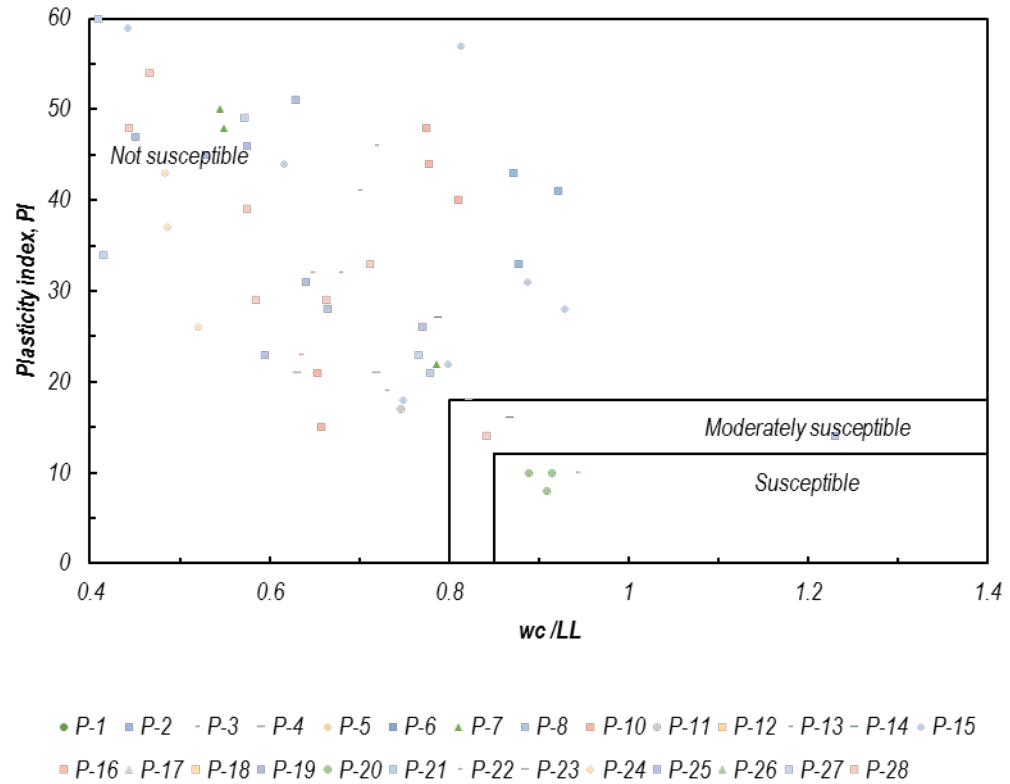


Figura 12. Resultados de la susceptibilidad de los suelos finos a licuarse a partir del ensayo *SPT* (sismo 16 de abril, 2016).

La distribución geográfica de los sondeos analizados en función de si se licuaron o no se muestra a continuación en la Figura 13:



Figura 13. Mapa de sondeos SPT según su potencial de licuación.

4.2. Resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación a partir del ensayo *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016)

A continuación, se presenta en la Tabla # 4 un resumen de los resultados obtenidos en base al análisis cuantitativo del potencial de licuación implementando los procedimientos de (Boulanger & Idriss, 2014) en base a los sondeos *CPTu* del sector de Tarqui, ubicado en la provincia de Manabí, Ecuador.

Resumen de análisis de desencadenamiento de licuación basado en el CPT																
	Proyecto:	Microzonificación Tarqui					Prof. límite análisis LDI & S (m)	18	Sismo	Design (Tr=475 yrs. R=70 km.)		Observaciones:				
	Localización:	Tarqui					Constante gravitacional, g (m/s ²)	9.81	Idoma	Español						
	Solicitado por:	MIDUVI					Presión atmosférica, (kPa)	101.325								
Revisado por:	Jorge Ordóñez: jorgeordonez@gmail.com		Fecha:	May 22, 2017		Proced. Implementado(s):	FS, LDI, S: Idriss & Boulanger (2014); LPI: Iwasaki (1982)									
ID	ID2	UTM Northing	UTM Easting	Done by	PGA	M _w	Ground elevation (m)	Water table depth (m)	Depth (m)	Liquefaction?	LPI	LSN	LDI	S	Thickness of surface layer, H ₁ (m)	Thickness of liq. layers, H ₂ (m)
CPTu-1	1	9894993	531188	SUBTERRA	0.62	8.2	4.13	1.00	6.58	YES	11.82	20.66	0.7743	0.0828	0.74	2.52
CPTu-2	2	9894970	531577	SUBTERRA	0.62	8.2	3.19	0.75	9.69	YES	30.14	56.60	1.5559	0.1754	0.80	6.28
CPTu-3	3	9894504	532221	SUBTERRA	0.62	8.2	7.50	3.00	12.38	YES	1.05	2.31	0.0620	0.0103	2.62	0.43
CPTu-4	4	9894925	532142	SUBTERRA	0.62	8.2	3.61	1.00	8.14	YES	2.66	4.33	0.1045	0.0223	3.62	1.14
CPTu-5	5	9894739	531665	SUBTERRA	0.62	8.2	4.65	3.50	8.57	YES	10.69	20.40	0.4509	0.0658	2.10	2.69
CPTu-6	6	9894721	532093	SUBTERRA	0.62	8.2	8.01	2.00	10.41	YES	4.72	8.69	0.3285	0.0428	2.23	1.68

CPTu-7	7	9894911	531180	SUBTERRA	0.62	8.2	4.89	2.90	2.95	YES	0.55	4.29	0.0398	0.0098	1.80	0.33
CPTu-8	8	9894742	531404	SUBTERRA	0.62	8.2	5.96	1.00	4.06	YES	2.57	10.67	0.2545	0.0306	2.34	0.94
CPTu-9	9	9894493	532304	SUBTERRA	0.62	8.2	6.78	1.00	11.63	YES	10.74	13.69	0.7533	0.0834	2.01	4.13
CPTu-10	10	9894845	531860	SUBTERRA	0.62	8.2	4.03	2.00	9.19	YES	5.28	7.77	0.2775	0.0473	4.97	2.12
CPTu-11	11	9894448	532269	SUBTERRA	0.62	8.2	7.15	1.00	18.50	YES	7.39	7.45	0.5865	0.0602	2.22	8.16
CPTu-12	12	9894494	531507	SUBTERRA	0.62	8.2	4.60	2.75	7.00	YES	11.38	22.49	0.7863	0.0894	2.55	3
CPTu-13	13	9894609	531547	SUBTERRA	0.62	8.2	4.65	1.50	9.06	YES	9.46	16.77	0.5970	0.0897	2.85	3.79
CPTu-14	14	9894555	531679	SUBTERRA	0.62	8.2	7.30	2.85	13.48	YES	8.16	14.21	0.5095	0.0796	2.00	3.57
CPTu-15	15	9894462	531806	SUBTERRA	0.62	8.2	7.84	1.35	11.80	YES	15.41	23.98	0.9453	0.1232	2.00	4.85
CPTu-16	16	9894556	531972	SUBTERRA	0.62	8.2	6.17	2.20	10.41	YES	2.01	4.88	0.2050	0.0299	3.07	1.17
CPTu-17	17	9894553	532154	SUBTERRA	0.62	8.2	6.20	0.80	13.48	YES	6.97	13.49	0.5123	0.0688	2.01	2.57
CPTu-18	18	9894280	532170	SUBTERRA	0.62	8.2	9.49	2.00	8.22	YES	6.18	9.11	0.2904	0.0370	3.26	1.52
CPTu-18-2	18-2	9894274	532172	SUBTERRA	0.62	8.2	9.66	1.00	6.13	YES	2.79	5.46	0.1974	0.0198	2.85	0.66
CPTu-19	19	9894717	531818	SUBTERRA	0.62	8.2	7.66	5.20	9.63	YES	4.35	11.43	0.4516	0.0606	3.86	2.02
CPTu-20	20	9894605	532178	SUBTERRA	0.62	8.2	6.20	1.50	17.53	YES	9.68	14.85	1.1252	0.1161	4.32	5.64
CPTu-21	21	9894661	531745	SUBTERRA	0.62	8.2	6.68	2.00	10.05	YES	7.52	12.41	0.4992	0.0687	2.44	2.99
CPTu-22	22	9894346	531952	SUBTERRA	0.62	8.2	18.62	3.00	6.96	YES	2.75	5.26	0.1125	0.0189	2.59	0.78
CPTu-23	23	9894473	531901	SUBTERRA	0.62	8.2	9.99	1.45	10.10	YES	4.32	5.18	0.1541	0.0264	2.10	1.88
CPTu-24	24	9894421	532184	SUBTERRA	0.62	8.2	7.72	2.30	18.22	YES	10.12	8.11	0.4565	0.0554	2.87	8.21
CPTu-25	25	9894394	532257	SUBTERRA	0.62	8.2	8.27	2.20	18.24	YES	6.00	5.59	0.2065	0.0318	2.17	2.21

Tabla # 4: Resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación a partir del ensayo *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016).

Los resultados obtenidos de *LPI*, *LSN*, *LDI*, S_{v-1D} , y *LIGD* expuestos en la Tabla # 4 se presentan gráficamente en la Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17 y Figura 18, respectivamente:

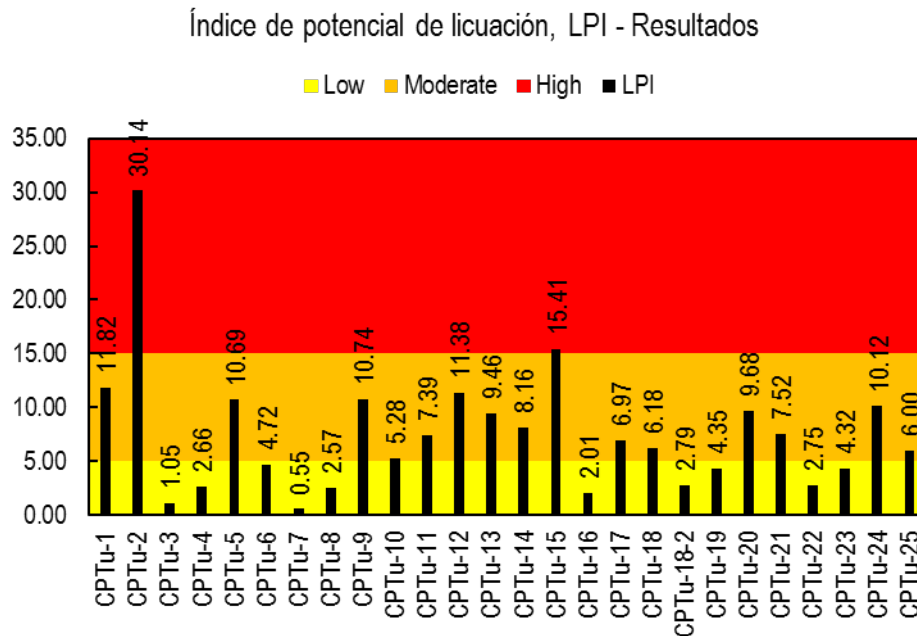


Figura 14. Resultados de *LPI* a partir del ensayo *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016).

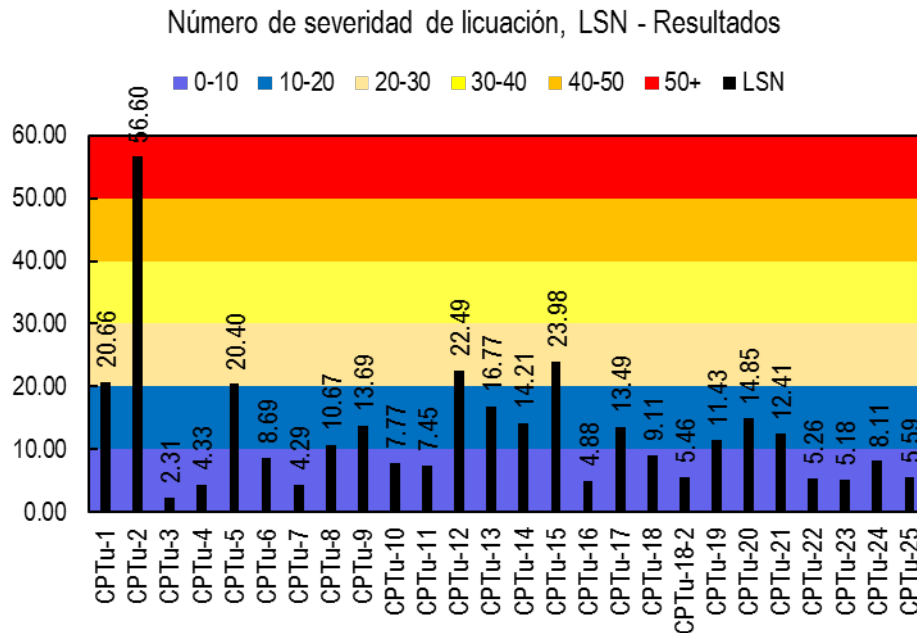


Figura 15. Resultados de *LSN* a partir del ensayo *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016).

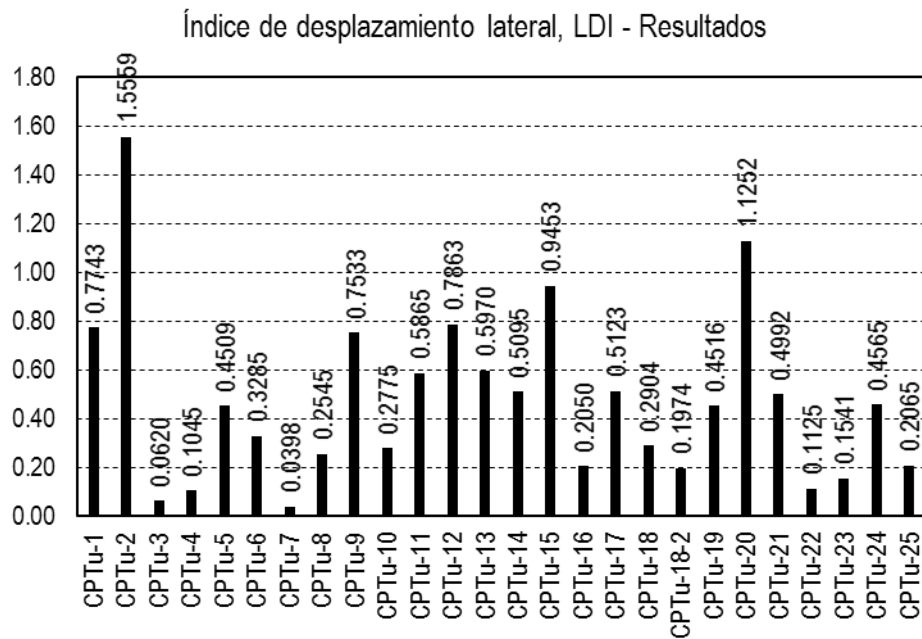


Figura 16. Resultados de LDI a partir del ensayo $CPTu$ (sismo 16 de abril, 2016).

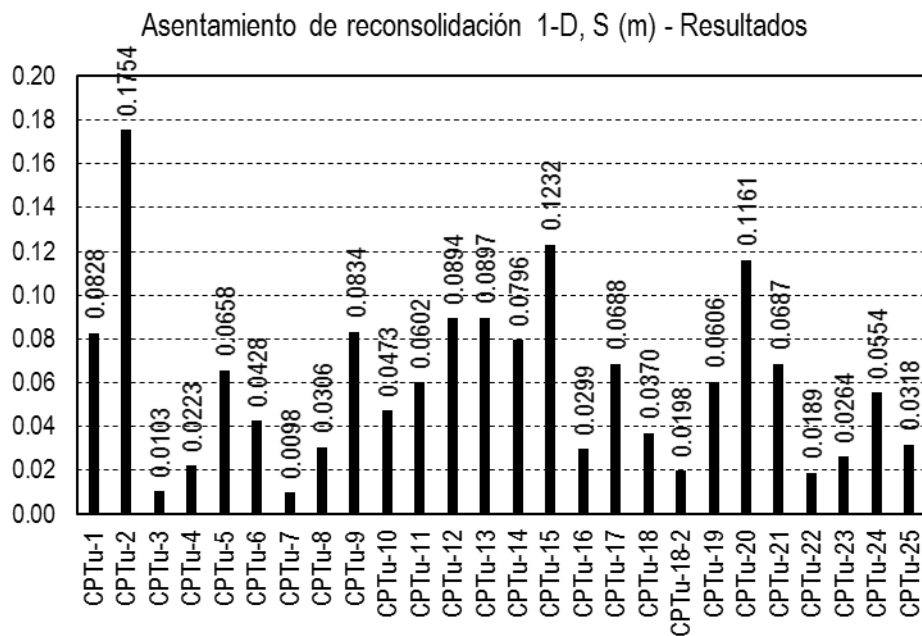


Figura 17. Resultados de S_{v-1D} a partir del ensayo $CPTu$ (sismo 16 de abril, 2016).

Identificación de daños inducidos por licuación en sitio

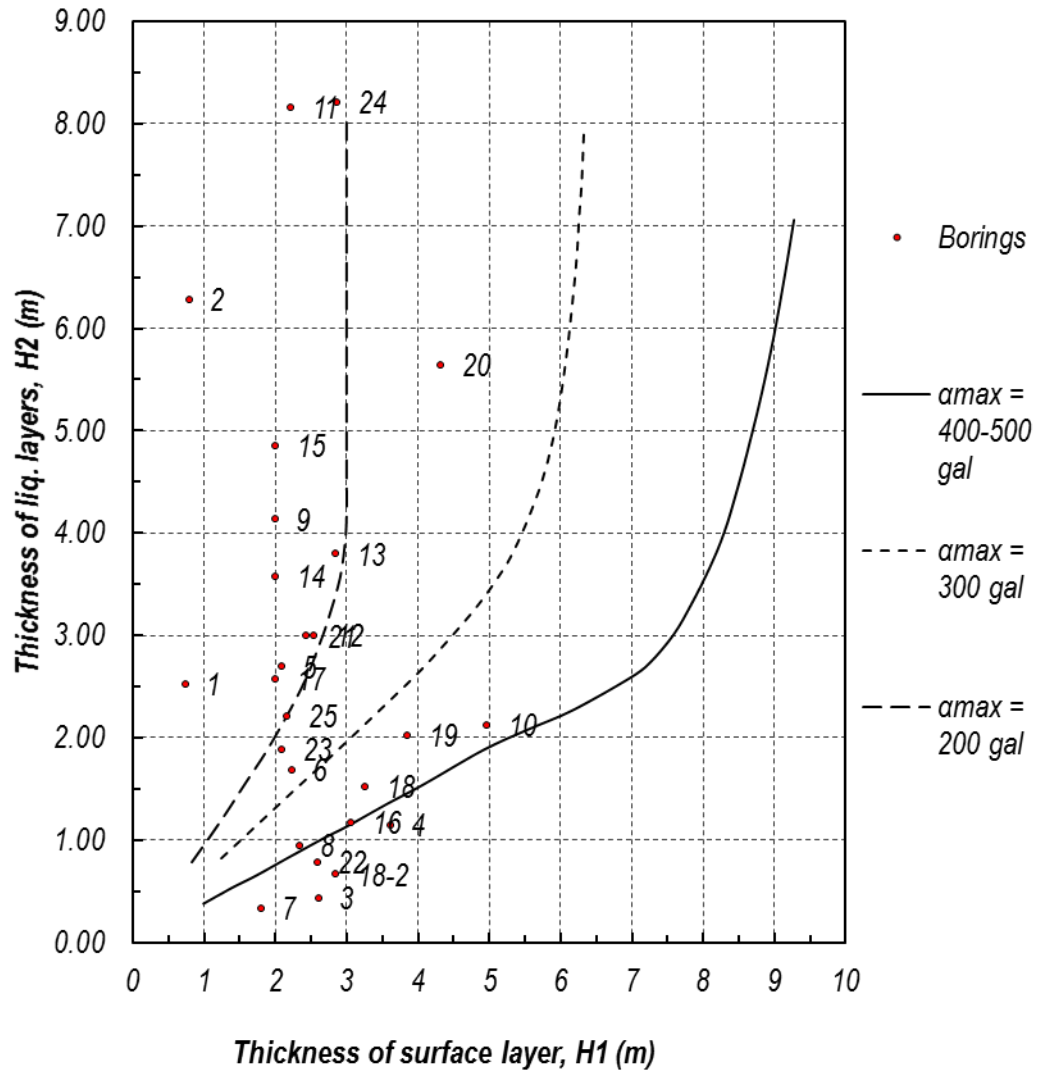


Figura 18. Resultados de *LIGD* a partir del ensayo *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016).

La distribución geográfica de los sondeos analizados en función de si se licuaron o no se muestra a continuación en la Figura 19:

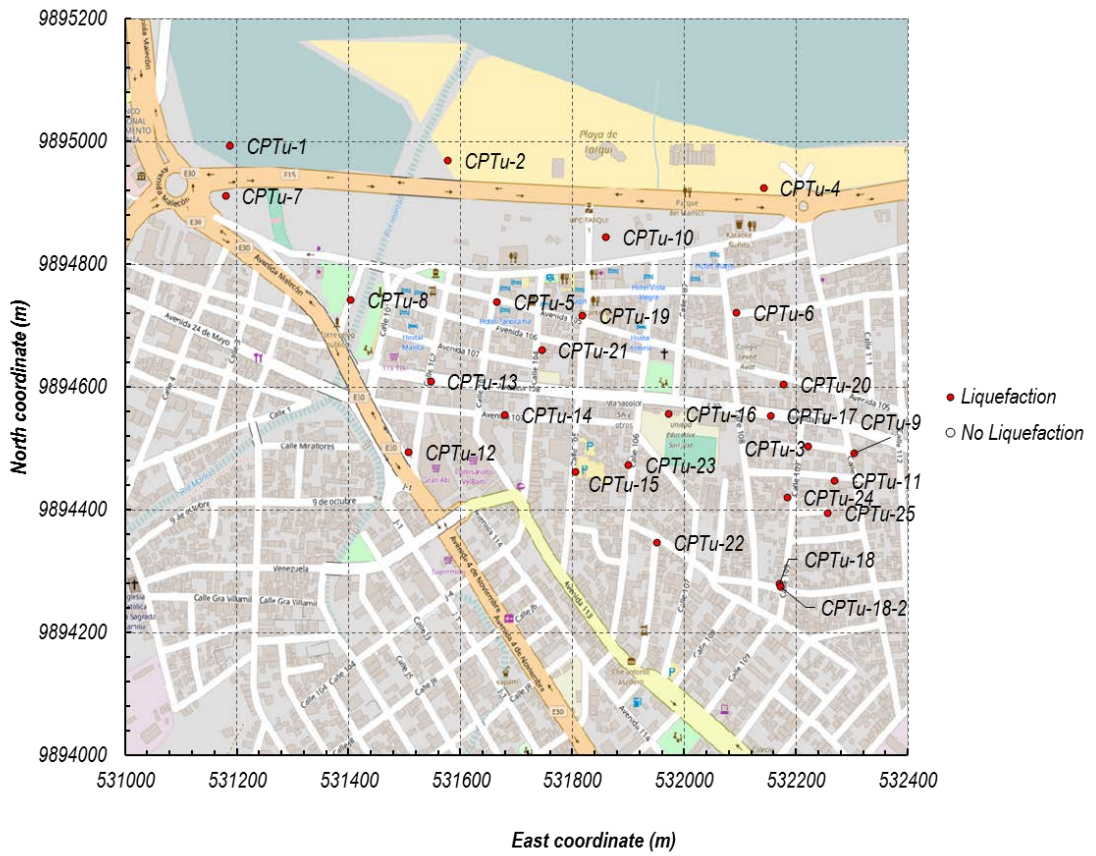


Figura 19. Mapa de sondeos CPTu según su potencial de licuación.

4.3. Comparación de resultados del análisis cuantitativo de la licuación de suelos de ensayos *SPT* vs. sondeos *CPTu* cercanos (sismo 16 de abril, 2016)

Se elaboraron 11 comparaciones de los resultados obtenidos de ensayos *SPT* y *CPTu* cercanos (distancia entre ellos menor o igual a 25 metros). A continuación, se presenta en la Tabla # 5 un resumen de las comparaciones realizadas en base a los resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación de las perforaciones *SPT* y los sondeos *CPTu* del sector de Tarqui, ubicado en la provincia de Manabí, Ecuador.

SPT vs. CPTu liquefaction triggering analysis comparison summary																					
Project:		Microzonificación Tarqui			Observations: PGA values obtained from the Seismic Site Response Analysis performed based on the April 16, 2016 Ecuador earthquake.																
Location:		Tarqui	Depth for LDI & S analysis (m)		18																
Solicited by:		MIDUVI																			
Reviewed by:		Ing. Jorge Ordóñez: jorgeordonezr@gmail.com		Date:	May 22, 2017		Procedure(s) implemented:		Fines Liq. Susceptibility: Bray & Sancio (2006) FS: Idriss & Boulanger (2014); LPI: Iwasaki (1982) C _R : Tolga (2014) LDI: S: Idriss & Boulanger (2008)												
Comparison	Distance (m)	Boring	PGA	M _w	Ground elevation (m)	Water table depth (m)	Liquefaction?	LPI	LSN	LDI	S	Sounding	PGA CPT	Mw CPT	Ground elevation (m) CPT	Water table depth (m) CPT	Liquefaction? CPT	LPI CPT	LSN CPT	LDI CPT	S CPT
P-1 - CPTu-1	22.0	P-1	0.31	7.8	4.00	0.70	YES	6.04	44.46	0.4396	0.0555	CPTu-1	0.31	7.8	4.25	1.00	YES	11.82	20.66	0.7743	0.0828
P-3 - CPTu-2	24.0	P-3	0.51	7.8	3.34	0.80	YES	11.77	29.79	0.4416	0.0699	CPTu-2	0.51	7.8	3.50	0.75	YES	30.14	56.60	1.5559	0.1754
P-6 - CPTu-4	17.0	P-6	0.38	7.8	3.50	0.90	YES	2.12	11.84	0.1438	0.0283	CPTu-4	0.38	7.8	3.65	1.00	YES	2.66	4.33	0.1045	0.0223
P-14 - CPTu-10	19.0	P-14	0.38	7.8	4.00	2.00	NO	0.00	0.06	0.0035	0.0006	CPTu-10	0.38	7.8	4.00	2.00	YES	5.28	7.77	0.2775	0.0473

P-15 - CPTu-9	21.0	P-15	0.41	7.8	7.00	2.00	YES	1.96	3.80	0.1426	0.0150	CPTu-9	0.41	7.8	6.59	1.00	YES	10.74	13.69	0.7533	0.0834
P-18 - CPTu-13	10.0	P-18	0.38	7.8	5.00	2.85	YES	7.32	12.17	0.5620	0.0637	CPTu-13	0.38	7.8	4.73	1.50	YES	9.46	16.77	0.5970	0.0897
P-23 - CPTu-18	4.0	P-23	0.52	7.8	9.50	2.10	YES	2.59	7.75	0.2098	0.0169	CPTu-18	0.52	7.8	9.50	2.00	YES	6.18	9.11	0.2904	0.0370
P-25 - CPTu-17	12.0	P-25	0.35	7.8	5.86	2.00	YES	7.87	10.81	0.5118	0.0801	CPTu-17	0.35	7.8	6.13	0.75	YES	6.97	13.49	0.5123	0.0688
P-26 - CPTu-5	22.0	P-26	0.51	7.8	5.00	2.10	YES	15.74	28.25	0.8107	0.0956	CPTu-5	0.51	7.8	4.68	3.50	YES	10.69	20.40	0.4509	0.0658
P-27 - CPTu-19	14.0	P-27	0.29	7.8	7.77	3.05	YES	0.30	2.52	0.0672	0.0170	CPTu-19	0.29	7.8	7.50	5.22	YES	4.35	11.43	0.4516	0.0606
P-28 - CPTu-3	5.3	P-28	0.41	7.8	7.50	1.15	YES	5.01	26.06	0.3727	0.0347	CPTu-3	0.41	7.8	7.50	3.00	YES	1.05	2.31	0.0620	0.0103

Tabla # 5. Comparación de resultados del análisis cuantitativo de la licuación de suelos de ensayos *SPT* vs. sondeos *CPTu* cercanos (sismo 16 de abril, 2016).

Las comparaciones de los resultados obtenidos de *LPI*, *LSN*, *LDI* y S_{v-1D} expuestos en la Tabla # 5 se presentan gráficamente en la Figura 20, Figura 21, Figura 22, y Figura 23, respectivamente:

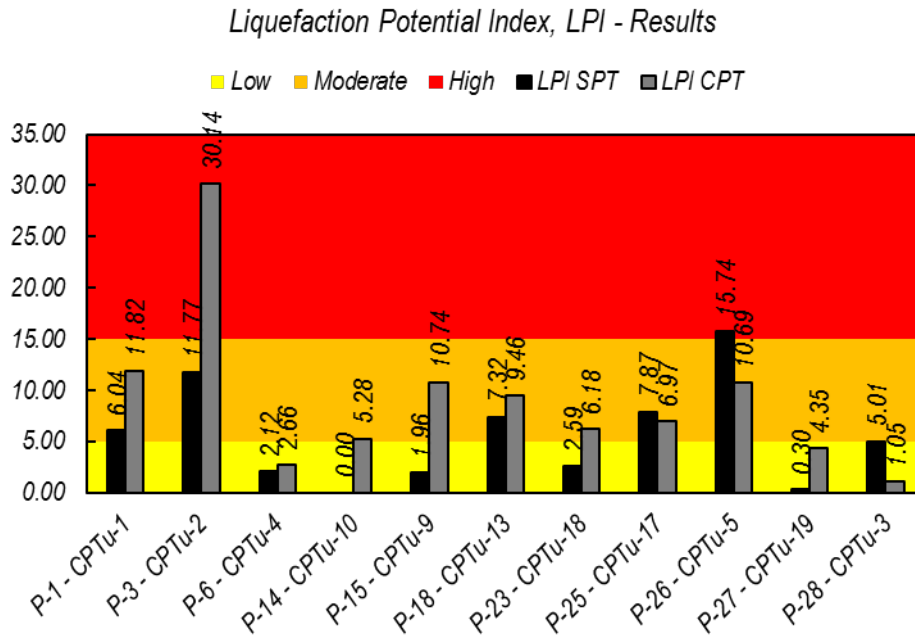


Figura 20. Resultados de *LPI* a partir de la comparación *SPT* vs. *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016).

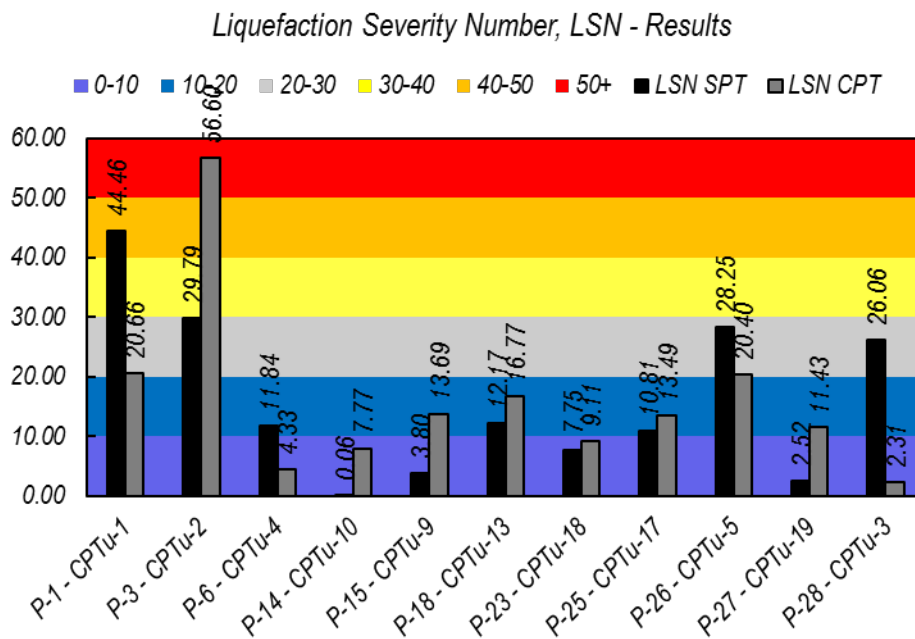


Figura 21. Resultados de LSN a partir de la comparación SPT vs. $CPTu$ (sismo 16 de abril, 2016).

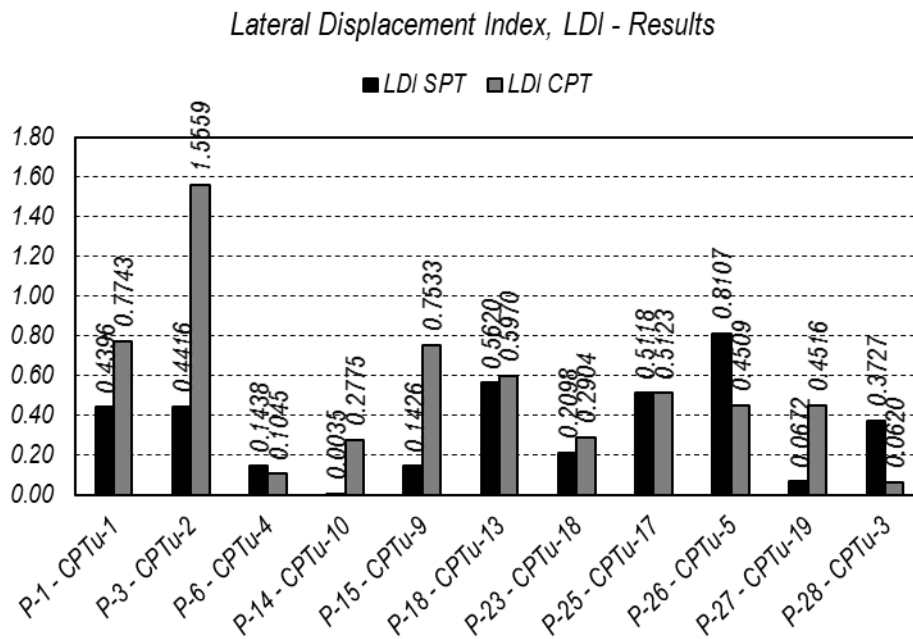


Figura 22. Resultados de LDI a partir de la comparación SPT vs. $CPTu$ (sismo 16 de abril, 2016).

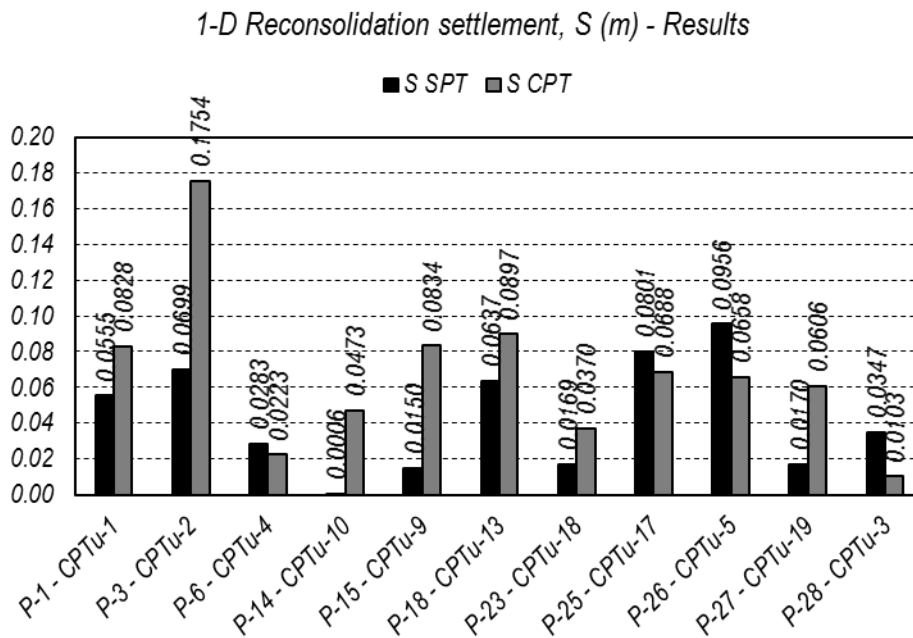


Figura 23. Resultados de S_{v-1D} a partir de la comparación SPT vs. $CPTu$ (sismo 16 de abril, 2016).

4.4. Mapas de valores promedio de *LPI*, *LSN*, y *LDI* en base al *SPT* y *CPTu*

Una vez estimados los índices de potencial de licuación (*LPI*), números de severidad de licuación (*LSN*), e índices de desplazamiento lateral (*LDI*) para los diferentes sondeos *SPT* y *CPTu*, se han trazado mapas de contornos con estas estimaciones para obtener así una distribución espacial de los mismos. En la Figura 24, Figura 25 y Figura 26 se presentan los mapas de índices de potencial de licuación, números de severidad de licuación, e índices de desplazamiento lateral, respectivamente. Los mapas de deformaciones han sido contrastados con mediciones de las mismas, ya sea directamente en las exploraciones de campo o mediante fotografías de zonas de daños. Adicionalmente, se han incluido los daños en cimentaciones generados por el sismo del 16 de abril, datos que han sido proporcionados por la Secretaría de Gestión de Riesgo y fueron recopilados en las días y semanas siguientes del terremoto.

Si bien el mapa de desplazamiento lateral provee un indicio del grado de licuación y daños esperados en el sitio, las estimaciones de desplazamiento horizontal real del suelo son función de la pendiente del terreno, por lo que este mapa deberá complementarse con el de pendientes para tener adecuadas estimaciones de rangos de deformación.

4.4.1. Mapa de valores promedio de *LPI* en base al *SPT* y *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016)



Figura 24. Mapa de valores promedio de *LPI* en base al *SPT* y *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016). Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).

4.4.2. Mapa de valores promedio de *LSN* en base al *SPT* y *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016)

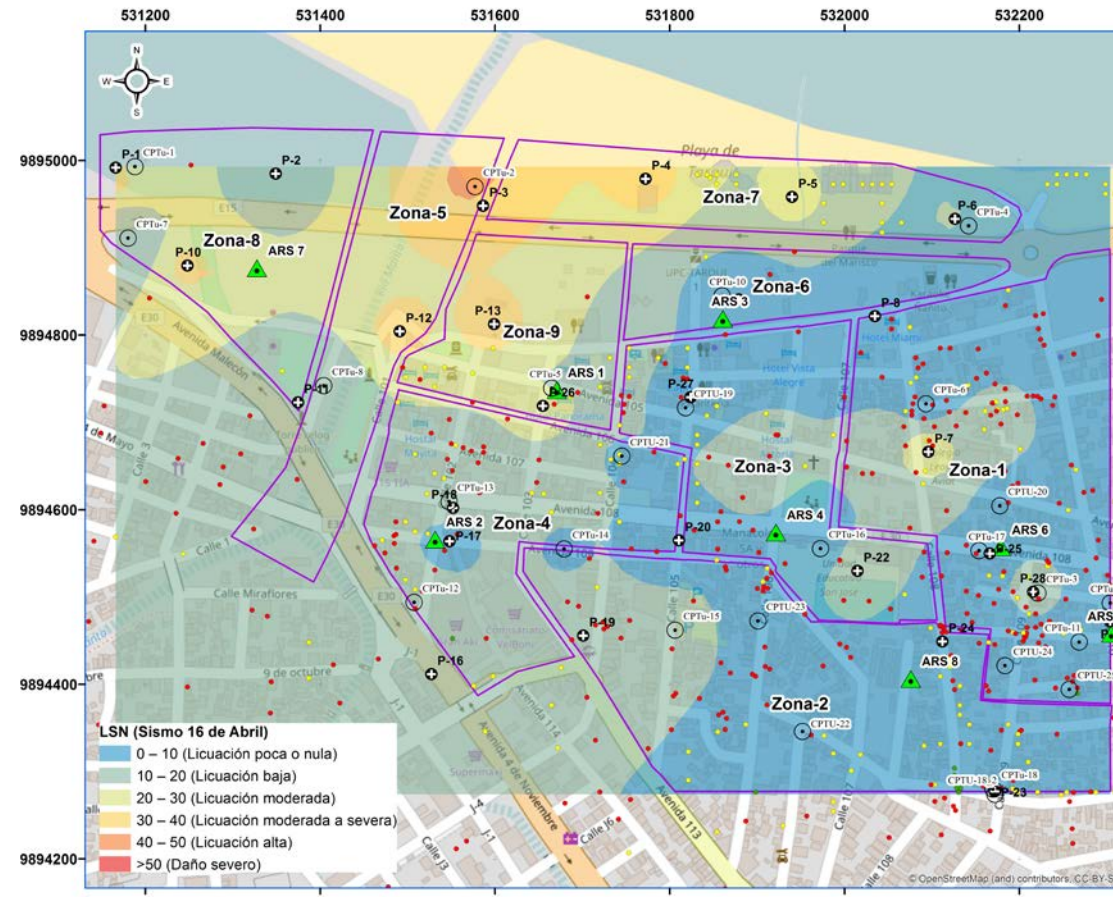


Figura 25. Mapa de valores promedio de *LSN* en base al *SPT* y *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016). Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).

4.4.3. Mapa de valores promedio de *LDI* en base al *SPT* y *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016)

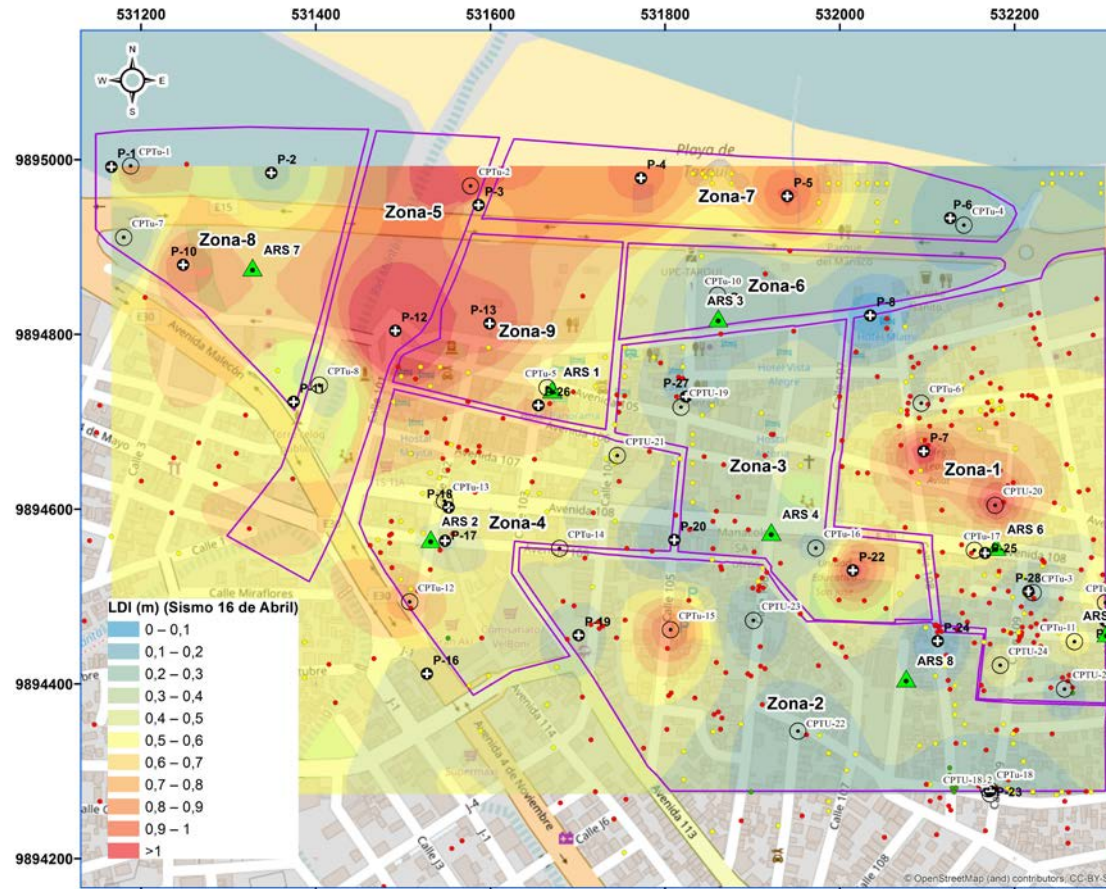


Figura 26. Mapa de valores promedio de *LDI* en base al *SPT* y *CPTu* (sismo 16 de abril, 2016). Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).

4.5. Desarrollo de curvas de casos-historia CSR vs. $(N_1)_{60cs}$ y CSR vs. q_c

En base a los resultados obtenidos mediante el análisis cuantitativo del potencial de licuación se procedió a resumir y validar los mismos con lo observado en campo en aquellas perforaciones donde se posee evidencia certera de que se suscitó o no el fenómeno de licuación, de tal manera que se genera lo que se denomina un “caso-historia”, tal como se muestra en la Figura 27 y Figura 28. Se puede observar que la metodología de (Boulanger & Idriss, 2014) es la que mejor estima los resultados tanto en el caso del SPT y del *CPTu*.

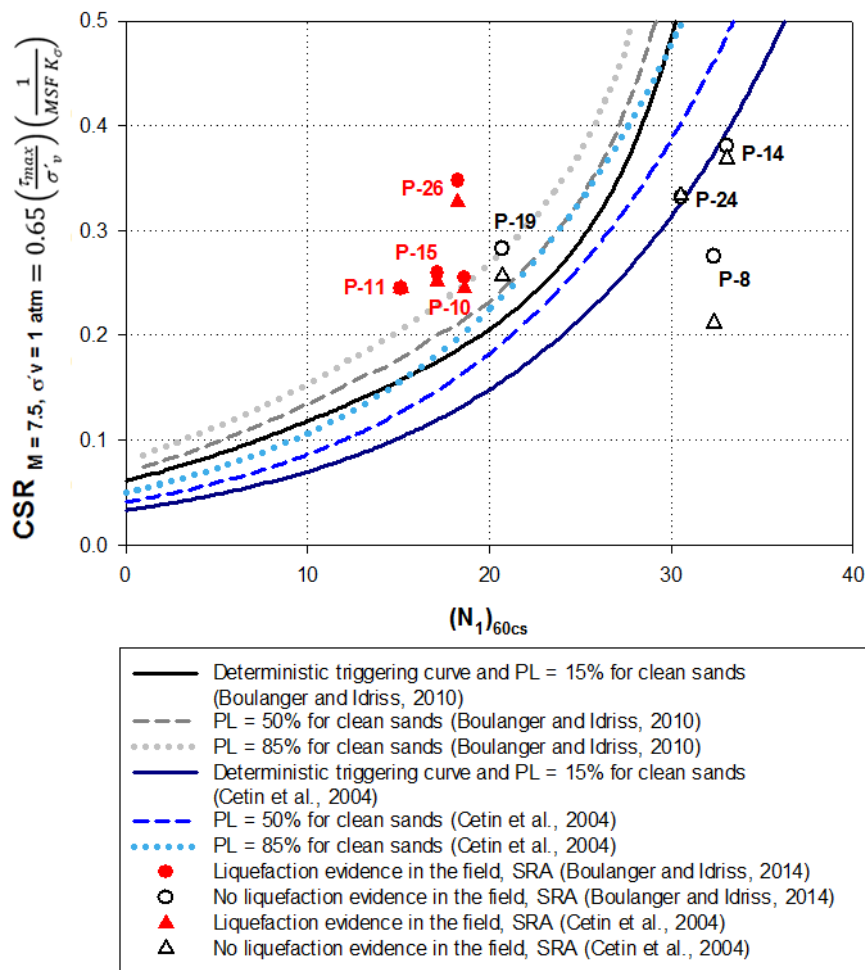


Figura 27. Curvas de casos-historia CSR vs. $(N_1)_{60cs}$ desarrolladas para Tarqui. Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).

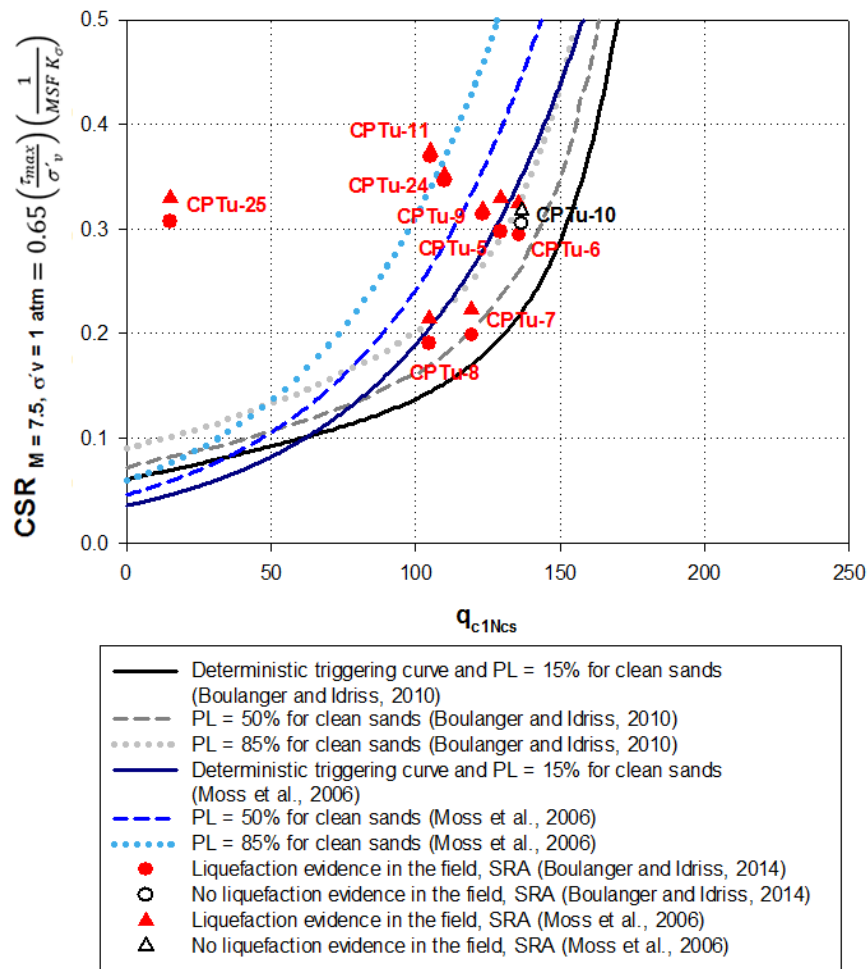


Figura 28. Curvas de casos-historia CSR vs. q_{c1Ncs} desarrolladas para Tarqui. Fuente: (GEOESTUDIOS, 2016).

Mientras el criterio principal fue seguido, calculando las curvas determinísticas de desencadenamiento de licuación recomendadas por los autores (PL=15%), se calcularon adicionalmente las curvas para las probabilidades de licuación de 50% y 85%.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la información recopilada para realizar el presente estudio, se puede concluir que no hubo antes estudios de licuación 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 sueltas y suelos finos de baja densidad en toda el área estudiada.

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante la metodología de (Boulangier & Idriss, 2014) para el análisis del potencial de licuación en el área de Tarqui y a la estimación de los parámetros *LPI* y *LSN*, se concluye que el sector posee, en su mayoría, suelos altamente susceptibles licuarse, principalmente debido al predominio de suelos arenosos saturados y sueltos en el sector. Esto es una manera cuantitativa de validar los efectos del fenómeno de licuación observados en la superficie.

En base a los resultados de asentamientos y desplazamientos laterales y comparación de los mismos entre los procedimientos en base al *SPT*, *CPTu* y con los valores medidos y observaciones en sitio posteriores al sismo del 16 abril de 2016 se concluye que los análisis son representativos de lo ocurrido en sitio.

Se recomienda, en caso que la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015) lo requiera, utilizar la metodología planteada en esta investigación para estimar el potencial de un sitio a licuarse, así como predecir los asentamientos y desplazamientos laterales.

Es importante, al realizar un estudio de evaluación de potencial de licuación de un sitio, optar por utilizar una metodología de análisis que sea

considerada como aceptada ampliamente y que sea parte del estado del arte del estudio del fenómeno de licuación.

Cabe recalcar lo importante que es la correcta obtención de los datos de entrada para el análisis de potencial de licuación, es decir, datos como los obtenidos de la exploración de sitio por medio de los ensayos *SPT* o *CPTu*, los datos obtenidos en laboratorio en los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, etc. y datos del correspondiente análisis de respuesta de sitio realizado. Es más que lógico la importancia de realizar un análisis con datos correctos, ya que por más que la metodología implementada esté correcta, si los datos de entrada están mal estimados, los resultados también lo estarán.

Se recomienda aprender de la lamentable lección que dejó el sismo del 16 de abril del 2016 en no subestimar el comportamiento del suelo en un sitio ante la presencia de un sismo, como es el caso del ocurrido fenómeno de licuación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altares, P. S., Copo, A. R., Gabuyo, Y. A., Laddaran, A. T., Mejía, L. D., Policarpio, I. A., & Tizon, H. D. (2003). *Elementary Statistics : a Modern Approach*. REX Book Store.
- ASTM International. (2010). ASTM D2216 - 10. *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2010). ASTM D4318 - 10. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2011). ASTM D1586 - 11. *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM International. (2016). ASTM D3441 - 16. *Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Testing of Soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2016). ASTM D422-63. *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. University of California, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, Davis, CA.

- Bray, J. D., & Sancio, R. B. (9 de 2006). Assessment of the Liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(9), 1165-1177.
doi:10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:9(1165)
- GEOESTUDIOS. (2016). *Estudio geotécnico y de riesgo sísmico para lotes ubicados en el barrio Tarqui de la ciudad de Manta*. Guayaquil: GEOESTUDIOS.
- Holzer, T. L., Bennett, M. J., Noce, T. E., Padovani, A. C., & Tinsley, J. C. (8 de 2006). Liquefaction hazard mapping with LPI in the greater Oakland, California, area. *Earthquake Spectra*, 22(3), 693-708.
doi:10.1193/1.2218591
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute (EERI).
doi:ISBN #978-1-932884-36-4
- Ishihara, K. (1985). Stability of natural deposits during earthquakes. En A. Balkema, *Proceedings of the eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 4, págs. 321-376). San Francisco, CA: A A Balkema Publishers.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuko, F., & Yasuda, S. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. En *Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation* (págs. 885–896). San Francisco.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., & Sato, H. (1982). Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. En

Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation. Seattle: 1319–1330.

Juang, C. H., Yuan, H., Li, D. K., Yang, S. H., & Christopher, R. A. (7 de 2005). Estimating severity of liquefaction-induced damage near foundation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(5), 403-411.
doi:10.1016/j.soildyn.2004.11.001

Luna, R., & Frost, J. D. (1 de 1998). Spatial Liquefaction analysis system. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 12(1), 48-56. doi:10.1061/(asce)0887-3801(1998)12:1(48)

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito, Pichincha, Ecuador.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). *State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences*.

Ordóñez, J. (s.f.). JLiQ SPT.

Robertson, P. K. (6 de 2010). Evaluation of flow Liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(6), 842-853.
doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000286

Robertson, P., & Wride, C. (1997). Cyclic liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT. *Final Contribution to the Proceedings of the 1996 NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance* (págs. 41-88). Salt Lake City, Utah: National Center for Earthquake Engineering Research.

- Robertson, P., & Wride, C. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442-459. doi:10.1139/cgj-35-3-442
- Seed, B. H., & Idriss, I. M. (1982). *Ground motions and soil Liquefaction during earthquakes*. Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Institute.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (9 de 1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97, 1249-1273.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., & Chung, R. M. (12 de 1985). Influence of SPT procedures in soil Liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12), 1425-1445. doi:10.1061/(asce)0733-9410(1985)111:12(1425)
- Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Géotechnique*, 36(3), 425-447. doi:10.1680/geot.1986.36.3.425
- Sladen, J. A., D'Hollander, R. D., & Krahn, J. (11 de 1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(4), 564-578. doi:10.1139/t85-076
- Sonmez, H. (10 de 2003). Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, turkey). *Environmental Geology*, 44(7), 862-871. doi:10.1007/s00254-003-0831-0

- Tolga, T. D. (2014). *Overburden Stress Normalization and Rod Length Corrections for the Standard Penetration Test*. Berkeley: UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations.
- Toprak, S., & Holzer, T. L. (4 de 2003). Liquefaction potential index: Field assessment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(4), 315-322. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2003)129:4(315)
- Ulusay, R., & Kuru, T. (5 de 2004). 1998 Adana-Ceyhan (turkey) earthquake and a preliminary Microzonation based on Liquefaction potential for Ceyhan town. *Natural Hazards*, 32(1), 59-88.
doi:10.1023/b:nhaz.0000026790.71304.32
- van Ballegooy, S., Malan, P., Lacrosse, V., Jacka, M. E., Cubrinovski, M., Bray, J. D., . . . Cowan, H. (2 de 2014). Assessment of Liquefaction-Induced land damage for residential Christchurch. *Earthquake Spectra*, 30(1), 31-55.
doi:10.1193/031813eqs070m
- Wood, D. M. (1991). *Soil behaviour and critical state soil mechanics*. New York: Cambridge University Press.
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (4 de 2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of Liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297-313. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:4(297)

7. ANEXOS

7.1. Flujograma del proceso de cálculo del (FS_{liq}) según la metodología de (Boulanger & Idriss, 2014) basado en el ensayo SPT

Se procedió a diseñar un flujograma del proceso de cálculo del factor de seguridad contra la licuación (FS_{liq}) según la metodología de (Boulanger & Idriss, 2014) basándose en el ensayo SPT.

Se distingue en el flujograma la utilización de diferentes colores para la representación de la fuente de los datos de entrada que se usaron, los cuales básicamente son obtenidos de la exploración del sub-suelo del sitio (y sus consiguientes ensayos de laboratorio) y del análisis de respuesta de sitio, fuentes que se apoyan en la geología, geotecnia, y sismología respectivamente.

La convención de los símbolos usados se ajusta al tipo de flujograma estándar o típico, en el cual cada símbolo representa un tipo diferente de elemento, sea un dato, un condicional, un proceso, etc. Esto se muestra con mayor claridad en la Figura 29.




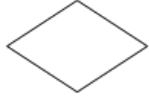


Símbolo	Nombre	Descripción
	Inicio/Fin	Un punto de inicio o fin de un proceso
	Flecha	Conector que muestra la relación entre formas
	Input manual	Dato entrado manualmente en el sistema
	Decisión	Un condicional en el proceso
	Proceso	Una operación o paso de acción
	Conector	Un salto de un punto a otro

Figura 29. Convención de la simbología usada en el flujograma.

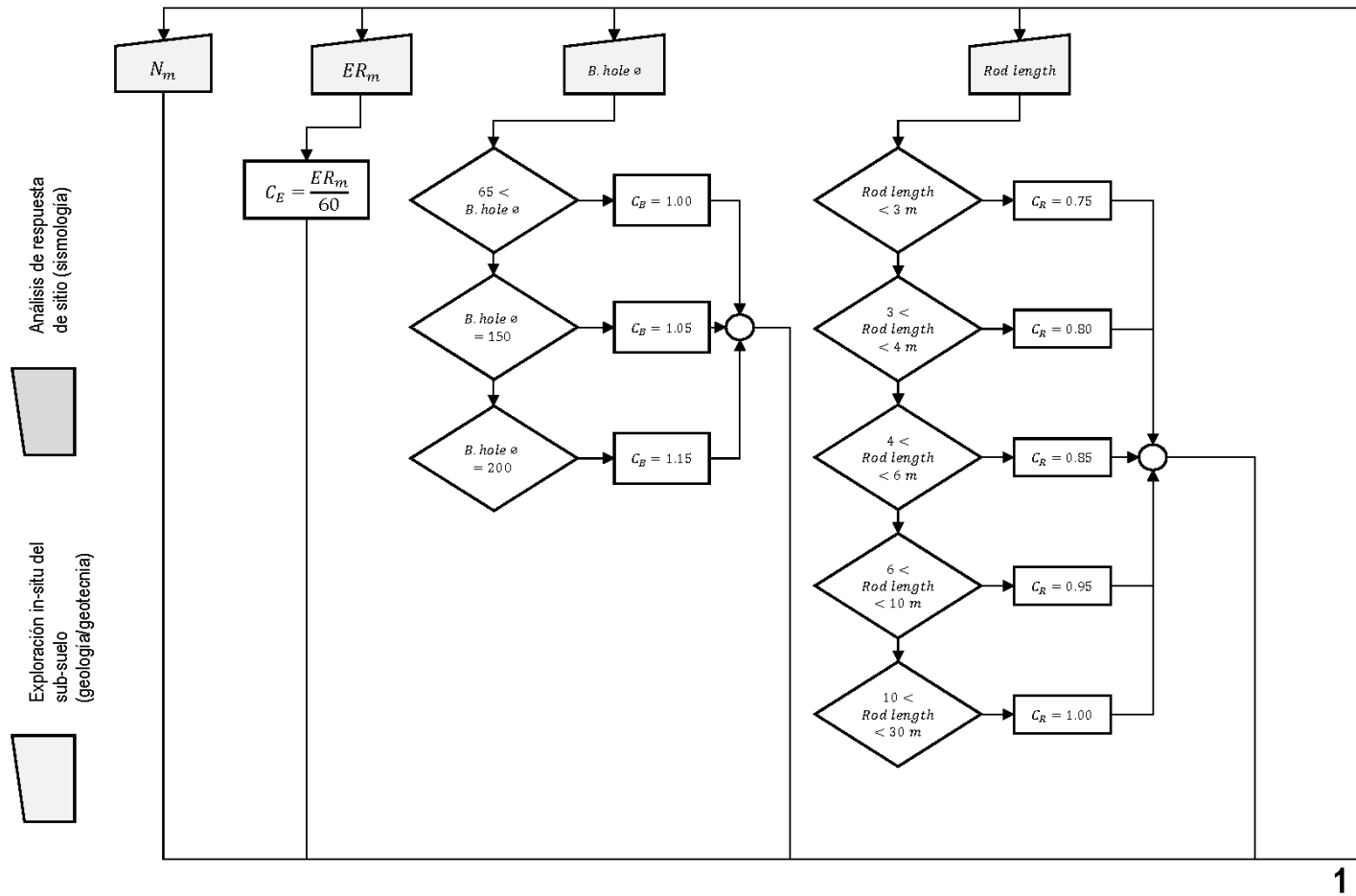


Figura 30. P.1 Flujoograma del proceso de cálculo del (FS_{liq}) según la metodología de (Boulanger & Idriss, 2014) basado en el ensayo SPT.

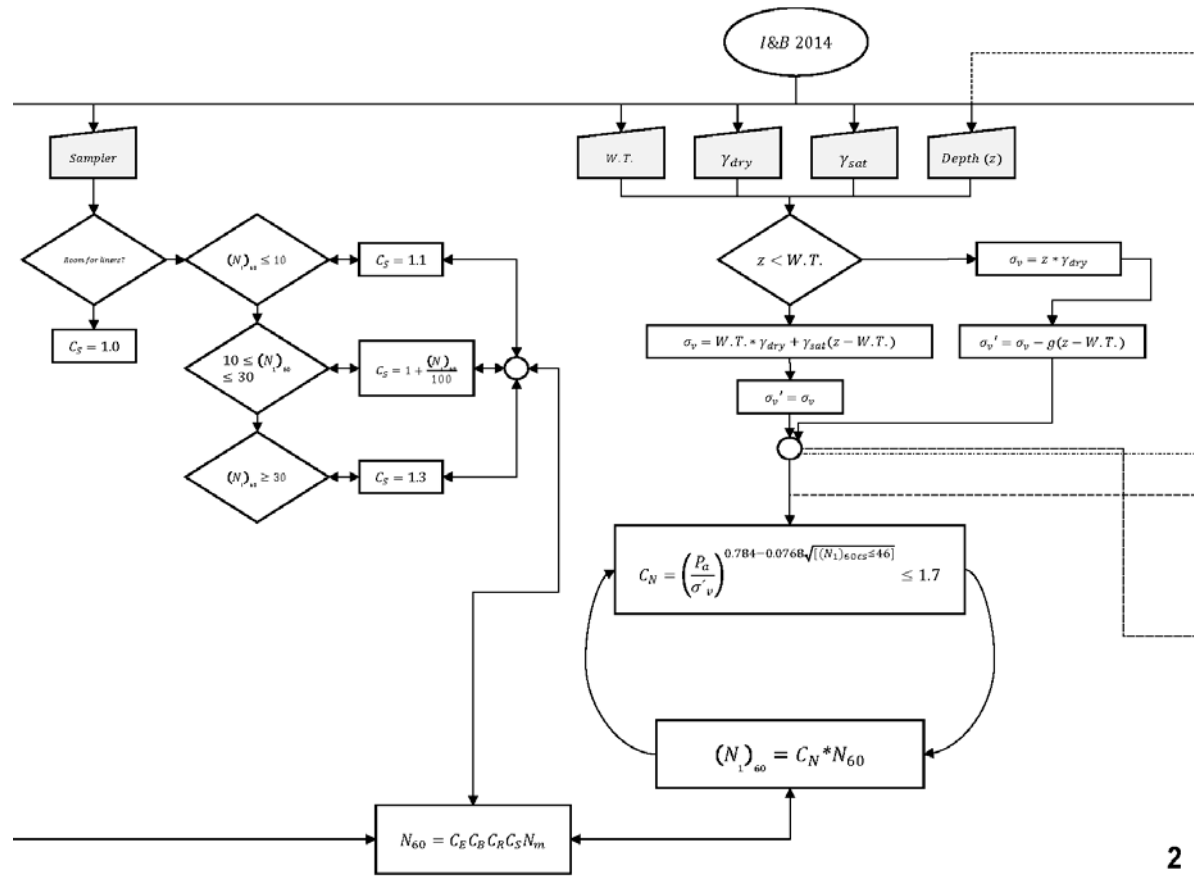


Figura 31. P.2 Flujoograma del proceso de cálculo del (FS_{liq}) según la metodología de (Boulanger & Idriss, 2014) basado en el ensayo *SPT*.

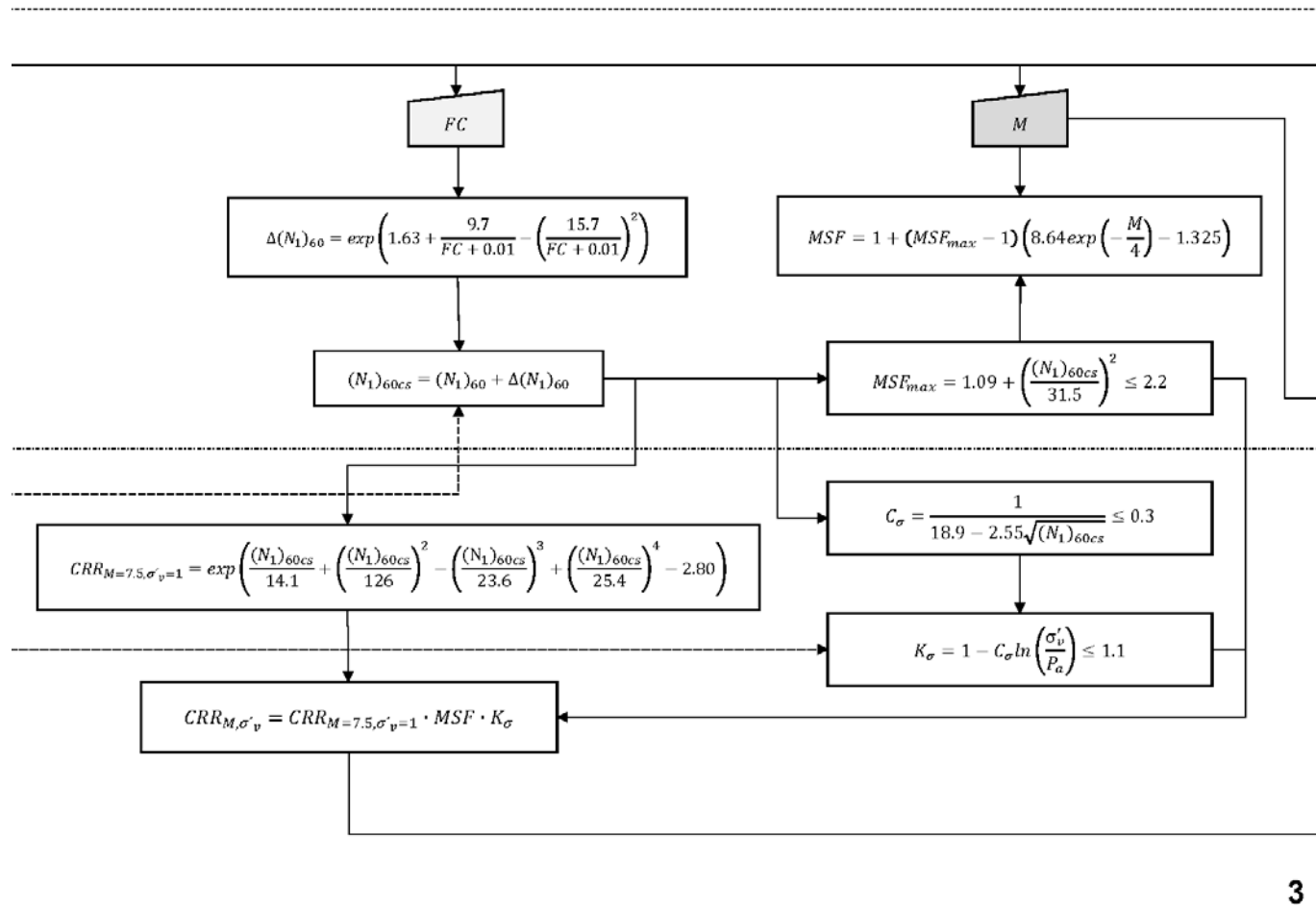
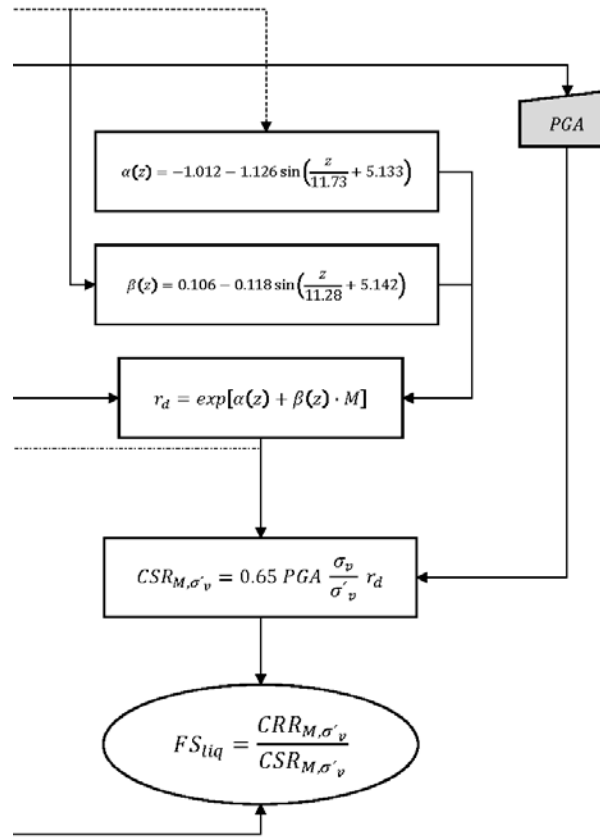


Figura 32. P.3 Flujoograma del proceso de cálculo del $(FS)_{liq}$ según la metodología de (Boulanger & Idriss, 2014) basado en el ensayo SPT .



4

Figura 33. P.3 Flujograma del proceso de cálculo del (FS_{liq}) según la metodología de (Boulanger & Idriss, 2014) basado en el ensayo SPT .

7.2. Análisis cuantitativo de potencial de licuación individual para P-1 y CPTu-1.

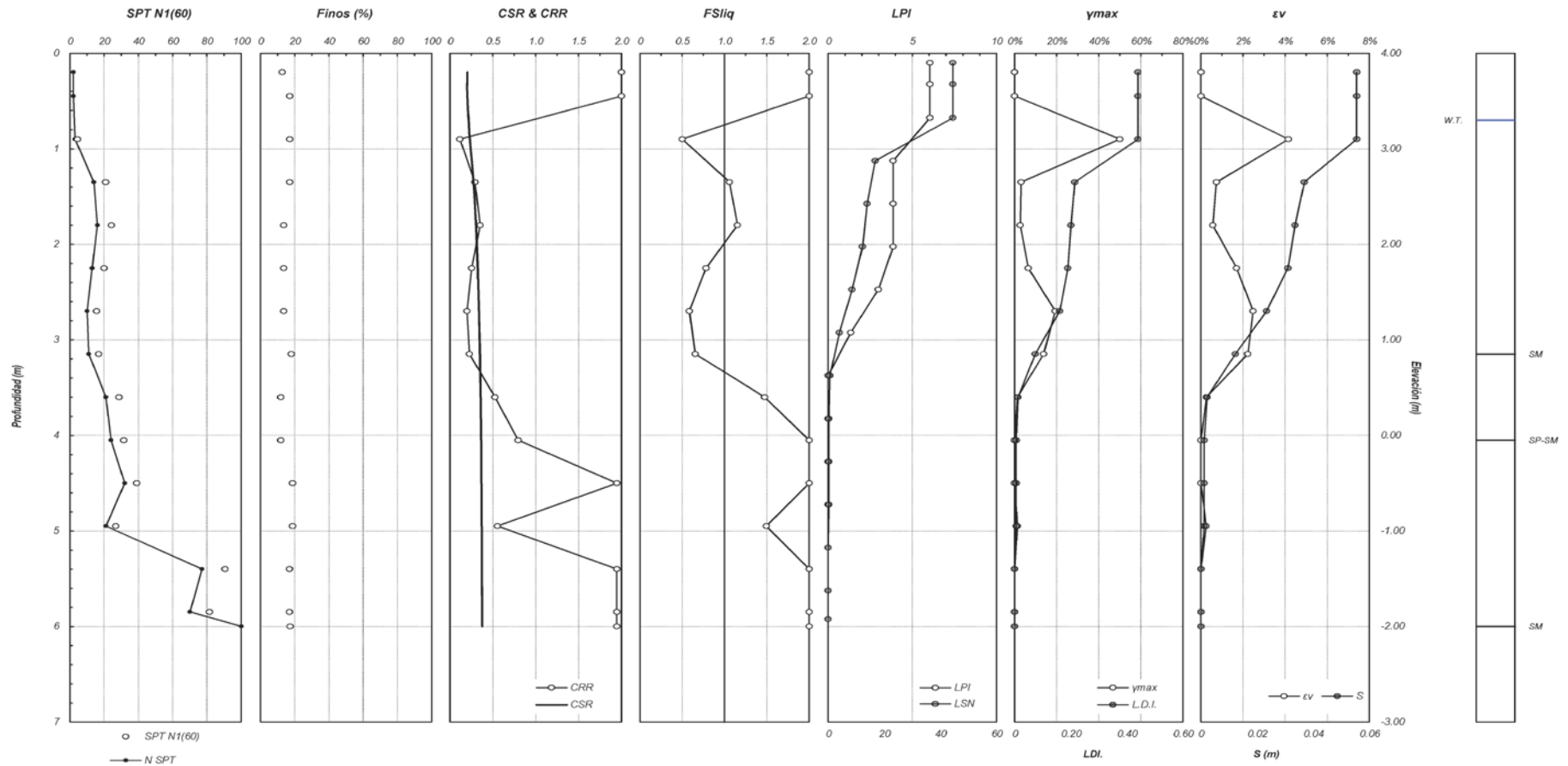


Figura 34. Análisis cuantitativo de potencial de licuación P-1.

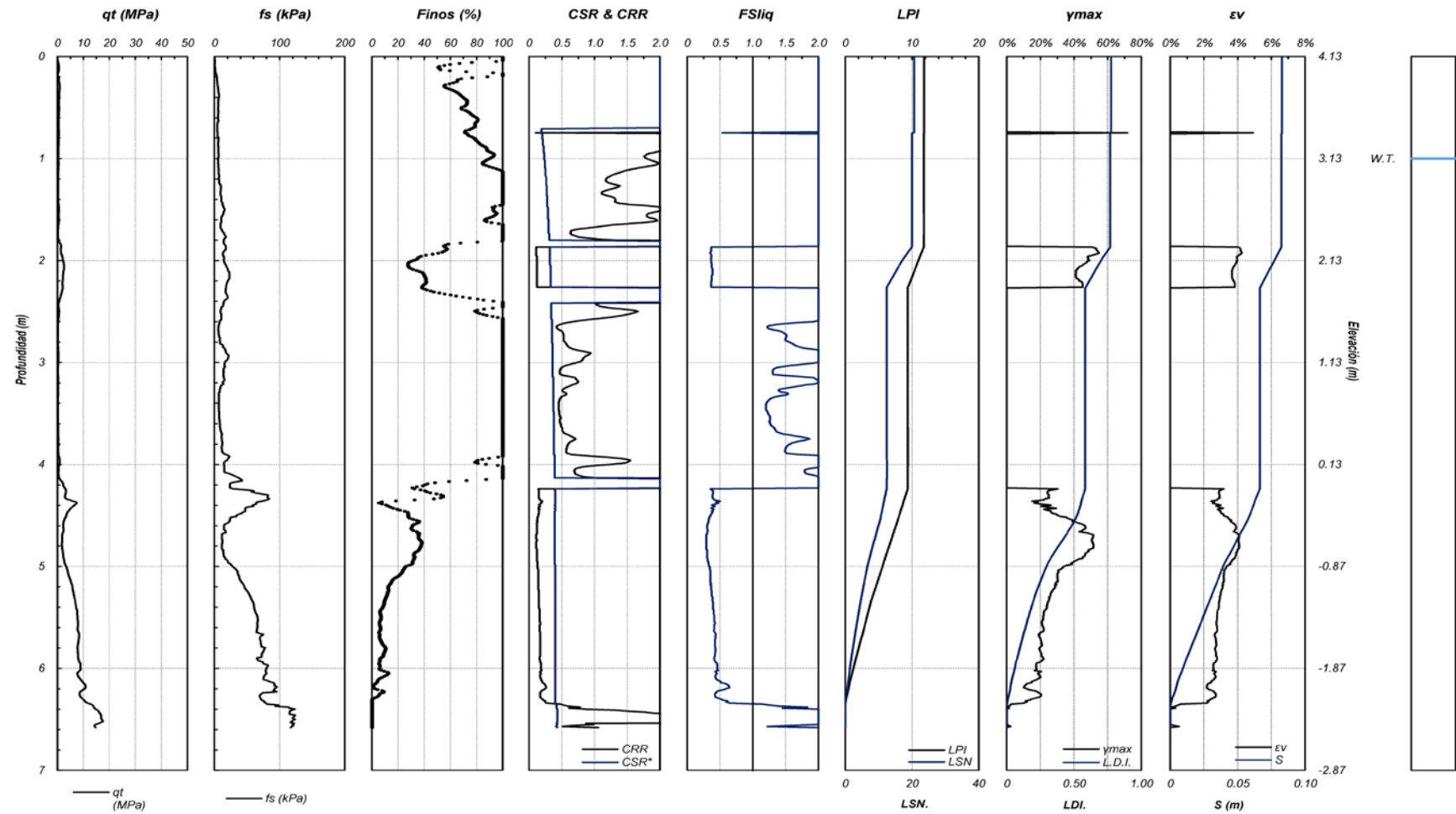


Figura 35. Análisis cuantitativo de potencial de licuación CPTu-1.