

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PROPUESTA DE ACTUALIZACIÓN DEL CAPÍTULO DE
LICUACIÓN EN LA NORMA TÉCNICA DE EDIFICACIONES**

E.050 SUELOS Y CIMENTACIONES

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

JUAN LUIS ANDRÉ GÁLVEZ GHIGGO

ASESOR:

JORGE VICTOR JOSÉ ZEGARRA PELLANNE

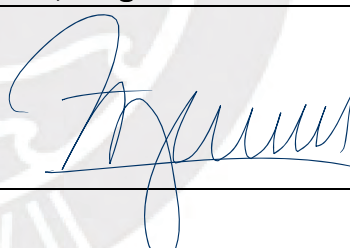
Lima, Septiembre, 2025

Informe de Similitud

Yo, **Jorge Víctor José Zegarra Pellanne**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada **Propuesta de actualización del capítulo de licuación en la Norma Técnica de Edificaciones NTE E.050-18 Suelos y cimentaciones** del autor **Juan Luis André Gálvez Ghiggo**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 9%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 8 de octubre de 2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lima, 8 de octubre de 2025

Apellidos y nombres del asesor: Zegarra Pellanne, Jorge Víctor José	
DNI: 07819309	Firma 
ORCID: 0000-0002-4207-311	

DEDICATORIA

Expreso mi máxima gratitud a mis padres, quienes nunca dudaron en apoyarme con ímpetu, nunca dejando de brindarme consejos durante toda la vida universitaria, y en particular, en el proceso que me tomó redactar esta tesis. Me debo a su apoyo y ejemplo de vida, y este es un paso en el camino para retribuirles lo que dieron, y siguen dando por mí.



AGRADECIMIENTOS

Al Mg. Jorge Zegarra Pellanne, cuyo apoyo fue fundamental para la realización de esta tesis y me brindó la orientación necesaria para poder interiorizar los conceptos presentados. Al Dr. Franklin Olaya, quien me apoyó en las etapas finales de esta tesis con observaciones puntuales.



RESUMEN

Dentro de la geotecnia sísmica, el fenómeno de licuación suscita particular interés debido a sus consecuencias, las cuales involucran daños considerables en la infraestructura, edificaciones y servicios, ocasionando pérdidas económicas y riesgos para la vida. Este fenómeno, de carácter local, es ocasionado por sismos severos si las características del suelo— clasificación SUCS, densidad, saturación de poros— son las indicadas. En varias zonas del Perú se cumplen las condiciones para la ocurrencia de este fenómeno, principalmente por la elevada sismicidad y la presencia de suelos susceptibles, con ocurrencias previas documentadas. La Norma Técnica E.050 *Suelos y Cimentaciones* (2018) establece las condiciones mínimas para la cimentación de edificaciones, incluyendo requisitos para evitar los daños causados por licuación; sin embargo, su planteamiento para el análisis de licuación no incluye los estudios más recientes y presenta inconsistencias. En esta tesis, se realiza una revisión de la extensa bibliografía sobre este fenómeno (artículos y códigos internacionales), que abarca la evaluación del potencial de licuación de un sitio en base a los parámetros de campo como N , V_s y q_c , con énfasis en el método simplificado basado en esfuerzos. Enfoques alternativos de evaluación de potencial de licuación también son abordados, con sus ventajas y desventajas. Los principales cambios de esta nueva propuesta incluyen: nuevas correlaciones de resistencias a la licuación, el permitir la evaluación del potencial de licuación mediante métodos de campo distintos al SPT, la evaluación de la susceptibilidad a la licuación mediante el índice SRF, el efecto de una capa no licuable bajo una capa licuable (modelo de Ishihara), entre otros. Finalmente, se presentan requisitos de la evaluación del potencial de licuación en torno al tipo de edificación a construir, se da pautas sobre la aplicación del enfoque probabilístico y se ofrece un flujo de procesos guía para las decisiones, con el fin de orientar al profesional responsable.

ÍNDICE

RESUMEN	i
1. Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivos de la investigación	1
1.2.1 Objetivo general	1
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Metodología, alcances y limitaciones de la investigación	3
1.4 Justificación.....	4
2. Marco teórico.....	6
2.1 Licuación de suelos	6
2.1.1 Características de suelos susceptibles a licuar.....	10
2.1.2 Sismología del Perú.....	12
2.1.3 Licuación, caracterización geotécnica y geología del Perú.....	16
2.1.4 Licuación, caracterización geotécnica y geología de Lima.....	19
2.2 Antecedentes internacionales	23
2.2.1 Eurocódigo.....	23
2.2.2 <i>American Society of Civil Engineers (ASCE)</i>	24
2.2.3 México	25
2.2.4 Costa Rica.....	28
2.2.5 Colombia	30
2.2.6 Los métodos geofísicos	31
2.3 Antecedentes nacionales: NTE E.050	31
2.4 Estado del arte: el método simplificado basado en esfuerzos	33
2.4.1 Antecedentes.....	33
2.4.2 Método simplificado (basado en esfuerzos), ruta de la E.050.....	35
2.4.3 Índices de potencial de licuación.....	50
2.4.4 Modelo de manifestación superficial de Ishihara (1985)	59
2.4.5 Evaluación de la licuación en suelos finos: degradación cíclica	64
2.4.6 Consecuencias de degradación cíclica en suelos finos.....	69
2.4.7 Evaluación de la licuación por métodos geofísicos.....	70
2.4.8 Comparación teórica y limitaciones de la evaluación de licuación por ensayo SPT y por métodos geofísicos	76
2.4.9 Licuación en suelos gravosos	77
2.4.10 Efectos post-licuación.....	83
2.4.11 Métodos alternativos.....	86
2.4.12 Estudio de licuación mediante procedimientos de laboratorio	95

2.4.13	Medición en campo de generación de presión de poros	97
2.4.14	Evaluación mediante métodos computacionales	98
3.	Licuación de suelos en la NTE E.050 (2018): una visión general	101
3.1	Condiciones previas	101
3.2	Exploración de Campo	101
3.3	Muestreo y ensayos de laboratorio	102
3.4	Metodología de evaluación	102
4.	Observaciones y discusión.....	104
4.1	Descripción de interrogantes y cuestionamientos, partiendo de la revisión bibliográfica	104
4.1.1	Artículos 38.1. y 38.2.	104
4.1.2	Artículo 38.4.3.	106
4.1.3	Artículo 38.5.2.	106
4.1.4	Artículo 38.5.3.	108
4.1.5	Artículo 38.5.4.	109
4.1.6	Artículo 38.5.5.	109
4.1.7	Artículo 38.5.6.	109
4.1.8	Artículo 38.5.7.	110
4.1.9	Artículo 38.6.1.	110
4.1.10	Artículo 38.6.4.	110
4.1.11	Sismo de diseño en licuación.....	111
4.1.12	Factor de participación de masa corte no lineal (r_d)	111
4.1.13	Los métodos geofísicos	112
4.1.14	Índices propuestos para el estudio de severidad de licuación	117
4.1.15	Curvas actualizadas de CRR.....	118
4.1.16	Incongruencia entre valores de F_{SL} y P_L (determinístico y probabilístico), e insuficiencia de tales parámetros para controlar el riesgo	118
4.1.17	Otras observaciones	119
4.2	Discusión de problemáticas planteadas.....	119
4.2.1	Evaluación de licuación por ensayos geofísicos.....	121
4.2.2	Evaluación probabilística de sismos en el método simplificado por esfuerzos.....	122
4.2.3	Parámetros probabilísticos.....	137
4.2.4	Comparación de factores r_d	139
4.2.5	Índices propuestos para el estudio de severidad de licuación	145
4.2.6	Curvas actualizadas de CRR.....	147
4.2.7	Flujo de eventos.....	148
5.	Perspectivas de mejora	149

5.1	Artículo 1.- Suelos susceptibles a licuación.....	149
5.2	Artículo 2.- Ampliación de programa de exploración por posibilidad de licuación.....	150
5.3	Artículo 3.- Exploración de campo	151
5.4	Artículo 4.- Requisito mínimo para el uso de métodos geofísicos.....	152
5.5	Artículo 5.- Análisis de licuación en suelos.....	152
5.6	Artículo 6.- Probabilidad de licuación límite por método de investigación	153
5.7	Artículo 7.- Cálculo de campo	153
5.8	Artículo 8.- Correcciones en ensayo in-situ SPT	153
5.9	Artículo 9.- Ensayo in-situ CPT.....	154
5.10	Artículo 10.- Consideraciones sobre el factor de reducción r_d y otras correcciones de la evaluación de licuación	154
5.11	Artículo 11.- Profundidad de nivel freático	154
5.12	Artículo 12.- Enfoques de evaluación.....	155
5.13	Artículo 14.- Índice de severidad de licuación.....	156
5.14	Artículo 15.- Cimentaciones en suelos licuables	156
5.15	Artículo 16.- Asentamientos inducidos por efecto de licuación	157
5.16	Artículo 17.- Desplazamientos laterales inducidos por licuación.....	157
5.17	Artículo 18.- Consideraciones estructurales adicionales.....	158
5.18	Artículo 19.- Mejoramiento de suelos para reducir el potencial de licuación.....	158
5.19	Artículo 20.- Casos especiales de licuación: suelos finos.....	159
5.20	Artículo 21.- Casos especiales de licuación: estructuras particulares anómalas.....	159
6.	Recomendaciones	160
7.	Conclusiones.....	165
8.	Bibliografía.....	173
9.	Anexos	189
9.1	ANEXO 1- USO DEL SOFTWARE R-CRISIS.....	189
9.2	ANEXO 2 – FÓRMULAS Y PROCEDIMIENTOS RECOMENDADAS EN LA E.050 194	
9.3	ANEXO 3 – FLUJO LÓGICO DE PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EVALUACIÓN DE LICUACIÓN EN UN SITIO	200

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Literatura directamente referenciada por la Norma Técnica E.050. Fuente propia.	4
Figura 2. Variación en la deposición granular antes, durante y post licuación (Ishihara, 1985).....	7
Figura 3. Variación en la deposición granular antes, durante y tras licuar.....	8
Figura 4. Licuación en Niigata (1964) y Wellington (2016).	9
Figura 5. Asentamientos inducidos por efecto de licuación para distintas densidades relativas.....	11
Figura 6. Mapa de tectónica de placas	12
Figura 8. Zonas sísmicas del Perú (NTE E.030).....	15
Figura 9. Mapa de ocurrencia histórica de licuación de suelos en el Perú	19
Figura 10. Zonificación sísmico-geotécnica de Lima	22
Figura 11. Relación entre distancia del epicentro a lugar más lejano en donde se ha registrado licuación y magnitud de ondas superficiales	28
Figura 12. Daño inducido por licuación tras el terremoto de Niigata en complejo residencial de Kawagishi-cho (1964).....	35
Figura 13. Factor de reducción r_d (Seed e Idriss, 1971)	36
Figura 14. Condiciones de esfuerzo que causan licuación (Seed e Idriss, 1971).....	39
Figura 15. Comparación de gráfico empírico para predecir licuación e información obtenida en campo del terremoto de Haicheng y Tangshan (Seed e Idriss, 1982)	43
Figura 16. Relación representativa entre τ / τ_1 y número de ciclos requerido para causar licuación (Seed e Idriss, 1982).....	44
Figura 17. Curvas de evaluación de licuación para arenas para sismos de diferentes magnitudes (Seed e Idriss, 1982)	45
Figura 18. Correlación entre comportamiento de licuación de arenas en campo y resistencia de penetración CPT, magnitud 7.5 (Seed e Idriss, 1982).....	46
Figura 19. Correlación entre el CRR y $(N_1)_{60}$. Originalmente de Seed et al. (1985) Actualmente usada en la NTE E.050.	49
Figura 20. Integración de F_L . (Iwasaki et al., 1984)	53
Figura 21. Curvas para estimar la deformación volumétrica de reconsolidación post-licuación para arenas limpias (Zhang et al., 2002)	56
Figura 22. Relación entre ε_v y resistencia de punta normalizada para arenas limpias de CPT (Zhang et al., 2002).....	56
Figura 23. Errores de predicción por I_L (Iwasaki et al., 1984).....	58
Figura 24. Comparación de función de peso $W(z)$ entre LPI de Iwasaki y LPI-ISH.....	59
Figura 25. Modelo de manifestación superficial, una sola curva (Ishihara, 1985)	60
Figura 26. Modelo de manifestación superficial, tres curvas (Ishihara, 1985)	61
Figura 27. Definiciones alternativas de H_2 (Rateria y Maurer, 2022).....	62

Figura 28. Ajuste bilineal propuesto por Rateria y Maurer (2022) para el modelo de Ishihara (1985).....	63
Figura 29. Resultados de precisión promedio para modelos H ₁ -H ₂ , para uno y múltiples estratos licuables. Adaptado de Rateria y Maurer (2022).....	64
Figura 30. Resultados de precisión promedio de mediciones para modelos H ₁ -H ₂ generales. Adaptado de Rateria y Maurer (2022).....	64
Figura 31. Carta de plasticidad (Casagrande, 1932).....	65
Figura 32. Registros de Wang (1979).....	67
Figura 33. Transición de comportamiento “tipo arena” a “tipo arcilla”, a mayor IP (Boulanger e Idriss, 2004).....	68
Figura 34. Comparación de varias curvas de resistencia a licuación V _{s1} -CRR.....	75
Figura 35. Evaluación de potencial de licuación en Seward y Valdez, Alaska; en base a medición de ondas de corte V _s , con tres correlaciones distintas (Roy et al., 2022).....	81
Figura 36. Comparación entre curvas probabilísticas: Cao et al. (2011) y Rollins et al. (2022).....	82
Figura 37. Curva probabilística de resistencia a licuación para gravas a partir de medición de ondas de corte V _s (Rollins et al., 2022).....	83
Figura 38. Mecanismos de movimientos inducidos por licuación en estructuras.	84
Figura 39. Registros acelerográficos de sismos de Niigata y Nihonkai-Chubu.....	89
Figura 40. Representación gráfica de CAV ₅ (Kramer y Mayfield, 2007).....	91
Figura 41. Resultados de análisis performance-based en perfil de suelo de Seattle, basado en CAV ₅ . (Kramer y Mayfield, 2007).....	92
Figura 42. Simulación computacional de ensayo triaxial no drenado y simulación de flujo de licuación en campo bajo un puente.....	99
Figura 43. Variación de (N ₁) ₆₀ por contenido de finos para aplicación “en partes” (Cetin et al., 2018b).	108
Figura 44. Procedimiento recomendado por Kavazanjian et al. (2022) para evaluación de licuación tomando en cuenta la contribución de todas las magnitudes posibles para una a _{max} resultante de un estudio probabilístico.....	128
Figura 45. Resumen de método <i>performance-based</i>	129
Figura 46. Procedimiento de evaluación de riesgo de licuación <i>performance-based</i> . Adaptado de Kramer y Mayfield (2007).....	131
Figura 47. Curvas obtenidas por método <i>performance-based</i>	132
Figura 48. Aceleraciones máximas generadas por sismo de M _w =8.8 en zona de máximo acoplamiento sísmico de costa (Pulido et al., 2012).....	134
Figura 49. Procedimiento de “ opción 2.5”.....	136
Figura 50. Factor de reducción r _d planteado por Seed e Idriss (1971) y r _d de Iwasaki et al. (1978).....	140
Figura 51. Factor r _d según estimaciones de Cetin (2000) y Idriss (1999).	143
Figura 52. Precisión promedio hallada para índices de potencial de licuación, resultados totales (Rateria y Maurer, 2022).....	146

Figura 53. Precisión para los tres índices, para perfiles con uno o menos estratos licuables y para perfiles con varios estratos licuables intercalados (Rateria y Maurer, 2022)	146
Figura 54. Propuesta para señalización de actualizaciones en Normas. Extraído de ASCE (2022).....	163



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Zonas de Lima geotécnicamente notables	21
Tabla 2.	Relación entre N_c y magnitud de un sismo (Seed e Idriss, 1971).....	39
Tabla 3.	Relación entre N_c y magnitud de un sismo (Seed et al., 1975)	42
Tabla 4.	Relación del CRR para una magnitud M con CRR para magnitud de 7.5, actualmente conocido como MSF (<i>Magnitude Scale Factor</i>)	43
Tabla 5.	Comparación de ensayos de campo para caracterización de resistencia a la licuación.....	48
Tabla 6.	Clasificación de Índice de Potencial de Licuación (Iwasaki et al., 1978).....	53
Tabla 7.	Clasificación de Índice de Potencial de Licuación (Sonmez, 2003)	53
Tabla 8.	Clasificación de severidad de licuación L_s (Sonmez y Gokceoglu, 2005)	55
Tabla 9.	Resumen de la actualización del modelo H_1 - H_2 de Ishihara (Rateria y Maurer, 2022).....	62
Tabla 10.	Valores de k_N según N y σ'_{v0} (Zhou y Chen, 2007).....	73
Tabla 11.	Comparación de capacidad de enfoques de evaluación de licuación.	94
Tabla 12.	FS_L mínimo por tipo de edificación (Tabla 13A E.050).....	102
Tabla 13.	Severidad de licuación (Tabla 13 E.050).....	103
Tabla 14.	Clasificación de perfiles de suelo (Norma E.030)	113
Tabla 15.	Propuesta de métodos de exploración geofísicos con su normativa.....	116
Tabla 16.	Alcances de los ensayos geofísicos.....	117
Tabla 17.	Asociación entre potencial de licuación y factor de seguridad.....	118
Tabla 18.	Tabla resumen de correlaciones de CRR por ensayos geofísicos.....	121
Tabla 19.	Resumen de parámetros probabilísticos considerados como estándar en edificaciones comunes.	139
Tabla 20.	Resumen de factores incorporados en cada índice de licuación.	147
Tabla 21.	Curvas CRR presentes en la NTE E.050 y aquellas propuestas por esta tesis.	147
Tabla 22.	Clasificación de susceptibilidad de sitio, propuesta	150
Tabla 23.	Ensayos a realizar en investigación directa en programa de exploración en suelo susceptible a licuación	151
Tabla 24.	Parámetros sísmicos probabilísticos para evaluación de licuación, propuesta	156
Tabla 25.	Tabla de correlaciones CRR, propuesta.....	156
Tabla 26.	Límites de asentamientos diferenciales post-licuación, propuesta	157

Nomenclatura

<i>SPT</i>	<i>Standard Penetration Test</i>	<i>CSR</i>	Relación que expresa el esfuerzo promedio inducido por el sismo sobre una columna de suelo
<i>N</i>	Número de golpes para que la barra SPT penetre 30 cm (1 ft), tras ya haber atravesado 15 cm	<i>CRR</i>	Relación que expresa el esfuerzo inducido necesario para que un suelo licúe a determinada profundidad
<i>N_I</i>	Valor de N corregido por presión de tapada (<i>C_N</i>)	<i>z, d o h</i>	Profundidad (m)
<i>(N_I)₆₀</i>	N corregido por presión de tapada y correcciones de campo	γ	Peso específico de un suelo (kg/cm ³ o kN/m ³)
<i>(N_I)_{60CS}</i>	<i>(N_I)₆₀</i> corregido por contenido de finos, permite ser usado en curvas para arenas limpias en determinadas curvas	<i>r_d</i>	Factor de reducción del cortante inducido para elementos no rígidos (Seed e Idriss, 1971) o factor de participación de corte no lineal (Cetin et al., 2000)
<i>V_S</i>	Velocidad de propagación de ondas de corte (m/s)	<i>a_{max}</i>	Aceleración máxima en el suelo registrada para un evento sísmico.
<i>V_{SI}</i>	<i>V_S</i> corregido o normalizado por presión de referencia <i>P_a</i>	<i>g</i>	Aceleración de la gravedad
<i>V*_{SI2m}</i>	Velocidad de corte promedio en los primeros 12 metros	σ'_{v0}	Esfuerzo efectivo vertical del suelo a determinada profundidad
<i>P_a</i>	Presión de referencia para la corrección (100 kPa)	<i>M_w</i>	Magnitud momento de un sismo
<i>H₁</i>	Capa superior, no licúa	<i>MSF</i>	<i>Magnitude Scaling Factor</i> o factor de escala de magnitud
<i>H₂</i>	Capa licuable inferior	<i>N_c</i>	Número de ciclos de carga cíclica significativos
<i>s_u</i>	Resistencia al corte no drenado	<i>P_L</i>	Probabilidad de licuación
μ	Factor de corrección para ensayo de veleta (Bjerrum, 1973)	<i>FS o FS_L</i>	Factor de seguridad frente a la ocurrencia de licuación
<i>w</i>	Humedad natural de un suelo	<i>LPI o I_L</i>	Liquefaction Potential Index (Iwasaki et al., 1978)
<i>IP</i>	Índice de plasticidad del suelo	<i>LPI-ISH</i>	Ishihara Inspired Index (Maurer, Green, & Taylor, 2015)
<i>LL</i>	Límite líquido del suelo	<i>LSN</i>	Liquefaction Severity Number (Tonkin & Taylor, 2013)
<i>P_{#200}</i>	Fracción del suelo que atraviesa la malla #200 por tamizado (arcillas y limos)	<i>LSI</i>	Liquefaction Severity Index (Sonmez y Gokceoglu, 2005)
<i>FC</i>		<i>LSN-ISH</i>	Ishihara- LSN
<i>S_r</i>	Resistencia al corte residual (estado USS o QSS)	<i>D_r</i>	Densidad relativa de un suelo (%)
<i>CPT</i>	<i>Cone Penetration Test</i>	<i>PR</i>	Profesional responsable
<i>q_c</i>	Resistencia de punta de CPT, corregida por inequidad de área (también referida como <i>q_t</i>)	<i>S_t</i>	Sensitividad de una arcilla
<i>q_{cI}</i>	Resistencia de punta normalizada de CPT	<i>D_x</i>	Abertura de malla granulométrica a través de la cual va a pasar el x% del suelo ensayado. En esta tesis se menciona <i>D₅₀</i> .
<i>q_{cINCS}</i>	Resistencia de punta normalizada de CPT, corregida por contenido de finos para su uso en curva de arenas limpias	<i>w_c</i>	Humedad natural de un suelo (proporción del peso del agua sobre peso del sólido)
<i>I_C</i>	Índice de tipo de comportamiento de suelo del CPT		
<i>T_R</i>	Tiempo de retorno. Referido a un sismo, licuación u otro fenómeno probabilístico.		

1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Dada la elevada actividad sísmica en el territorio peruano y la presencia de suelos granulares sueltos y saturados, la licuación del suelo representa un riesgo significativo en el país. Este fenómeno, inducido por la acción sísmica, se caracteriza por un incremento abrupto de la presión de poros en la matriz del suelo, lo que resulta en una pérdida de resistencia y un comportamiento similar al de un líquido pesado o viscoso. Sus consecuencias incluyen graves daños a la infraestructura y estructuras suprayacentes, pérdidas materiales y riesgos para la vida humana.

Desde su promulgación, la Norma Técnica E.050 *Suelos y Cimentaciones* (NTE E.050) ha establecido los requisitos mínimos relacionados con la mecánica de suelos, con un enfoque principal en edificaciones. Debido a las posibles consecuencias del fenómeno de la licuación, resulta esencial contar con lineamientos actualizados que prioricen la seguridad, ofrezcan una amplia aplicabilidad y sean prácticos para evaluar su potencial, mitigar su ocurrencia y minimizar sus consecuencias.

En la actualidad, los lineamientos de la NTE E.050 sobre licuación se encuentran desactualizados, lo que resalta la necesidad de investigar exhaustivamente las investigaciones y artículos científicos más recientes. Esto permitirá desarrollar recomendaciones alineadas con el estado actual de la investigación geotécnica y fortalecer la capacidad de evaluar y gestionar este fenómeno de manera efectiva.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Proponer artículos actualizados para el capítulo de la licuación en la NTE E.050, a partir de una revisión literaria de artículos científicos recientes sobre la licuación y su comparación

con normativas internacionales, con un enfoque holístico del fenómeno y conforme al estado del arte actual.

1.2.2 Objetivos específicos

- Presentar un resumen del estado del arte sobre el fenómeno de licuación, el cual brinde información sobre sus antecedentes e incluya los distintos enfoques existentes para la estimación de riesgos, mediante el contraste de información e interpretación de investigaciones.
- Ampliar el alcance de los métodos geofísicos y CPT (*Cone Penetration Test*) en la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*.
- Afinar la proposición existente de evaluación probabilística de acuerdo a las recomendaciones existentes en la bibliografía, en lo que se incluye:
 - I. Exigir la realización de evaluaciones de potencial de licuación que consideren la contribución de todos los intervalos posibles de magnitudes sísmicas, e incluso la contribución en el riesgo de licuación de los distintos períodos de retorno.
 - II. Exigir requisitos mínimos para la evaluación de potencial de licuación probabilística o determinística, acordes a la importancia de la edificación a construir, utilizando la clasificación de la Norma E.030 *Diseño sismorresistente*: A (seguridad crítica), B (esencial) y C (común), con el propósito de tener un estándar conciso, entendible y riguroso en cuanto a probabilidad de excedencia, tiempos de retorno y probabilidad de licuación o factor de seguridad.
- Facilitar la aplicación de análisis de licuación probabilísticos, usando el software R-CRISIS, para lo cual se ofrece una configuración predeterminada a usar como recurso digital. La información incluida en esta se especifica en el ANEXO 1.

- Proponer correlaciones de resistencia a la licuación CRR actualizadas, basadas en el estado del arte actual.
- Proponer mejoras en la evaluación a la susceptibilidad de licuación.
- Reconocer y recopilar las principales fuentes de error existentes en los procedimientos de evaluación de licuación (y previos), con el fin de dar recomendaciones que afiancen la práctica ingenieril correcta.

1.3 Metodología, alcances y limitaciones de la investigación

Este estudio presenta una metodología de investigación cualitativa, que se centra en la recolección, análisis y contraste de datos con el fin de refinar la comprensión sobre el fenómeno de licuación, los métodos de caracterización de una exploración geotécnica y las correlaciones desarrolladas a través de los años, lo que a su vez genera nuevas preguntas durante el proceso. A continuación, se presenta la selección bibliográfica sobre la cual la NTE E.050 se basa, ordenada cronológicamente:

Ruta principal NTE E.050: artículos principales

- *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential* (Seed e Idriss, 1971)
- *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes* (Seed e Idriss, 1982)
- *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils* (Youd et al., 1997)
- *Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework* (Seed et al, 2003)

Debido a la considerable cantidad de contenido evaluado y la necesidad de organizarlo cronológicamente y de acuerdo a la vertiente que rige su desarrollo en el tiempo, dicho recorrido se puede representar de forma esquemática, como se presentan en la Figura 1, ubicada debajo de este párrafo. Cabe indicar que este esquema presenta un resumen bastante abreviado de los estudios que mejor sintetizan el progreso de la evaluación de la licuación

correspondiente a la metodología actual de la NTE E.050, y que entre estos hay un gran número de estudios intermedios que se mencionarán para sustentar el hallazgo o mejoramiento de propuestas metodológicas existentes.

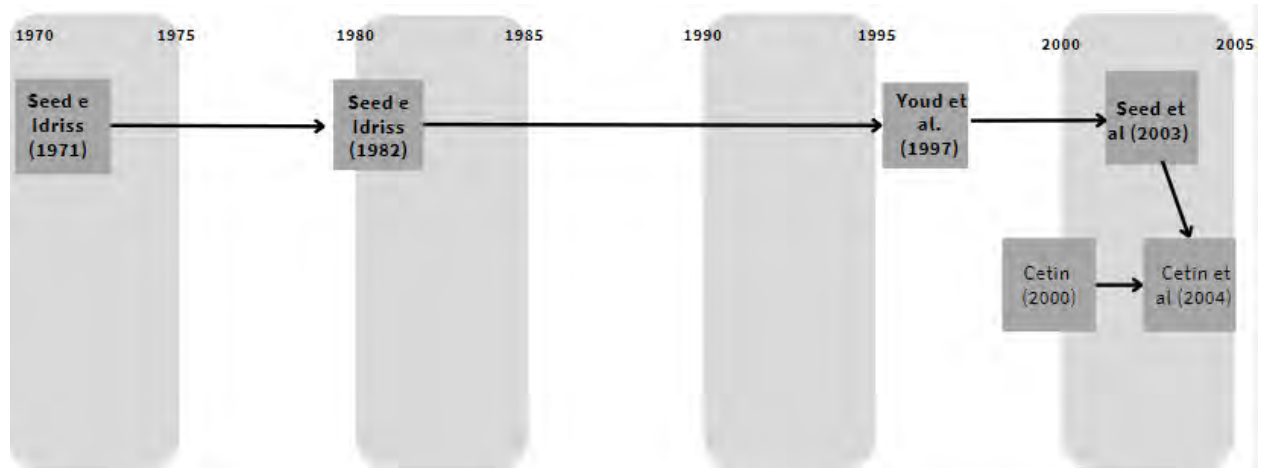


Figura 1. Literatura directamente referenciada por la Norma Técnica E.050. Fuente propia.

Dadas las cualidades de la metodología abarcada, es de reconocer que la profundidad del análisis puede verse limitada ante la ausencia de análisis cuantitativos. Por otro lado, la narrativa construida a través de esta tesis es susceptible al sesgo del investigador. Se evaluará cada propuesta establecida con rigor y basado en el juicio de la evidencia empírica, usualmente sustentada por las investigaciones evaluadas, y marco teórico conocidos.

El alcance de lo propuesto se limitará en cuanto sea posible al artículo 38 de la NTE E.050 (Licuación de suelos). Sin embargo, en algunos apartados las propuestas involucran ámbitos más generales de la norma misma (por ejemplo, respecto a la inclusión y normativa de ensayos geofísicos).

1.4 Justificación

Este estudio se justifica por la necesidad de tomar medidas preventivas para mitigar el riesgo del fenómeno de licuación inducido por sismos y sus efectos, los cuales generan daños considerables en las estructuras sobre el suelo afectado. En un país con zonas de alta sismicidad y con suelos caracterizados como potencialmente licuables, el riesgo de la licuación y sus

devastadores efectos es considerable. La NTE E.050 *Suelos y cimentaciones* (2018) incluye en sus planteamientos metodologías que comprenden hasta lo estudiado hacia la mitad de los 2000. A partir de aquel entonces, el campo de la geotecnia (y más específicamente, la evaluación de la licuación) ha progresado considerablemente. Es necesario actualizar la NTE E.050 mediante la revisión del estado del arte y el contraste de información desarrollada para preservar e incluso mejorarla en torno a su seguridad, aplicabilidad, practicidad, exactitud y evitar lineamientos ambiguos.



2. Marco teórico

2.1 Licuación de suelos

La licuación de suelos es un fenómeno que ocurre cuando un suelo saturado, es decir, cuyos vacíos están llenos de agua, ve su presión intersticial elevada hasta el grado de que esta nulifica su propio esfuerzo efectivo; lo que ocurre cuando este es sometido a esfuerzos causados por la difusión vertical de ondas de corte sísmicas. En consecuencia, el suelo adquiere un comportamiento similar al de un fluido pesado o altamente viscoso, comportamiento mediante el cual ocurre una reducción drástica de su capacidad portante, a partir de lo cual ocurren asentamientos descontrolados, desplazamientos laterales y otros efectos dañinos. En la Figura 2, se ilustra la variación en el arreglo de las partículas de suelo antes, durante y después de la licuación (Ishihara, 1985). Un ejemplo de bastante utilidad es el de someter a una muestra de suelo arenoso suelto a un ensayo de laboratorio de corte cíclico torsional: se dice que ocurre licuación cuando la arena experimente deformaciones ilimitadas o muy amplias sin apenas movilizar resistencia significativa ante aquella deformación (Ishihara, 1985). Las Figuras 3 (a) y (b) muestran los resultados del ensayo previamente mencionado, con diferentes desenlaces. Se puede apreciar cómo en los últimos ciclos la arena suelta experimenta deformaciones de corte del orden de 10%, a su vez la presión de poros alcanza su cénit. En la Figura 4, se muestran fotografías que registran las consecuencias de la licuación: volteo y hundimiento de edificaciones causados por licuación generalizada, así como evidencias superficiales.

Cabe mencionar que la licuación no es un fenómeno únicamente ocasionado por terremotos. Múltiples ocurrencias de licuación estática se han dado a través de la historia, varias de las cuales se han dado en grandes estructuras hidráulicas como presas (Rodríguez-Pacheco et al., 2022; Shuttle, Marinelli, Brasile, & Jefferies, 2021). A su vez, estudios afirman la posibilidad de ocurrencia de licuación en el fondo marino por el efecto del oleaje (Di Fiore et al., 2020). Por otro lado, existe la licuación inducida por acción de explosivos (*blast-induced*), la

cual se induce intencionalmente con fines investigativos como ensayos a gran escala (Liu et al., 2017; Mahvelati et al., 2020), así como se estudia sus efectos en temas relacionados a la minería, donde los relaves pueden ser susceptibles a esta (Lu y Fall, 2018). En esta tesis, el estudio de la licuación se centrará en aquella inducida por efectos sísmicos, puesto que es la más recurrente en edificaciones, tal que corresponden al alcance de la NTE E.050.

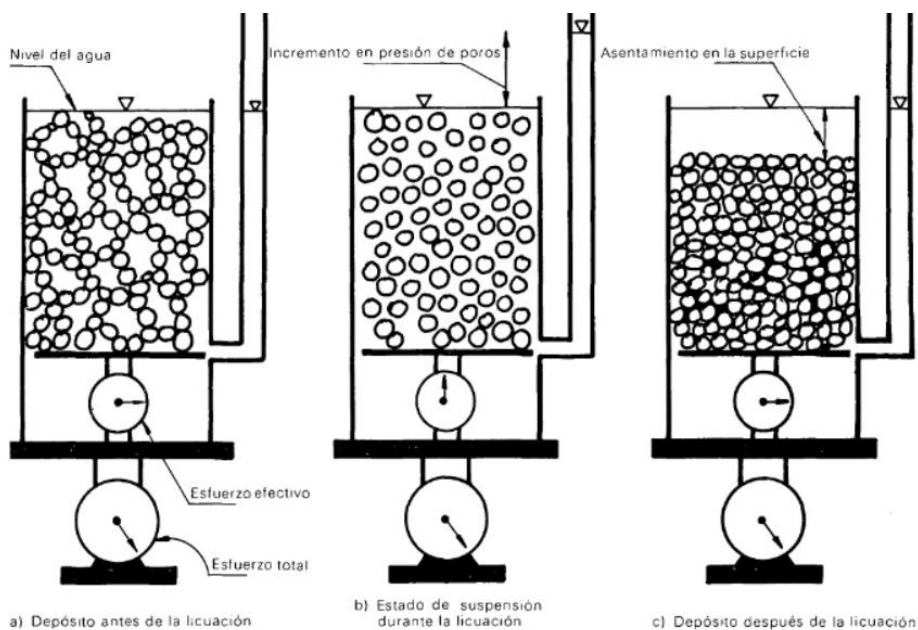
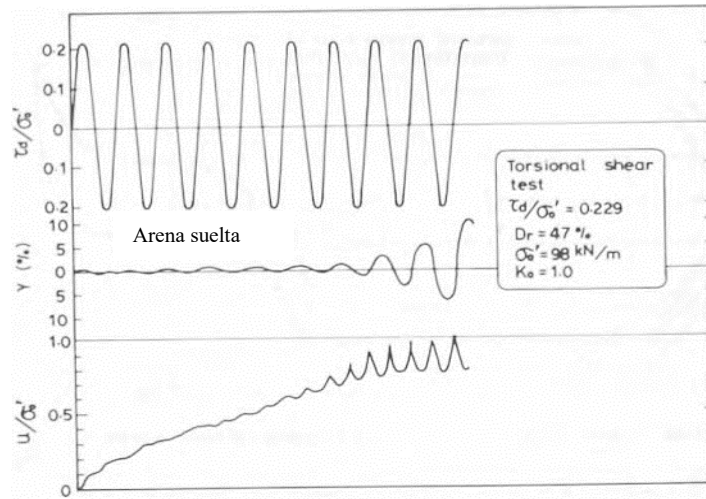
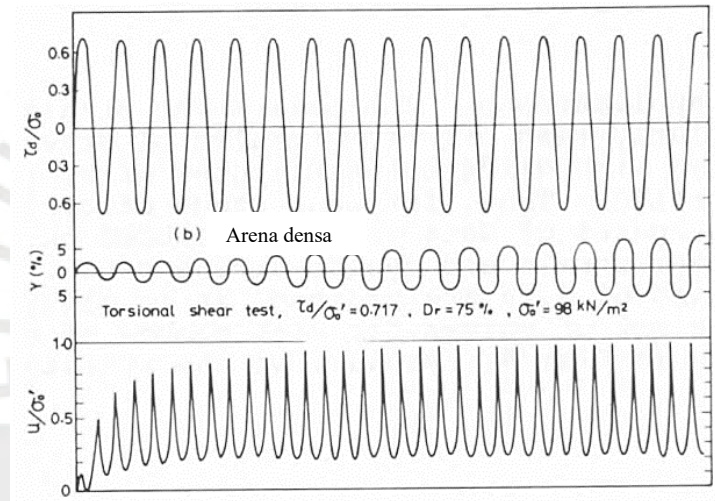


Figura 2. Variación en la deposición granular antes, durante y post licuación (Ishihara, 1985)

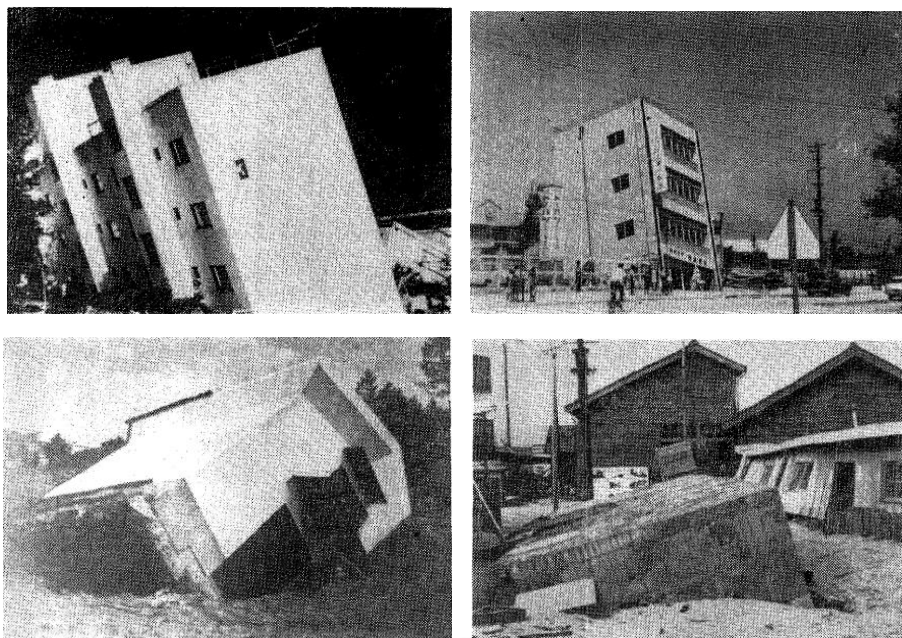


(a)



(b)

Figura 3. (a): Registro de ensayo de corte cíclico torsional en arena suelta, licúa (Ishihara, 1985)
 (b) El mismo ensayo en arena densa, no licúa (Ishihara, 1985)



(a)



(b)

Figura 4. (a) Licuación en Niigata, 1964.

Varias estructuras se inclinaron e incluso se volcaron totalmente, sin haber presentado daño estructural. En contraste, otras estructuras más livianas (abajo, derecha), previamente enterradas, flotaron hacia la superficie luego del terremoto. Esto añadido a múltiples evidencias superficiales de licuación y al sondeo de las propiedades del suelo clasificadas por el daño ocurrido nos permite concluir que tal fue el desencadenante del daño en la zona. (Ohsaki, 1966)

(b) Licuación en Wellington, Nueva Zelanda, 2016.

Asentamiento vertical de 530 mm (izquierda superior) y 600 mm (derecha superior) relativo entre superficie pavimentada y superficie de estructura con cimentación de pilotes. Inferiores: eyección de arena de estratos inferiores, acumulando un espesor de 170 mm. (Cubrinovski et al., 2017)

2.1.1 Características de suelos susceptibles a licuar

Las características de un suelo en el cual el fenómeno de licuación es probable han sido ampliamente discutidas y estudiadas. Una breve descripción bastante adecuada corresponde a la siguiente: “suelos no cohesivos que cuentan con permeabilidad tan baja como para no ser capaces de expulsar el agua ante determinado sismo, así como suficientemente sueltos como para presentar tendencia a la compresibilidad”. Dentro de esta descripción, las arenas finas encajan en sobremanera respecto de las medias u otros suelos granulares más gruesos (gravas), puesto a que estas últimas son menos proclives a encontrar el equilibrio para densidades relativas bajas (Terzaghi, Peck, y Mesri, 1996). Pese a esto, el fenómeno de licuación también puede ocurrir en gravas, e incluso ha sido documentado en el Perú. En este caso, la licuación depende de la matriz arenosa del suelo, dentro del conjunto grava-matriz (Martínez, 2003).

Por otro lado, otro factor importante en la susceptibilidad de licuar de un suelo es su densidad. No solo es la susceptibilidad de licuar de un suelo suelto considerablemente más alta que la de uno denso, sino que los efectos que ocurren tras la licuación encuentran una situación análoga. En suelos densos, el asentamiento es menor y no ocurren ni fallas de suelo o volcanes de arena (*sand boils*) por la baja cantidad de agua expulsada (Dobry, 1989). Afirmaciones como esta son corroboradas consistentemente a partir de estudios más recientes, basados en el comportamiento del suelo bajo una edificación al licuar, como el mostrado en la Figura 5. En este, se realiza una simulación SSI (interacción estructura-suelo), basado en una estructura de cimentación superficial de 3 pisos de altura y 12 metros de ancho y doce registros de movimiento de suelos de sismos de foco superficial. Los resultados indican consistentemente que, a menor densidad relativa, el asentamiento esperado es mayor.

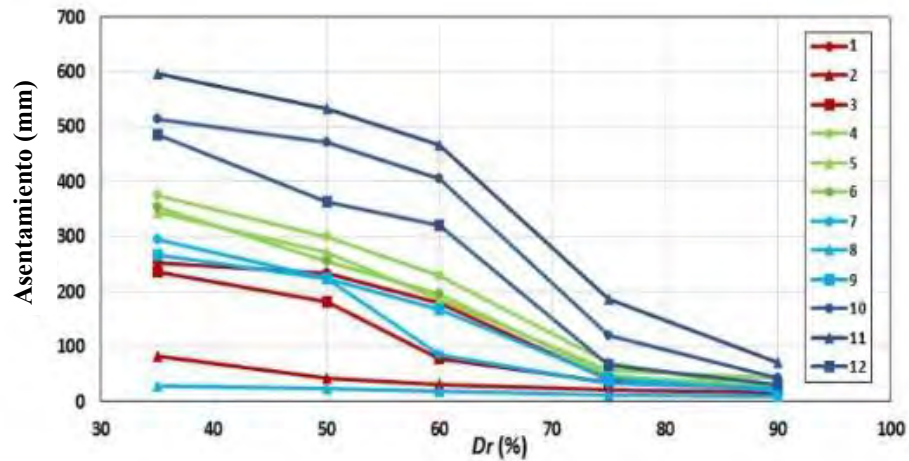


Figura 5. Asentamientos inducidos por efecto de licuación para distintas densidades relativas para 12 registros sísmicos. Adaptado de Bray y Macedo (2017)

En el caso de suelos predominantemente arcillosos, el comportamiento análogo a la licuación en arenas es denominado como degradación cíclica. Esta distinción se plantea puesto que los comportamientos de las arenas y arcillas difieren de tal forma que son más óptimamente evaluados con procedimientos ingenieriles distintos y por lo tanto denominaciones distintas. Bajo la definición de Youd et al. (2001), la licuación se define como el fenómeno bajo el cual ocurre una pérdida dramática de resistencia ocasionada por el incremento de presión intersticial y baja presión de confinamiento inicial, es apto el uso de este concepto para suelos con contenido de finos. Debido a su tendencia a dilatarse, esto puede a menudo resultar en eventos de pérdida de resistencia con una condición de movilidad cíclica con deformaciones limitadas (a diferencia de las grandes deformaciones a las que tienden los suelos granulares ante la licuación) (Bray y Sancio, 2006). A pesar de esto, es posible considerar el estudio de este fenómeno en suelos arcillosos en este estudio debido a que su ocurrencia ha sido también documentada, habiendo ocasionado a su vez daños y asentamientos. Ejemplos de licuación en suelos arcillosos ($P_{\#200} > 15$) que han causado daños considerables en construcciones han sido documentados, como lo son los terremotos de Northridge (1994), Kocaeli (1999) y Chi-Chi (1999) (Bray y Sancio, 2006). De manera

análoga con la licuación en suelos granulares, la degradación cíclica en arcillas es más probable por lo general en aquellas de normalmente consolidadas a ligeramente sobre consolidadas, con valores más altos de Índice Líquido (IL), sensibilidades más altas y humedades naturales más altas (Boulanger e Idriss, 2004).

Finalmente, cabe mencionar que para que un suelo sea propenso a licuar, independientemente de las características referidas previamente, es indispensable que se encuentre sumergido bajo el nivel del agua, de tal forma que se posibilite el incremento de presión intersticial bajo el que la licuación sucede.

2.1.2 Sismología del Perú

El Perú se encuentra dentro del cinturón de fuego, conformado por zonas de subducción en los límites del océano Pacífico. Sus costas constituyen el límite entre la placa de Nazca y la placa sudamericana, cuya subducción de la primera bajo la segunda ocasiona el que sea una las zonas más sísmicamente activas del planeta. En la Figura 6 se presenta un mapa con las principales placas tectónicas y los límites entre ellas. Se aprecia la continuidad en los límites de convergencia de aquellas zonas adyacentes al océano Pacífico, en el mencionado cinturón de fuego.

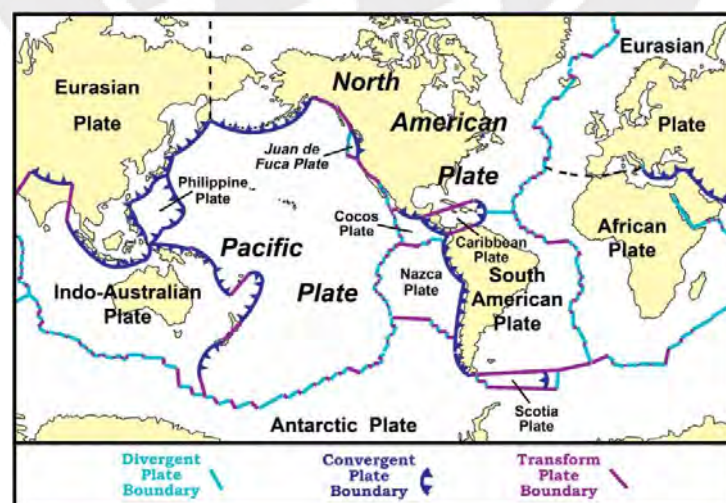
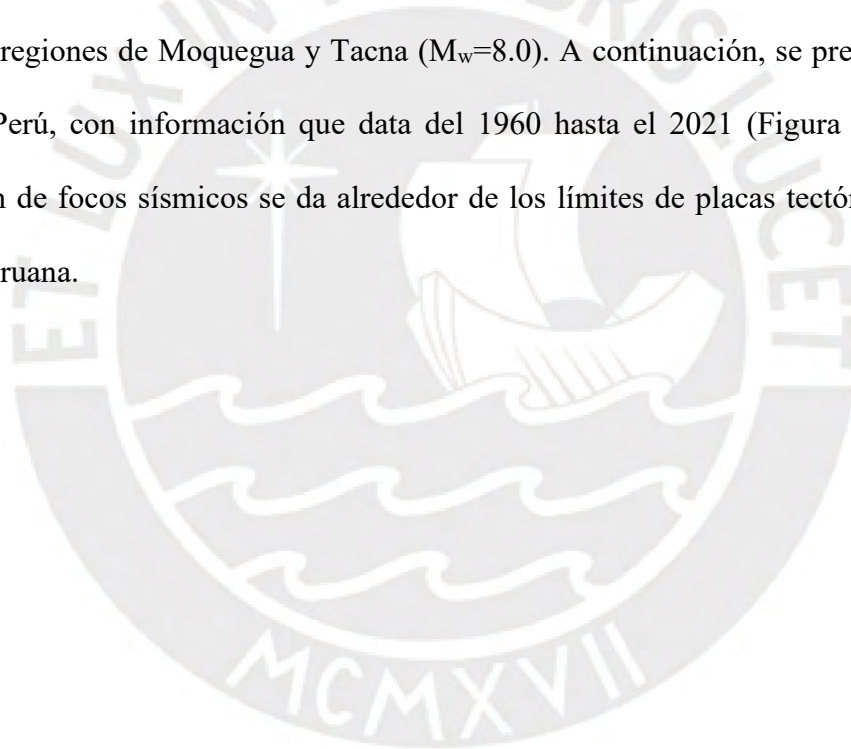


Figura 6. Mapa de tectónica de placas (Lillie, 2015)

Es de interés añadir que Lima atraviesa un largo silencio sísmico, cuyo último terremoto de gran magnitud data de 1746. Aquel terremoto llevó consigo una cantidad de fallecidos, equivalente al 8% de la población de Lima de aquel entonces, cuya intensidad máxima se estima de hasta XI (Mercalli modificada). Mediante las mediciones de acoplamiento sísmico a través de la deformación acumulada, se estima que el sismo que eventualmente rompería el silencio sísmico podría tener una magnitud momento de 8.8 grados, similar a la del terremoto de Chile en 2010. Así mismo, el IGP presenta mapas de acoplamiento sísmico, los cuales identifican tres áreas principales de acoplamiento: frente a la costa de la región Lima ($M_w=8.8$), al sur de la ciudad de Nasca ($M_w=8.0$), y frente a las costas de las regiones de Moquegua y Tacna ($M_w=8.0$). A continuación, se presenta el mapa sísmico del Perú, con información que data del 1960 hasta el 2021 (Figura 7). La mayor concentración de focos sísmicos se da alrededor de los límites de placas tectónicas, esto es, en la costa peruana.



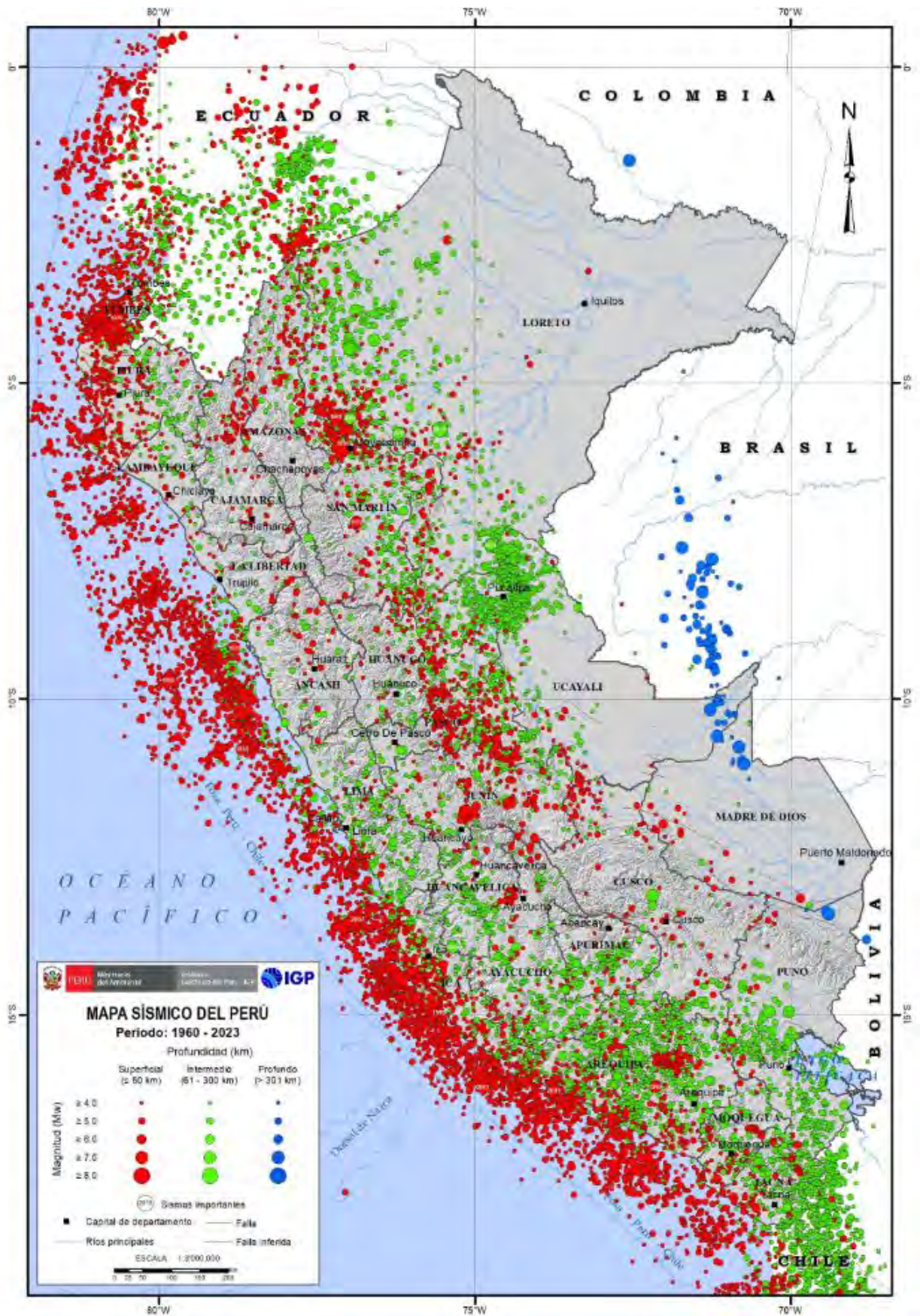


Figura 7. Mapa sísmico del Perú 1960-2023 (Instituto Geofísico del Perú, 2023)

Con propósitos de diseño, la Norma Técnica E.030 presenta un mapa de zonas sísmicas basado en las posibles aceleraciones máximas que pueda suscitar un sismo (aceleraciones máximas con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años). Este mapa es resultado de una simplificación de un estudio probabilístico, basado en la caracterización del territorio peruano por fuentes sísmicas (leyes de Gutenberg y Richter) en conjunto con leyes de atenuación empíricas (también conocidas como modelos de movimiento de terreno, los cuales relacionan distancia respecto de un foco y magnitud en un hipocentro con la aceleración máxima en la superficie), y es útil para ilustrar de forma breve y práctica la distribución de posibles aceleraciones máximas ante eventos sísmicos en el Perú y para propósitos de diseño.



Figura 8. Zonas sísmicas del Perú, con las aceleraciones máximas con 10% de excedencia en 50 años, unidad en g (aceleración de la gravedad) (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018)

2.1.3 Licuación, caracterización geotécnica y geología del Perú

Dada la importancia de las características de un suelo en su susceptibilidad a la licuación, es de particular interés conocer a rasgos generales las características de tales en el Perú. Una de las fuentes de información que nos pueden dar una idea general de la naturaleza mecánica de un suelo consiste en la clasificación y edad del depósito geológico estudiado, disponible en mapas geológicos. Puesto que realizar una descripción geológica del Perú completo resulta demasiado ambicioso en su alcance, este acápite se limita a listar algunos casos puntuales: aquellos que cuentan con las breves características descritas previamente como de suelos susceptibles a licuación, y localizados en zonas de alto riesgo sísmico. Asimismo, se brinda información de caracterizaciones geotécnicas que sustentan las características geológicas previamente mencionadas.

Los registros más tempranos de licuación en el Perú se remontan hasta la época colonial. El primer caso registrado es el ocurrido durante el terremoto de Arequipa en 1582. Este causó una inundación alrededor de las calles de toda la ciudad, debido posiblemente al asentamiento y compresión sobre el nivel freático (Silgado, 1978). Como lugar más recurrente de ocurrencia de licuación se tiene el del departamento de Ica, donde las ocurrencias han sido reiteradas. De particular importancia de estudio se tienen las registradas tras el terremoto ocurrido en Pisco en 2007 ($M_w=8.0$), en el que se registraron múltiples eventos de licuación con eyección de material líquido, flujos laterales de más de 3 km de longitud y asentamientos masivos, en ocasiones de hasta casi un metro. Sobre estos puntos de interés se realizaron caracterizaciones geotécnicas póstumas. Los resultados indicaron que en aquellos puntos donde se registró licuación se encontró depósitos de arenas finas sueltas con presencia de nivel freático (a menudo a profundidades menores a un metro), en su mayoría limpias. Aquellos puntos donde no se encontró evidencia de licuación presentaron mayor contenido de gravas en su estratigrafía, aunque en ocasiones se presentan suelos con estratos

de grava superiores y estratos de arena licuable debajo de estos (Zavala, Olcese, Zegarra, & Moreno, 2012). En las zonas de Casma y Chimbote se registraron ocurrencias de deslizamientos de flujos de arena laterales causados por licuación en regiones ubicadas en la costa de Ancash, tras el terremoto de 1970 ($M_w=7.8$) (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970).

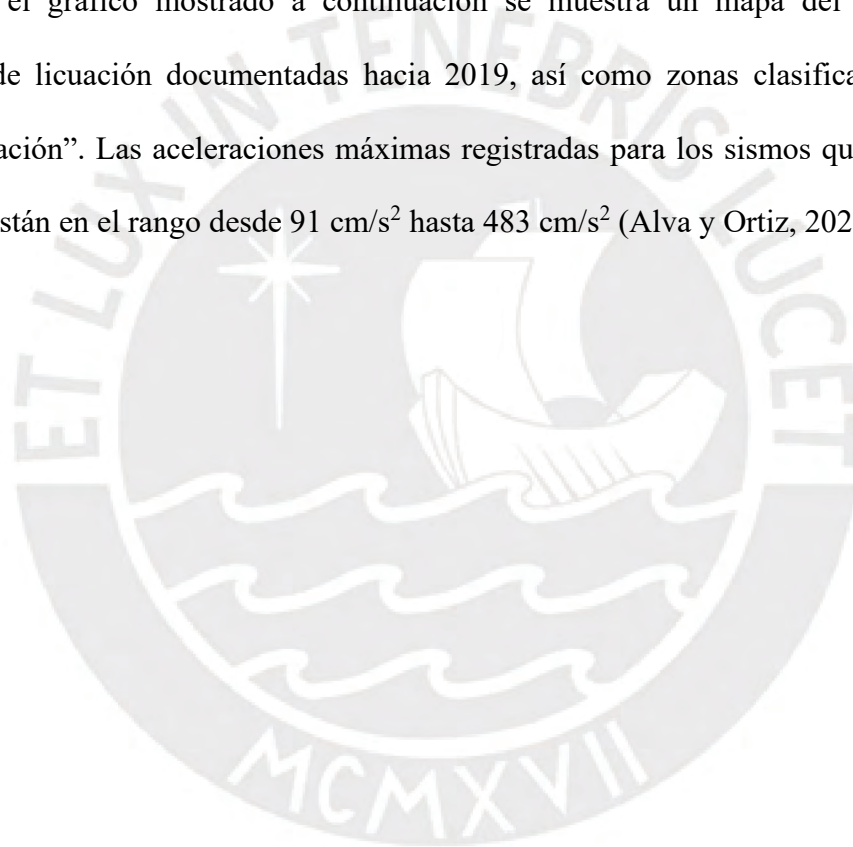
Hacia la costa sur del Perú también se han evidenciado eventos de licuación. El sismo del sur de 23 de junio de 2001 ($M_w=8.2$) causó destrucción desde Arequipa hasta las áreas de Arica e Iquique, al norte de Chile. Múltiples eventos de licuación fueron registrados, cuyos efectos incluyeron eyección de arena acuosa (*sand boiling*) de hasta 2 metros de diámetro, roturas del suelo, asentamientos, expansiones laterales, entre otros. Estos son tan solo algunos de los numerosos eventos de licuación en la costa peruana.

Una zona alejada de la costa pero que ha manifestado recurrentemente evidencias de licuación se sitúa alrededor de la región nororiental del Perú. Rocas sedimentarias de los Periodos Jurásico a Cretáceo se encuentran en las montañas cercanas y materiales del cuaternario en el valle del río Alto Mayo. Los depósitos cuaternarios están compuestos de suelos aluviales, coluviales, fluviales y residuales. Se ha reportado efectos del terreno siguientes: licuación de suelo, inestabilidad y corrosión de suelos en los taludes, asentamientos diferenciales, amplificación de suelo y deslizamientos dentro del área epicentral (Alva, Meneses, Chang, Lara y Nishimura, 1992). Más recientemente, se ha registrado licuación en el distrito de Lagunas, Loreto, tras el evento sísmico de mayo de 2019 ($M_w=8.0$). Se evidenciaron conos de arena y desplazamientos laterales (Alva y Ortiz, 2020).

Eventos más raros de licuación se han dado en la sierra peruana. Uno de los eventos más antiguos se registró en Puno, tras un terremoto en 1747. Por su lado, el departamento de Cuzco cuenta con al menos dos ocurrencias de licuación. La primera fue a partir de un terremoto ocurrido en 1650, que causó agrietamiento extenso y perturbaciones en la

escorrentía cerca del pueblo de Oropesa. En el terremoto de 1950 ($M_s=6.2$) se registró licuación en forma de eyecciones de agua a través de grietas que alcanzaron de 1 a 2 metros de altura. Asimismo, zonas anteriormente secas terminaron cubiertas de hasta 40 cm de agua (Silgado, 1978).

En conclusión, se visibiliza una notoria relación entre las zonas de mayor intensidad sísmica y aquellas con más probabilidad de licuación. Esta está marcada a primera vista por la alta ocurrencia obtenida por los registros, la cual se da mayoritariamente en la costa peruana. En el gráfico mostrado a continuación se muestra un mapa del Perú con las ocurrencias de licuación documentadas hacia 2019, así como zonas clasificadas como de “posible licuación”. Las aceleraciones máximas registradas para los sismos que ocasionaron la licuación están en el rango desde 91 cm/s^2 hasta 483 cm/s^2 (Alva y Ortiz, 2020).



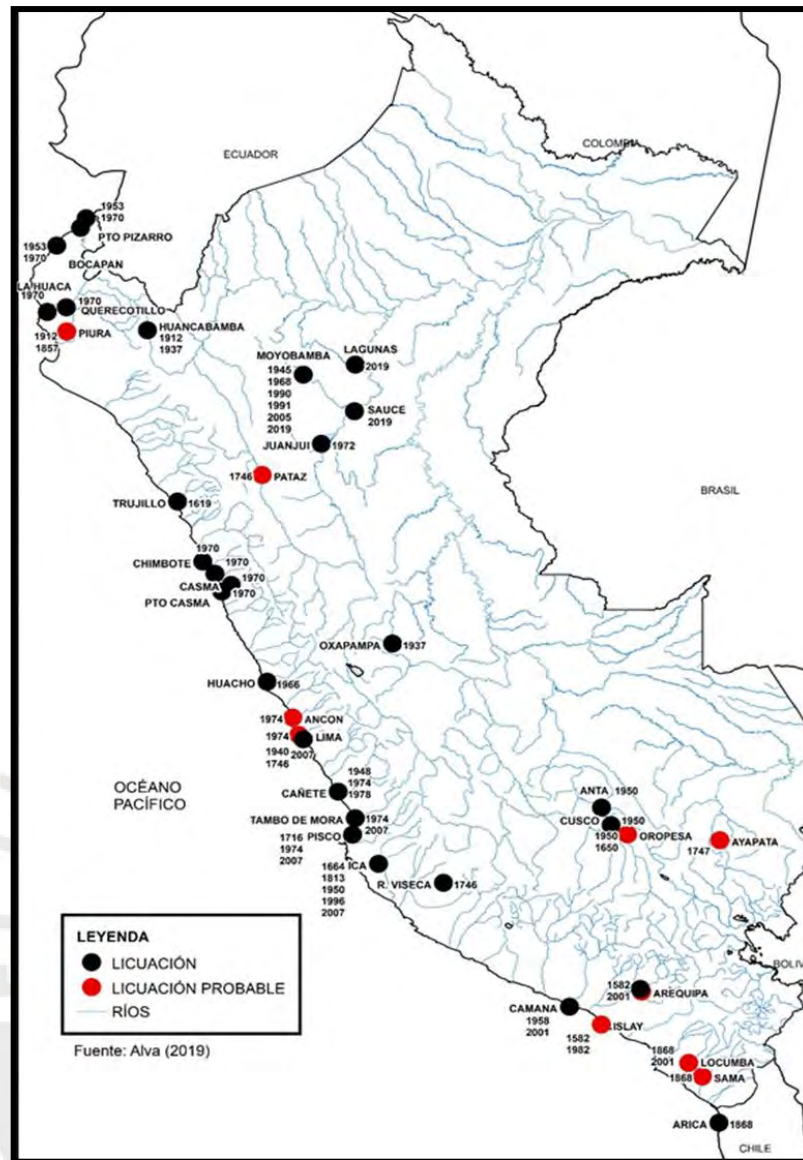


Figura 9. Mapa de ocurrencia histórica de licuación de suelos en el Perú (Alva y Ortiz, 2020)

2.1.4 Licuación, caracterización geotécnica y geología de Lima

Puesto que Lima es la ciudad más habitada del país y aquella de mayor concentración demográfica y actividad económica, que a su vez se encuentra dentro de la zona sísmica Z4, es de importancia dedicar una sección a las implicaciones del fenómeno de licuación en esta, a partir de los estudios existentes sobre las características geológicas y geotécnicas de su suelo.

La ciudad de Lima metropolitana se encuentra situada sobre la formación geológica del cono aluvial del río Rímac. En sus zonas más céntricas, abundan los suelos gravosos con poca presencia de nivel freático, el cual es a menudo indetectable hasta más de 50 metros. Por otro lado, en los bordes del cono aluvial, más específicamente en el noroeste y el suroeste (Callao, Chorrillos) existe presencia de suelos heterogéneos, con presencia de limos y en estado menos compacto, donde existe evidencia de licuación. Tras el sismo de Pisco de 2007, un tramo de 50 metros de longitud de la avenida Defensores del Morro de Chorrillos evidenció licuación, causando una falla del terraplén por desplazamiento lateral de 26 metros de longitud. Los suelos bajo esta zona están compuestos por arcillas orgánicas superficiales y arenas finas mal gradadas variando a limosas con la profundidad, con altas variaciones de densidad (Olcese y Zegarra, 2008). En las zonas más cercanas al mar, se cuenta con presencia elevada de nivel freático próximo al nivel de la superficie, tal que son aquellos distritos costeros los más susceptibles a la ocurrencia de licuación (INDECI, 2017). De acuerdo a un sondeo de ondas de corte alrededor de la Av. Colonial, se nota un cambio brusco en la proximidad del eje de la Av. Faucett, de suelos muy densos sin nivel freático (hacia el este) a suelos de densidad media y presencia de nivel freático (hacia el oeste). Es de reconocer además que la profundidad de la base rocosa de Lima no ha sido determinada hasta el momento, aunque existen estimaciones del perfil estratigráfico. Es por esto últimamente mencionado que se puede considerar que geotécnicamente existen “cinco Limas”. En cuanto a la tipología de los suelos, se propone la existencia de cinco zonas notables en Lima. (Aguilar y Alva, 2013) Estas se detallan en la Tabla 1. Asimismo, en la Figura 10 se presenta un gráfico donde se detalla la zonificación de acuerdo al tipo de suelo de la norma sismorresistente (S0, S1, S2, S3 y S4) (CISMID, 2004; IGP-SIRAD, 2010).

Tabla 1. Zonas de Lima geotécnicamente notables

Zona	Descripción
Zona 1	Zona conformada por grava aluvial y afloramientos rocosos. La constituye la mayor parte de Lima. Los períodos predominantes varían entre 0.1 y 0.3 segundos. Suelo rígido, no se esperan amplificaciones importantes en períodos intermedios y largos.
Zona 2	Zona donde se presenta en superficie un estrato de suelo arcilloso o arenolimoso de 10.0 a 20.0 m de espesor sobre la grava aluvial. Los períodos predominantes varían entre 0.3 y 0.5 segundos. Suelo medianamente rígido, se esperan amplificaciones moderadas en períodos bajos e intermedios.
Zona 3	Zona formada por depósitos de suelos finos y arenas potentes. Los depósitos eólicos se encuentran en estado suelto. Los períodos predominantes varían entre 0.5 y 0.7 segundos. Comportamiento de suelo blando, con amplificaciones importantes en períodos intermedios y largos.
Zona 4	Áreas puntuales de depósitos eólicos en Villa El Salvador y zona de canteras de Pachacamac. Los períodos predominantes varían entre 0.7 y 2.0 segundos. Comportamiento de suelo muy blando con amplificaciones importante en períodos largos.
Zona 5	Constituida por áreas puntuales conformadas por depósitos de rellenos sueltos de desmontes heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado, con potencias entre 5.0 y 15.0 m. También se incluye a los rellenos sanitarios que en el pasado se encontraban fuera del área urbana y en la actualidad han sido urbanizados. Las áreas que han sido identificadas se encuentran ubicadas en los distritos del Rímac, Surquillo, Bellavista, La Perla, San Juan de Miraflores y San Juan de Lurigancho, no descartándose la existencia de otras similares en Lima Metropolitana. El comportamiento dinámico de estos rellenos es incierto por lo que requieren un estudio específico.

Nota: Tabla tomada de Aguilar y Alva (2013)

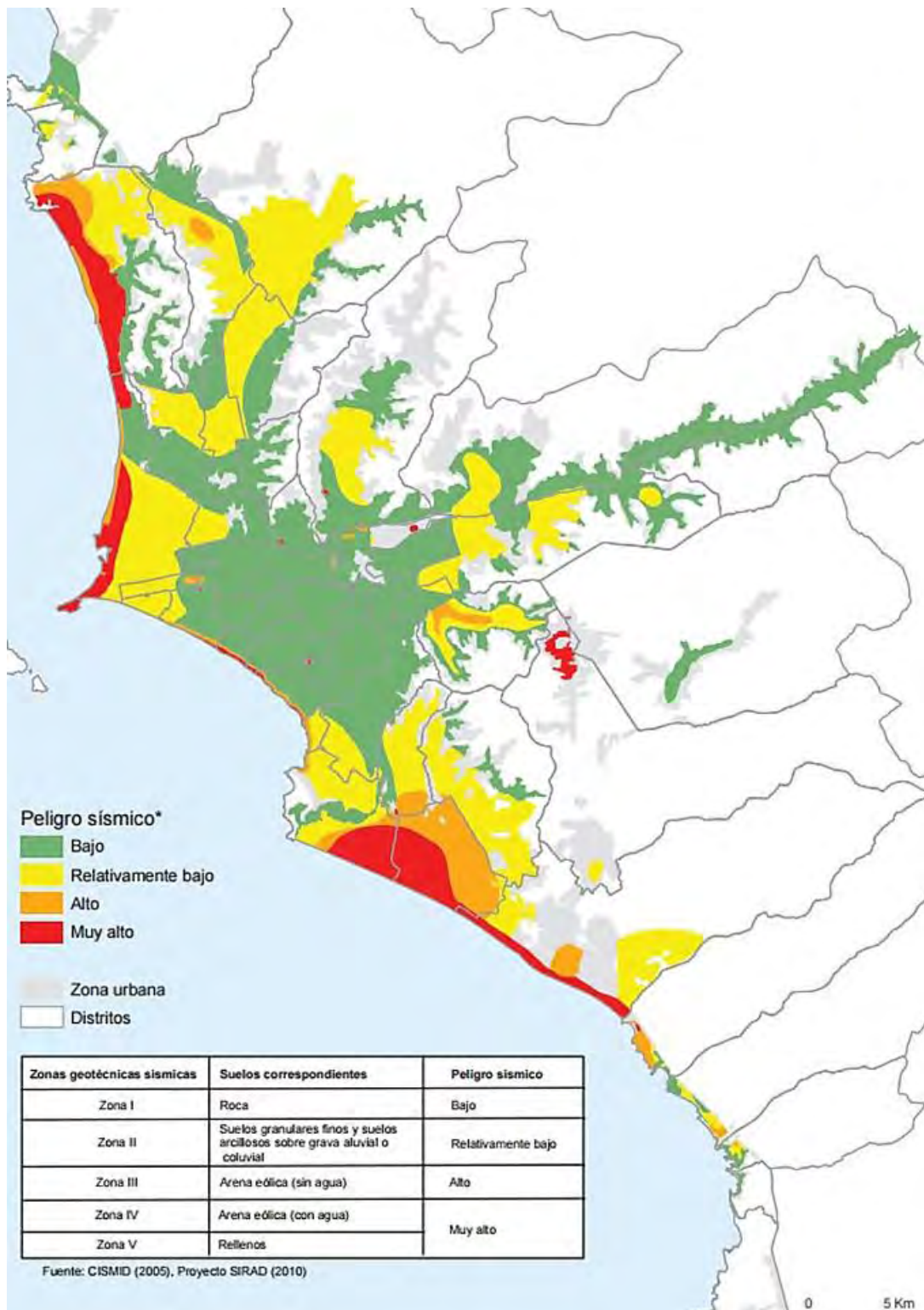


Figura 10. Zonificación sísmico-geotécnica de Lima (Institut de Recherche pour le Développement e IGP, 2010)

2.2 Antecedentes internacionales

Se presenta a continuación un resumen de los criterios de evaluación de licuación y temas relacionados en algunas de las normativas internacionales vigentes, así como algunos comentarios al respecto de cada una de estas:

2.2.1 Eurocódigo (European Committee for Standardization, 2004)

En el continente europeo, se ha presentado un conjunto de códigos conocidos como Eurocódigo. Aquellos correspondientes a los capítulos correspondientes al diseño geotécnico y el diseño de estructuras sismorresistentes son el Eurocódigo 7 y el Eurocódigo 8, respectivamente. Las pautas para el estudio de licuación en suelos están incluidas en el Eurocódigo 8, y establecen las siguientes medidas:

- La evaluación de licuación es requerida para aquellos suelos con espesores de arena suelta sumergidos y cuando el nivel freático está cerca de la superficie

La consideración de suelo licuable se descartará para suelos que:

- Tengan un contenido $P_{\#200} > 20\%$ y un $IP > 10$
- Sean arenas con más de 35% de limos y tengan una resistencia a la penetración estándar corregida $(N_1)_{60} > 20$
- Sean arenas limpias con $(N_1)_{60} > 30$
- Su estudio sísmico haya obtenido valores de aceleración máxima menores a 0.15g

El método de evaluación de licuación propuesto por el Eurocódigo 8 es determinístico, y opera con un FS_L mínimo de 1.15, el cual se puede considerar como conservador. Las correlaciones presentadas son de N-CRR y tienen de fuente aquellas de Seed et al. (1983, 1984), para arenas limpias y arenas con contenido de finos.

Como comentario se puede resaltar que el Eurocódigo 8 es relativamente laxo frente al problema de la licuación, al menos en ámbitos conceptuales. Esta condición parece ser

compensada a través de un FS_L conservador. Otro punto a notar es que el tomo del código asociado a la licuación data del 2004. Estas limitaciones son entendibles desde el punto de vista de que la mayoría del continente europeo no cuenta con sismicidad considerable, por lo que el riesgo de licuación es un problema secundario, con excepciones como en determinadas zonas de Rumania, Polonia, Italia y Grecia (Papathanassiou et al., 2010; Meisina et al., 2022).

2.2.2 American Society of Civil Engineers (ASCE)

La American Society of Civil Engineers (2022) aborda el problema de licuación en el ASCE 7-22 *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*, estándar centrado en el comportamiento de edificaciones, criterios para su buen desempeño y respuesta a fuerzas externas, como lluvias, viento, sismos, inundaciones, tsunamis, entre otros. Este reglamento contiene un extenso número de consideraciones estructurales a tomar en cuenta, así como información relevante sobre estudios más recientes que buscan estimar el daño estructural por la ocurrencia de terremotos e información registrada de eventos sísmicos (Anchorage, 1964; Loma Prieta, 1989; Kobe, 1995; Kocaeli, 1999). Uno de los conceptos notables que se aborda es el de los asentamientos diferenciales ocasionados por licuación, los cuales pueden ser debidos a variación del espesor, a la densidad relativa, o el contenido de finos en el suelo de un estrato potencialmente licuable, a través de la extensión de una edificación. El concepto de *punching failure* (véase, Figura 38) por pérdida de resistencia del suelo también es referenciado. Sobre la pérdida de resistencia del suelo, el ASCE 7-22 expande su entendimiento más allá de solo aquella causada por la licuación. Existe una consideración no solo por los asentamientos causados durante la licuación, sino por los asentamientos sísmicos. De esta forma, se cuenta con certeza reiterada de que la edificación cumpliría los estándares ante dicho fenómeno.

Estas consideraciones se toman en cuenta para las proposiciones de diseño de cimentaciones. Se prohíbe la pérdida de resistencia de cargas verticales bajo una cimentación,

previniendo así la ruptura del suelo subyacente. Se propone la utilización de técnicas de mejoramiento de suelos. Para cimentaciones superficiales, se permiten aquellas que cuenten con vigas de conexión que limiten los asentamientos diferenciales y, por ende, el daño estructural.

Las consideraciones específicas para el estudio de la licuación se encuentran incluidas en un documento suplementario *Evaluation of Geologic Hazards and Determination of Seismic Lateral Earth Pressures* (FEMA P-750, 2009) . Dicho documento contiene las principales formas de evaluar el potencial de licuación dentro de la sección de peligros geológicos. Respecto a los métodos empíricos, se menciona a los basados en esfuerzos, y se desarrolla una guía de los conceptos de CSR y CRR. Se enfatiza en los que involucran ensayos in situ como SPT, CPT y ondas de corte. Las actualizaciones más recientes sobre los procedimientos de evaluación son mencionadas con la referencia específica a los artículos que las establecen; así como una breve reseña sobre su uso adecuado. Asimismo, se referencia una serie de criterios para la elección óptima de un FS apropiado, como lo son el tipo de estructura, niveles de riesgo aceptables establecidos por una entidad gubernamental o el cliente, las potenciales consecuencias de la ocurrencia de licuación, incertidumbres en obtención de parámetros in situ e indeterminación ante solicitudes sísmicas elevadas (posibles en correlaciones de resistencia CRR donde existe zonas asintóticas). Otro lineamiento asevera que una estructura con sótanos podría elevarse a la superficie durante el fenómeno de licuación por flotación, de ser que su peso total no exceda el producto del volumen de los sótanos por el peso unitario del suelo licuable.

2.2.3 México

El Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (Gobierno de la Ciudad de México, 2017) cuenta con un mapa de zonificación geotécnica de la ciudad de México, que consiste en tres zonas:

- Zona I: Zona no lacustre con posible existencia de estratos arenosos sueltos o cohesivos relativamente blandos, lomas consistentes de rocas y suelos firmes, presencia de restos de explotación minera.
- Zona II: Transición entre zona no lacustre (I) y zona lacustre (III).
- Zona III: Zona lacustre, con depósitos de arcillas altamente compresibles, arenas medianamente compactas a compactas y limos.

Ante esto, el código establece lineamientos para el reconocimiento del sitio. El mapa mencionado puede ser utilizado directamente de ser el caso de realizar una edificación ligera con cimentaciones superficiales. De otro modo, se procederá a hacer investigaciones directamente enfocadas al subsuelo del predio donde se ubica el proyecto. Estos son lineamientos generales, más allá del problema específico de la licuación, y presentan una ayuda que parece justa para determinados proyectos, pero que es suficientemente conservadora para aquellos proyectos que sean mayores (en este caso, el mapa sirve como información complementaria o de guía para la exploración geotécnica). Para estos proyectos mayores, se plantea lineamientos particulares de acuerdo a la zona en la que se encuentren. Esto se justifica con observar el mapa mencionado: Una porción considerable de la ciudad de México está comprendida por suelo lacustre, con presencia de arcillas altamente compresibles y limos, suelos que pueden considerarse como poco adecuados y que requieren de soluciones geotécnicas de considerable complejidad.

Del mismo modo, para la definición del tipo y número de investigaciones, este código establece pautas de acuerdo al tipo de edificación (de acuerdo al peso, el perímetro y la profundidad de cimentación) y la zona establecida mediante la zonificación geotécnica. A su vez, se establecen los criterios para condiciones especiales e irregularidades, que presentarán un desafío adicional para la caracterización geotécnica. Respecto a la licuación, este

documento no presenta consideraciones específicas sobre evidencia de esta o la necesidad de evaluarla.

Las pautas que este código brinda para cada zona exceden en especificidad a las propuestas por nuestro código en demasía. Respecto al artículo de licuación, nuestro código establece tan solo “sospecha de licuación”. En términos generales, la Norma Mexicana presenta el caso más crítico dentro de la ingeniería geotécnica, el cual es alineado a las complicadas condiciones del país. Se presentan lineamientos rigurosos y lecciones de aprendizaje para las propuestas normativas de la geotecnia en general.

Por otro lado, El Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (2017) no incluye lineamientos sobre el estudio del riesgo de licuación. Esto se podría justificar puesto que el problema más grave en la geotecnia de México es el de los asentamientos en estratos altamente compresibles. Sin embargo, se ha presentado registros de licuación en México. Según Nieves Sánchez Guitián, secretaria del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG), tras el terremoto de 2017 (M_w 7.1, ocurrió licuación), es el efecto local de la licuación el que trae consigo las mayores consecuencias de la destrucción vista en la capital. Al considerar las características presentes en los suelos de la ciudad de México (suelos sueltos, poco densos, altamente compresibles), es claro que la ocurrencia de licuación en estos suelos trae consigo consecuencias devastadoras. Se atribuye a su vez esto a que el terreno bajo la ciudad está constituido por cenizas volcánicas poco consolidadas (Martínez, 2017). A su vez, la naturaleza de las partículas que constituye este suelo constituye un punto de distinción respecto a las arenas “normales” en las cuales se ha desarrollado curvas de resistencia a licuación. Asadi et al. (2023) estudian la resistencia a la licuación en suelos derivados de depósitos de rocas pumíceas. La estructura de las partículas en mención se considera “triturable”, muy diferente a aquella presente en las arenas “normales”, particularidad con posibles implicancias en los resultados de los sondeos mecánicos SPT y CPT. Es esto mismo

lo que puede estar sucediendo en los suelos volcánicos mencionados, y que requiere un mayor grado de investigación para una comprensión integral de su comportamiento y el estudio de la licuación aplicado a su caso. Lo mencionado pone en frente la necesidad de abordar el estudio de la licuación de suelos compuestos por partículas anómalas en una futura actualización del reglamento.

2.2.4 Costa Rica

Este código incluye un resumen muy completo y didáctico sobre el fenómeno de licuación, sus efectos, sus consecuencias en las estructuras suprayacentes, los suelos susceptibles y los factores que inciden en su ocurrencia. Respecto a la evaluación de licuación, el código de cimentaciones de Costa Rica, en su segunda edición (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009) propone tres grados de métodos de evaluación de licuación.

- La evaluación de licuación de primer grado consiste en la valoración de la máxima extensión susceptible a la licuación de acuerdo a la magnitud del sismo. Los principales estudios al respecto se presentan en la Figura 11.

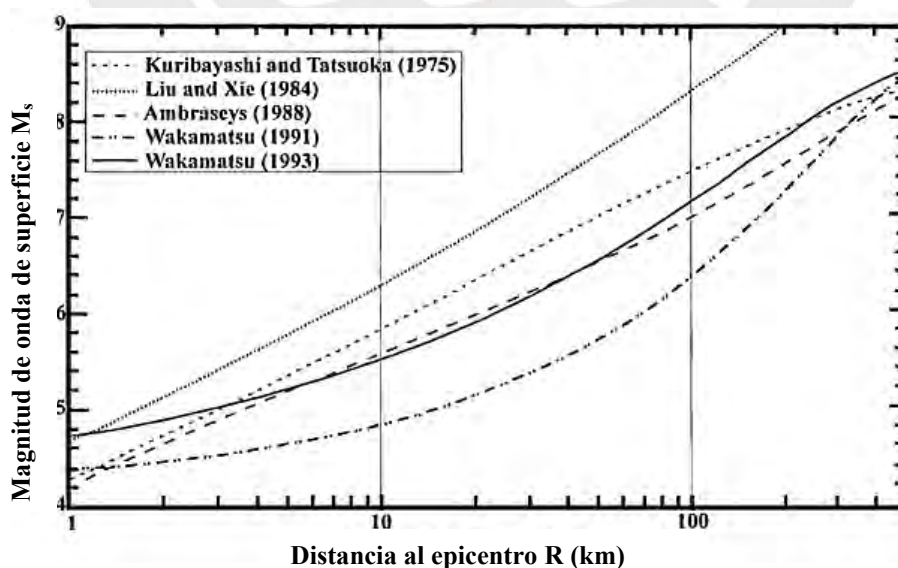


Figura 11. Comparación de estudios que presentan relación entre distancia del epicentro a lugar más lejano en donde se ha registrado licuación y magnitud de ondas superficiales

- El segundo grado consiste en el estudio de las formaciones geológicas de determinado lugar, las cuales por su origen y antigüedad se asocian con las características de suelos susceptibles a licuar. Los depósitos aluviales o coluviales uniformes y de poca antigüedad (holoceno) que se encuentren saturados son aquellos que presentan mayor susceptibilidad.
- El procedimiento de análisis de licuación de tercer grado consiste en aquel que corresponde al cálculo de los términos CSR y CRR (mencionados más adelante en esta tesis). Según este código, se utilizan las curvas de Seed et al. (1985), similares a la utilizada por la E.050 $(N_1)_{60}$, tanto para arenas limpias como para limosas. A su vez, se presenta una expresión obtenida del Código Chino de la Construcción (1974), y también mencionada por Seed e Idriss (1982), la cual consiste en el cálculo de un N crítico de licuación (presentada más adelante en esta tesis, en 2.4.2). Se puede considerar que este código admite el uso complementario de estos procedimientos, de forma que se pueda obtener una mejor caracterización del suelo.

Si bien ya se ubica fuera del capítulo de licuación, es de interés resaltar que el Código de Cimentaciones de Costa Rica incluye un capítulo para el mejoramiento de suelos justo a continuación, en el que se incluyen los métodos con los suelos en los que son viables y sus beneficios. Algunos de los mencionados son: pre-carga, precarga con drenes verticales, electro-ósmosis (expulsión de agua); inyección y mezcla a profundidad (*grouting* y estabilización del suelo); vibro-compactación y vibro-flotación (aumento de resistencia); entre otros. El uso de varios de estos métodos puede ser útil para mejorar las propiedades del suelo, entre las que se encuentra su densidad o la expulsión del agua en suelos saturados. Esto implica la reducción del riesgo a la licuación.

En resumen, el capítulo de licuación del Código de Cimentaciones de Costa Rica es destacable desde el punto de vista didáctico e incluye información que otros códigos, que se

centran más en lo normativo, no incluyen. Sin embargo, la evaluación de licuación en sí presenta algunas omisiones (deliberadas o no). Por ejemplo, se encuentra la evaluación de resistencia a licuación por medición de velocidad de ondas de corte. Esta omisión es interesante, considerando que los métodos geofísicos son mencionados en el mismo código en otras instancias (se verá a continuación en 2.2.5). Por otro lado, el método de evaluación de licuación presentado tampoco está propuesto para su uso con CPT, y solo se presenta el enfoque determinístico.

2.2.5 Colombia

A pesar de desviarse del campo de las edificaciones, se recoge el aporte incluido en el Manual de Diseño de Cimentaciones en Carreteras (Ministerio de Transporte, 2012), basado en el reporte de Kramer (2008), en el cual se presenta un procedimiento para la determinación de la susceptibilidad a la licuación. Se muestra a continuación:

$$SRF = F_{Hist} F_{Geo} F_{Comp} F_{NF}$$

Donde:

SRF: Factor del grado de susceptibilidad (*Susceptibility Rating Factor*)

F_{Hist} : Factor de la historia de licuación.

F_{Geo} : Factor de la geología.

F_{Comp} : Factor de composición.

F_{NF} : Factor de nivel freático.

Estos factores incluyen penalizaciones de acuerdo a la calidad de la investigación (C_{Cal} , factor que conforma F_{Geo} tiene valor de 1.5 para estimación, frente a 1.0 para reconocimiento de sitio por geólogo); ocurrencias históricas de licuación, las cuales varían desde no ocurrencia (1.0), hasta ocurrencia de licuación generalizada (10.0); la clasificación geológica,

entre otros. De esta manera, se permite la toma de decisiones inteligente, incluso en el caso de que ciertos factores no sean conocidos o que indiquen indecisión.

2.2.6 Los métodos geofísicos

Al día de hoy, son varios los códigos que incluyen en su planteamiento la realización de ensayos geofísicos como procedimientos complementarios para la caracterización del suelo. Entre ellos, el Código Español (Ministerio de Fomento, 2019) permite la utilización de métodos geofísicos para la prospección del terreno, siempre que sean complementarios con los sondeos mecánicos. El objetivo es el de “complementar datos, mejorar su correlación, acometer el estudio de grandes superficies”. Se menciona la utilización de los métodos geofísicos *downhole* y *crosshole*, cuya utilización se permite para terrenos con porcentaje considerable de gravas, cantos o bolos y cuando la edificación a proyectar lo justifique. En un anexo, se menciona una lista más considerable de métodos geofísicos, que incluye una breve descripción de su objetivo y alcance. Su uso tiene como requisito la planificación de grandes áreas por construir, que requerirán información complementaria para distribuir los puntos de exploración adecuadamente.

El Código de Cimentaciones de Costa Rica, Segunda edición (2009), por su parte, menciona la posibilidad de usar métodos geofísicos para la caracterización de suelos en los cuales la obtención de muestras inalteradas sea complicada. Los métodos geofísicos mencionados por este código son el de refracción sísmica y resistividad eléctrica. Se indican las normas a usar, las cuales son las del ASTM.

2.3 Antecedentes nacionales: NTE E.050

La primera reglamentación utilizada en el Perú respecto del campo de la mecánica de suelos data del año 1970. Esta primera versión del código que conocemos es muy breve y carece de varios capítulos, entre los que se encuentra el de importancia principal para esta tesis: la licuación. Se puede excusar esta ausencia ante el hecho de que las metodologías para

evaluar la licuación no se plantean sino hasta 1971, un año después de la publicación de dicha reglamentación (Gobierno del Perú, 1970).

No sería hasta 1997 cuando, por primera vez, se publica la norma de suelos en su nueva denominación: E.050. Si bien esta primera edición de la E.050 presenta una mención acerca de la licuación de suelos, no ofrece ninguna pauta concreta, por lo que se queda en una simple y escasa mención. La pauta es la siguiente: “Mediante el estudio que le corresponda, el profesional responsable debe descartar o verificar la ocurrencia del fenómeno de licuación en los suelos ubicados bajo la napa freática” (Ministerio de la Vivienda, Construcción y Saneamiento, 1997)

En términos generales, las pautas de la segunda edición de la Norma Técnica E.050 (2006) son de más rigor. Muchos de los capítulos son enriquecidos con pautas claras que favorecen un marco teórico más complejo y actualizado, entre los cuales se encuentra la licuación y su análisis. Entre las pautas referidas están las características generales del suelo susceptible a licuación (para el cual los estudios de licuación son necesarios), la investigación de campo necesaria para dicho suelo, y, finalmente, la propuesta de emplear el método de Seed e Idriss (1971) para la evaluación del potencial de licuación. (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2006)

Frente a la considerable mejora que presenta la E.050 de 2006 respecto a la de 1997, la NTE E.050 (2018) presenta cambios más sutiles. Se presenta una perspectiva más amplia del marco teórico de la evaluación del potencial de licuación, incluyendo la revisión conforme al estado del arte del EERC (2003); el ítem de cimentaciones en áreas de suelos licuables, el cual restringe el potencial de licuación P_L a 10% y reglamenta el uso de losas de cimentación de no ser posible alcanzar este requisito. Por el contrario, algunas pautas introducidas en 2006 se omiten de la edición más reciente, como es la de licuación de suelos arenosos con

contenido de finos (criterio basado en Seed e Idriss (1982), que a su vez está basado en el criterio chino).

2.4 Estado del arte: el método simplificado basado en esfuerzos

2.4.1 Antecedentes

La licuación como fenómeno no ha sido percibida sino hasta tiempos relativamente recientes. El término fue acuñado por primera vez por Hazen (1920), tras realizar estudios en la presa de Calaveras de California, la cual colapsó de manera inexplicable si nos basamos en los conocimientos sobre mecánica de suelos de la época. Hazen (1920) describe el fenómeno de licuación de forma bastante detallada, conforme con el conocimiento actual de los mecanismos que rigen el fenómeno mismo. Más adelante, Kubo y Mogami (1953) emplean el término, asociándolo como una consecuencia de las vibraciones a las que se somete a una muestra de suelo en laboratorio, lo cual a su vez asocian al comportamiento débil del suelo evidenciado durante terremotos. En su publicación, se observa la pérdida de resistencia al corte de los suelos que experimentan licuación, al elevar la aceleración a la que se ven sometidos. De tal modo es que emergen detalles más específicos sobre la naturaleza de este fenómeno a través de las décadas bajo investigaciones de carácter teórico, de tal manera que en el campo de la mecánica de suelos adquiere noción de los principios básicos que rigen su mecanismo de acción. Pasados los mediados del siglo XX, diversos investigadores empiezan a realizar estudios más integrales sobre la naturaleza de la licuación y la posibilidad de estimar la susceptibilidad de un suelo a esta. Es decir, la elaboración de una metodología de aplicación práctica que permita caracterizar la susceptibilidad a la licuación en un suelo determinado, y posteriormente evaluar cuán probable es que un suelo licúe.

La víspera de los terremotos de Alaska y Niigata de 1964 sería determinante para el avance en este campo. En el terremoto de Alaska (magnitud M_w de 9.2, escala MM de XI), la ocurrencia de licuación sería notable y extensiva, con flujos laterales de suelo licuado,

suscitando fallas amplias en carreteras (Seed, 1973); así como deslizamientos de tierra y daño extensivo en cimentaciones de puentes, entre otros (Ross, Seed, & Migliaccio, 1969). Muchas estructuras se asentaron más de 1 metro de profundidad en el suelo licuado y el asentamiento se vio a menudo acompañado de inclinaciones severas. Miles de construcciones colapsaron o sufrieron daño considerable fruto de estos efectos (Ohsaki, 1966). Las más grandes concentraciones de daño severo ocurrieron en regiones caracterizadas por depósitos densos de suelos saturados no cohesivos (Seed e Idriss, 1982). Por su parte, el terremoto de Niigata (magnitud de 7.5), ocurrido tan solo unos meses después, no haría más que acentuar la necesidad de abordar la problemática de la licuación. Tras el terremoto, se realizó una encuesta para medir el daño en las estructuras. Los resultados evidenciaron la existencia de tres zonas: una que manifestó daño nulo, una segunda con daños leves y una zona donde el daño y la licuación fue extensiva. Puesto que las tres zonas presentaban estructuras de características similares, era evidente que dichas diferencias de daño presentado solo podían ser explicadas por las características locales del suelo. Según el registro a detalle escrito de este terremoto, “en el área circundante al antiguo curso del río, la mayoría de construcciones de concreto con cimentaciones insuficientes (con pilotes de menos de 8 m) sufrió daño característico de inclinación y subsidencia. Estas características pueden ser adjudicadas al llamado efecto de arena rápida o licuación de depósitos de arena. Había ocho de tales edificaciones en el sitio (cerca del río Shinano), y casi todas hundidas o inclinadas, incluso una de ellas estaba volteada” (Kawasumi, 1968). El registro fotográfico de este desastre es impactante, y aporta una idea de la destrucción que es capaz de causar la licuación de suelos (Figura 12). En los años siguientes, diversos investigadores intensificarían sus esfuerzos para estudiar la licuación.



Figura 12. Daño inducido por licuación tras el terremoto de Niigata en complejo residencial de Kawagishi-cho, 1964. Fuente: Base de datos de NOAA, NGDC.

2.4.2 Método simplificado (basado en esfuerzos), ruta de la E.050

Esta iniciativa resulta en la publicación del primer método cuantitativo de análisis de licuación de suelos por Seed e Idriss (1971), conocido como Método simplificado. El concepto primario de este método consiste en la comparación de dos términos basados en esfuerzos: por un lado, aproximar el esfuerzo que un sismo ejerce sobre un perfil de suelo durante su duración (a la cual se le asigna un número de ciclos). En primer lugar, se escoge una profundidad a la cual se realizará la evaluación (z). para dicha profundidad, un suelo con peso específico (γ) y una aceleración máxima (a_{\max}) elegida al nivel de la superficie, se tiene el esfuerzo aplicado por el sismo sobre la columna de suelo: $(\tau_{\max})_r = \frac{\gamma z}{g} a_{\max}$

Esta expresión corresponde a la de un pilar de suelo con comportamiento mecánicamente rígido, por lo tanto, se utiliza un factor de reducción (r_d), que corrige el esfuerzo ocasionado al considerar el pilar de suelo evaluado como un material rígido. El valor de r_d corresponde al comportamiento real del pilar de suelo $(\tau_{\max})_d / (\tau_{\max})_r$ y se presenta en la Figura 8. El rango de datos presentado por Seed e Idriss (1971) está basado en análisis de respuesta de suelos correspondientes a las bases de datos disponibles en la época. A través de

los años, diversos investigadores ampliarían y afinarían el concepto de r_d , en el que se reiterará más adelante en esta tesis.

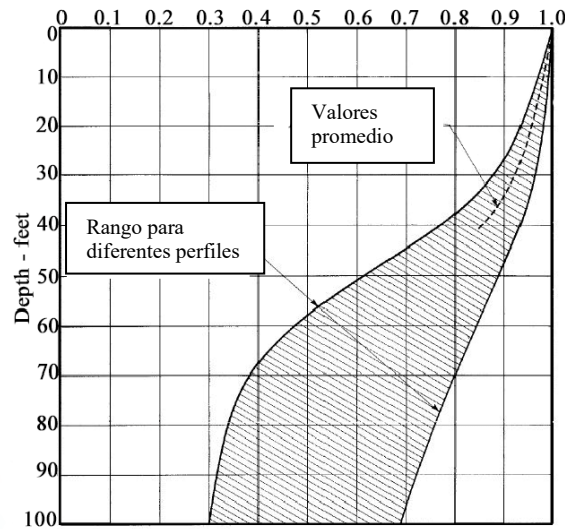


Figura 13. Factor de reducción r_d (Seed e Idriss, 1971)

De acuerdo a lo explicado, la expresión quedaría como se presenta: $\tau_{\max} = \frac{\gamma z}{g} a_{\max} r_d \cdot A$

continuación, se reduce el esfuerzo de uno máximo a uno promedio, correspondiente a un

65% del máximo. De tal modo: $\tau_{av} = 0.65 \frac{\gamma z}{g} a_{\max} r_d$. A partir de esta ecuación, se obtiene la

relación de esfuerzos cíclicos inducida por el sismo, mayormente conocido como *Cyclic Stress Ratio* (CSR), al dividirse sobre el esfuerzo efectivo:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = \frac{0.65 \gamma z}{\sigma'_{v0} g} a_{\max} r_d (*)^1$$

(*) Posteriormente, se incluyen dos términos adicionales para normalizar el CSR, tanto por la magnitud del evento sísmico (MSF), como por la presión de tapada (K_σ). De tal manera, el CSR usado por el método simplificado resulta: $CSR = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \left(\frac{1}{MSF} \right) \frac{1}{K_\sigma}$. Un tercer término adicional, K_α , relacionado con el

empuje horizontal también es usado en ocasiones, aunque actualmente no existe consenso sobre su uso ingenieril.

La expresión de CSR presentada se usa hasta el día de hoy para la evaluación de licuación debido a su simplicidad. Por otro lado, se puede calcular el esfuerzo inducido mediante análisis dinámicos de respuesta. Esto requiere de mayor información para su uso, como la distribución de ondas de corte (V_s) para el perfil de suelo y lecho rocoso, así como la obtención previa relaciones no lineales basadas en la deformación (variación de módulo de corte por deformación de corte, por ejemplo) y diversos registros de movimientos sísmicos como *input* (al menos cinco de estos, según recomendación del ASCE). La obtención del CSR basado en análisis dinámicos de respuesta busca reducir incertidumbres causadas por la variabilidad del factor r_d , pero requiere de criterio ingenieril apropiado y una caracterización detallada del perfil de suelo, información que implica costo y tiempo elevado.

Por otro lado, se halla el esfuerzo necesario para que determinado suelo entre en licuación (para el mismo número de ciclos). Según Seed e Idriss (1971), este esfuerzo ha de ser hallado mediante un programa de ensayos triaxiales cíclicos o mediante la información que Seed e Idriss (1971) presentan en la Figura 16, basada en los mismos ensayos mencionados antes, para arenas a distintas gradaciones y para un Número de Ciclos Significativos (N_c) de 10 ciclos y de 30 ciclos (dicho N_c está relacionado a la duración del sismo, la cual asimismo depende de su magnitud; dicha relación aproximada se presenta en una tabla breve: Tabla 1). Dichos gráficos están basados en los datos disponibles en la época, y bajo selección a criterio de los investigadores. Más adelante se contemplará cómo la interpretación de datos y la ponderación de estos de acuerdo a su grado de alterabilidad o riqueza de información y caracterización del suelo pueden desempeñar una diferencia considerable a la hora de establecer correlaciones. Se ingresa en estos gráficos con la dimensión de grano D_{50} , obtenida tras un ensayo de granulometría, y se obtiene la relación de esfuerzos $\frac{\sigma_{dc}}{2\sigma_a}$ causantes de la licuación, para los ciclos considerados. De la relación, σ_{dc} es

el esfuerzo desviador y σ_a es la presión bajo la cual la muestra se ha consolidado (parámetros de ensayo triaxial). Por otro lado, el factor c_r es un factor de corrección aplicado a ensayos de laboratorio triaxiales para obtener las condiciones que causan licuación en el campo. Con lo avanzado, la expresión hasta el momento es la siguiente:

$$CRR = \left(\frac{\tau}{\sigma'_{v0}} \right)_{ID_r} \cong \left(\frac{\sigma_{dc}}{2\sigma_a} \right)_{150} c_r \frac{D_r}{50}$$

Donde: CRR es *Cyclic Resistance Ratio*, y expresa una razón a la cual la licuación va a suceder, y de la cual, ya se conocen la relación de esfuerzos $\frac{\sigma_{dc}}{2\sigma_a}$ y el esfuerzo efectivo vertical σ'_{v0} . Así, la expresión queda como una equivalencia entre el esfuerzo que causa licuación en determinada cantidad de ciclos (τ_{L10} , de ser N_c igual a 10) y una expresión dependiente de D_r y c_r (este último depende a su vez del primero)

De proceder con la información aportada por los gráficos de Seed e Idriss (1971), equiparar estos dos términos para un suelo de determinadas características y a una altura determinada nos da una posible solución, una frontera que delimita la frontera entre lo que licúa y lo que no licúa. Seed e Idriss (1971) sugieren evaluar la profundidad tentativa de licuación (profundidad crítica) dependiendo de la profundidad del nivel freático. Para una profundidad de nivel freático de 0 a 10 pies (aproximadamente 3 metros), la profundidad crítica será de aproximadamente 20 pies (6.1 metros). Para una profundidad de nivel freático de 15 pies ($\approx 4.5\text{m}$), esta será de 30 pies ($\approx 9.1\text{ metros}$). Finalmente, el método propuesto por Seed e Idriss (1971) requiere el uso de la relación de Gibbs y Holtz (1969) para hallar la densidad relativa in situ a partir de la resistencia a la penetración N de SPT y los esfuerzos efectivos verticales (σ'_{v0}).

Tabla 2. Relación entre N_c y magnitud de un sismo

Magnitud del terremoto	Número de ciclos significativos, N_c
7	10
7-1/2	20
8	30

Nota: Adaptada de Seed e Idriss (1971)

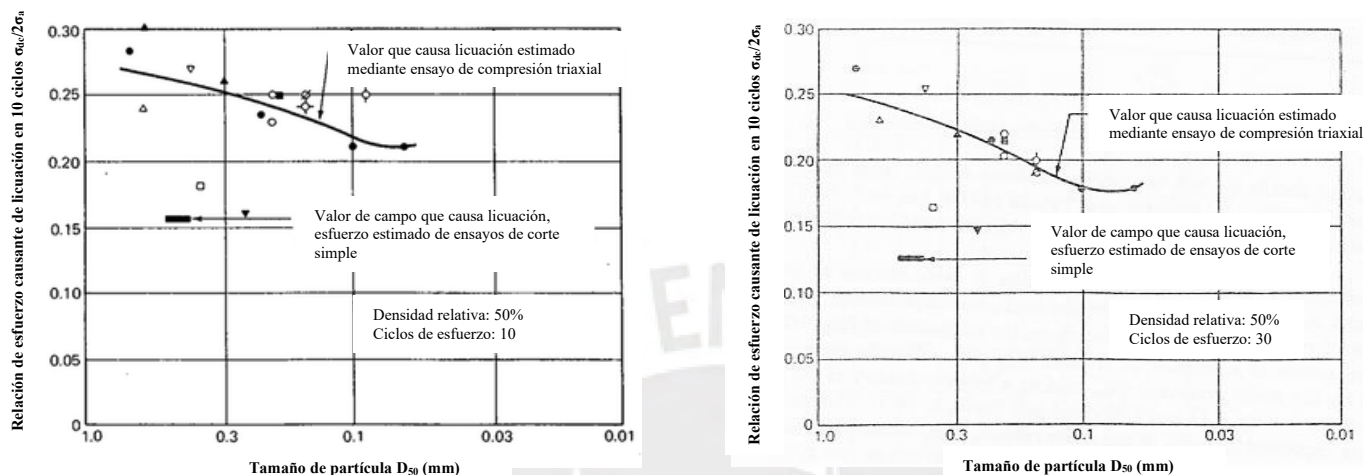


Figura 14. Condiciones de esfuerzo que causan licuación en arenas (a) en 10 ciclos (b) en 30 ciclos (Seed e Idriss, 1971)

Así, el método simplificado de Seed e Idriss (1971) considera en su planteamiento los factores teóricos que influyen la licuación, como son el tipo de suelo, la densidad relativa, la presión de confinamiento, la intensidad del sismo y la duración del sismo. Esta metodología es la primera en evaluar el potencial de licuación en un sitio específico y con relativa practicidad, al ya integrar en su uso parámetros de campo como el N del SPT. Sin embargo, son evidentes las limitaciones de su aplicación y sus resultados. La misma propuesta en su desarrollo reconoce que podrían darse falsos positivos o negativos, sin un marco probabilístico para gestionar el riesgo, lo que demuestra en base a registros de terremotos en Niigata, Alaska, Chile (1960), entre otros. De elegir efectuar ensayos de laboratorio triaxiales personalizados, como sugieren Seed e Idriss (1971), nos encontramos con el siguiente problema: al ser la licuación un fenómeno predominante en arenas sueltas y saturadas, va a ser virtualmente imposible obtener muestras inalteradas; es decir, que representen las condiciones de campo fiablemente. Los métodos especializados para obtener

muestras inalteradas en suelos granulares, como lo es el congelamiento de suelos (*ground freezing*), van a ser a menudo poco convenientes económicamente, tan solo al alcance de un limitado número de proyectos de seguridad crítica. Esta problemática incita a los métodos de evaluación de resistencia a la licuación a plantear correlaciones mediante ensayos in-situ, como lo son el SPT, el CPT, entre otros. Es de esta forma en la que se enfoca el desarrollo de la mayoría de relaciones entre parámetro de ensayo in situ y CRR, correspondientes al marco teórico del “método simplificado”. Respecto a este enfoque in situ y al basado en ensayos triaxiales, cabe mencionar que evidencias contundentes constatan que la resistencia a la licuación de muestras inalteradas resulta ser sustancialmente superior a la de muestras con alteración significativa (Seed, 1976). De tomar las recomendaciones propuestas por Seed e Idriss (1971), la opción más viable sería la de adoptar la correlación adjunta en el artículo, realizados en arenas a distintas dimensiones de grano D_{50} y $D_r=50\%$ (Figura 16). Adoptar estos resultados previos exige al ingeniero una confianza amplia en su aplicabilidad e ignora u omite las particularidades intrínsecas de cada suelo que puedan también afectar su comportamiento ante la licuación, tales como la presencia de finos, tanto plásticos como arcillosos. Otra asunción que resulta útil en la práctica, pero puede suscitar discusión es el ajuste posterior de aquellos resultados adoptados para densidades relativas. Seed e Idriss (1971) proponen que esta es lineal hasta un valor D_r de 80%, haciendo así el factor de ajuste como $(D_r/50)$, que se procede a multiplicar la relación $\sigma_{dc}/2\sigma_a$ (véase, cálculo de CRR). Por otro lado, no se ofrece ningún enfoque formalmente probabilístico, así como se limita a evaluar la ocurrencia de la licuación, mas no las consecuencias de la eventual licuación, así como pueden ser asentamientos, el fenómeno de *sand boiling*, entre otros. Las probables alturas críticas recomendadas por Seed e Idriss (1971), así como la relación entre N_c y la magnitud del sismo (Tabla 3) constituyen información de relativa practicidad, pero asimismo con evidentes márgenes de mejora a partir de métodos más rigurosos y bases de datos que se

ampliarían en el futuro. De manera anticipada, el factor r_d también constituye un punto de amplias mejoras en los años venideros, debido a su dependencia en varias variables, lo cual se estudiaría más rigurosamente. Cabe también mencionar que el N del SPT presentado por Seed e Idriss (1971) no cuenta con las correcciones que se realizarían sobre este unos años más tarde (por diámetro de varilla, longitud, energía, entre otros), cuestión que se estandarizaría en el futuro para obtener evaluaciones más confiables de campo.

Recapitulando, el método propuesto por Seed e Idriss (1971) fue indudablemente un paso importante en la evolución del estudio de la licuación debido a su practicidad y sus bases metodológicas, a pesar de las limitaciones de su alcance y la urgencia de proponer métodos alternativos o actualizaciones para perfiles más variados de suelo, ya sea granulares gruesos o con contenido de finos. Asimismo, este método solo nos da una idea de si va a o no va a ocurrir la licuación, mas no de los efectos que tuviera dicha licuación, de forma más específica. Dichas preguntas y posibilidades de mejora serían las conductoras de múltiples investigaciones, que por su parte dieron fruto en eventuales actualizaciones del método.

Seed e Idriss (1982) proponen la siguiente actualización considerable sobre la metodología anteriormente propuesta. Por un lado, esta publicación amplía la comprensión acerca de la influencia de la resistencia a la penetración SPT de un suelo, su profundidad y ciertas características de la estructura (número de pisos y tipo de cimentación) sobre los daños estructurales en Alaska y Niigata. Por otro lado, este artículo presenta la actualización del estado del arte para la evaluación de la licuación en suelos. Se incorpora de manera más delimitada y precisa las características de los ensayos para evaluar el esfuerzo cortante cíclico que causa la licuación en un suelo a determinada profundidad (tanto de corte simple como ensayo triaxial). En este apartado, se añade criterios para abordar la problemática de alteración de muestras en diferentes tipos de suelos y su efecto en los parámetros obtenidos del ensayo, para suelos de distintas densidades relativas. Esta variedad de añadidos mejora la

aplicabilidad del método, cuya metodología ahora resulta más fiable para diversos perfiles de suelo. Se provee una correlación entre SPT y CRR de mayor riqueza debido a la extensa documentación de sitios de diversos sismos históricos. Asimismo, se añaden opciones de evaluación de licuación relacionadas con el ensayo *Cone Penetration Test* (CPT) y su correlación al SPT. De manera similar con Seed e Idriss (1971), en Seed e Idriss (1982) se presenta una nueva opción de evaluación de CRR aproximada basada en rendimientos típicos organizados en un gráfico (de no contarse con los medios para realizar ensayos de laboratorio), el ejemplo de uno de los casos registrados se ve en la Figura 11. Esta correlación actualizada está basada en la recopilación de datos correspondientes a diversos sismos de los últimos años, como lo son el terremoto de Guatemala (1976), el terremoto de San Juan, Argentina (1978), el terremoto de Miyagiken-Oki, Japón (1978), entre otros. La Figura 15 presenta la comparación empírica con la data de sitio de uno de los sismos evaluados. Una particularidad de la nueva correlación obtenida consiste en la magnitud de estos terremotos: todos ellos son de alrededor de 7.5 de M_w . En esta ocasión, la aproximación de la relación de esfuerzos se basa en la resistencia a penetración N del SPT (ajustado a su versión N_1) y en la magnitud del sismo (en Seed e Idriss (1971), se hallaba mediante la dimensión de partícula D_{50}). Seed e Idriss (1982) abordan la observación acerca de la relación entre N_c y magnitud, de tal manera que presentan una relación actualizada en base a estudios estadísticos, como se ve en la Tabla 3.

Tabla 3. Relación entre N_c y magnitud de un sismo

Magnitud de terremoto	Número de ciclos representativos (N_c)
5 $\frac{1}{4}$	2-3
6	5-6
6 $\frac{3}{4}$	10
7 $\frac{1}{2}$	15
8 $\frac{1}{2}$	26

Fuente: Seed et al. (1975)

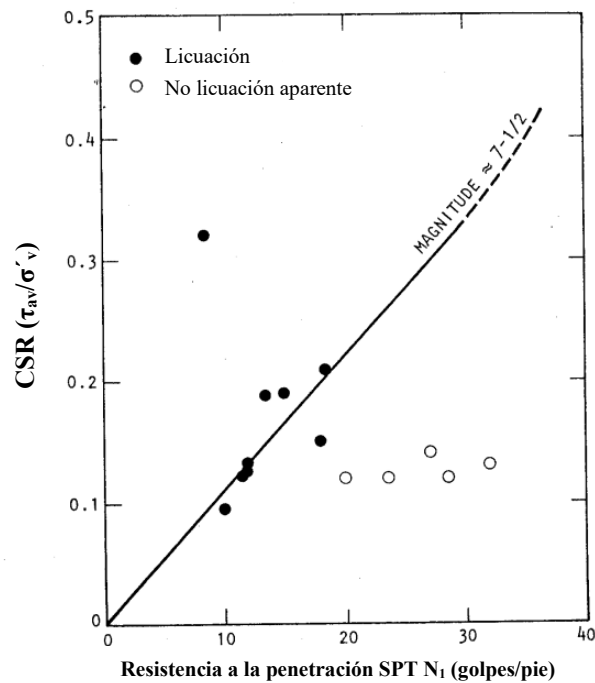


Figura 15. Comparación de gráfico empírico para predecir licuación e información obtenida en campo del terremoto de Haicheng y Tangshan (Seed e Idriss, 1982)

A continuación, se extrapola la nueva correlación entre N_1 y CSR para magnitudes sísmicas diferentes a 7.5. La Tabla 4 y la Figura 16, presentadas a continuación, presentan un resumen representativo de la forma que adquiere la correlación ahora.

Tabla 4. Relación del CRR para una magnitud M y el CRR para una magnitud de 7.5, actualmente conocido como MSF (*Magnitude Scale Factor*)

Magnitud sísmica	Número de ciclos representativos a $0.65\tau_{max}$	$CRR_M/CRR_{M=7.5}$
8.5	26	0.89
7.5	15	1.0
6.75	10	1.13
6	5-6	1.32
5.25	2-3	1.5

Nota: Adaptado de Seed e Idriss (1982)

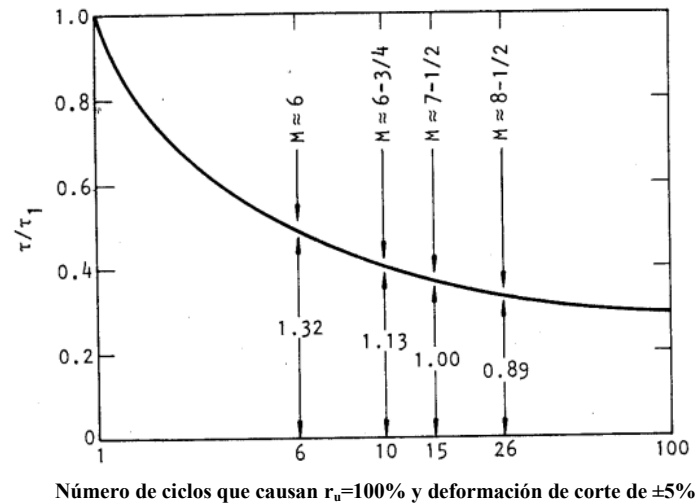


Figura 16. Relación representativa entre τ/τ_1 y número de ciclos requerido para causar licuación (Seed e Idriss, 1982)

Dicho gráfico se interpretaría de la siguiente manera: Un terremoto de magnitud de $8 \frac{1}{2}$ ciclos equivale a 26 ciclos significativos. Para que el suelo licúe a 26 ciclos significativos, el esfuerzo cortante inducido por dicho sismo debe ser 89% del esfuerzo inducido por un sismo de 7.5 (equivalente a 15 ciclos significativos) que haga licuar al suelo. Del mismo modo, un sismo de magnitud 6 equivale a 6 ciclos significativos. Para que un suelo licúe en 6 ciclos significativos, el esfuerzo cortante inducido por este sismo de magnitud 6 debe ser 132% de lo que equivale un terremoto que haga licuar al mismo suelo en 15 ciclos (magnitud 7.5). Los mismos resultados son sintetizados en la Figura 17:

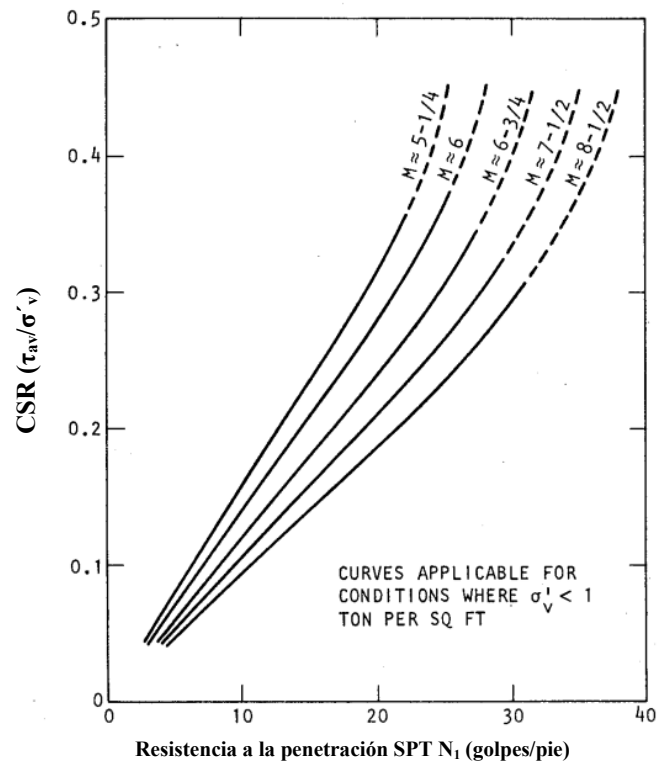


Figura 17. Curvas de evaluación de licuación para arenas para sismos de diferentes magnitudes (Seed e Idriss, 1982)

Sumado al enriquecimiento del procedimiento simplificado presentado en los párrafos anteriores, Seed e Idriss (1982) abordan la posibilidad de licuación de suelos finos, previamente invisibilizada. La licuación en arcillas se presenta como una situación muy improbable, pero bajo ciertas características posible (Wang, 1979). A estos requisitos se les conoce como “criterio chino”, y se presentan a continuación:

- Porcentaje más fino que 0.005 mm < 15%
- Límite Líquido < 35
- Contenido de agua > 0.9 x Límite Líquido

Asimismo, Seed e Idriss (1982) integran en su propuesta la correlación del ensayo de penetración de cono (CPT) con el N del SPT. En este ensayo, un instrumento cilíndrico de punta cónica de 1.4 pulgadas de diámetro es introducido a una velocidad constante en el

suelo, de tal manera que se obtiene la resistencia a la penetración de la punta cónica, denominada como q_c (kg/cm^2). Las ventajas del uso de CPT respecto al SPT radican en menor variabilidad por error de operador, mayor rapidez para realizarlo y capacidad de muestreo continuo. A pesar de esto, en esta publicación se plantea el CPT como un ensayo adicional complementario al SPT, debido a la escasez de datos en las que se basan las correlaciones existentes en tal período. Las opciones recomendadas por Seed e Idriss (1982) son: Plantear una correlación única tras estudios previos para el CPT y el SPT del suelo de estudio (véase, Douglas et al., 1981); o basarse en la siguiente relación:

- $q_c \approx 4$ o 5 N para arenas limpias
- $q_c \approx 3.5$ a 4.5 N para arenas limosas (Schmertmann, 1978)

Esta correlación se presenta en la Figura 18, donde se presenta en sombreado un rango de indeterminación.

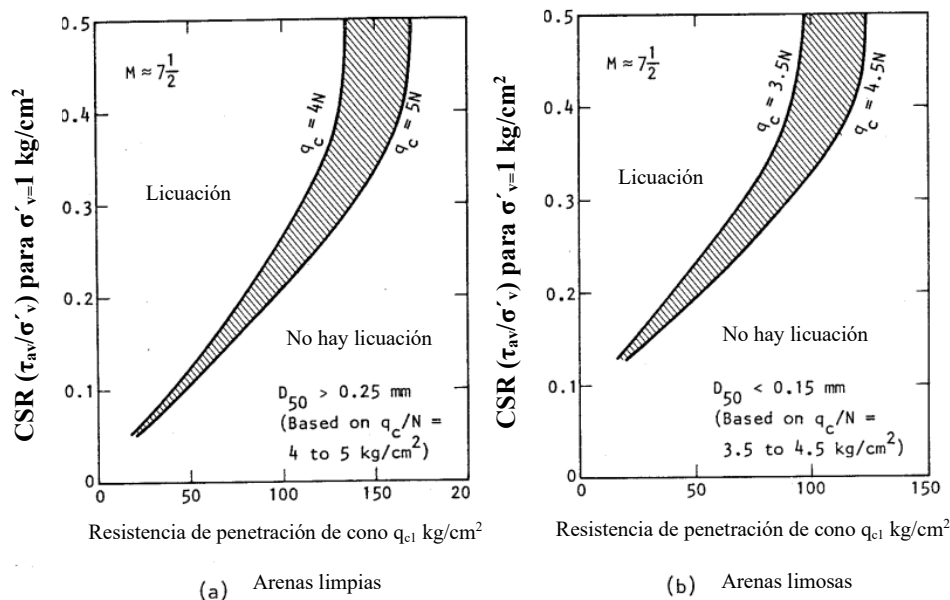


Figura 18. Correlación entre comportamiento de licuación de arenas en campo y resistencia de penetración CPT, para arenas limpias y arenas limosas para sismo de magnitud 7.5 (Seed e Idriss, 1982)

En resumen, Seed e Idriss (1982) presentan un estado del arte actualizado del estudio del fenómeno de licuación, tomando en cuenta algunas de las limitaciones del método simplificado original. La implementación de relaciones entre daños, tipo de cimentación y profundidad, número de pisos de esta responde parcialmente a la problemática de efectos de sitio, y formula un avance en lo que respecta al aspecto de respuesta sísmica de las estructuras. Asimismo, Seed e Idriss (1982) incorporan por primera vez en el método simplificado pautas específicas para la evaluación de suelos arcillosos, incluso si es una metodología menos rigurosa que la conocida en arenas. Otro acierto radica en la inclusión de pautas estándares de correlación entre CPT y SPT, incluso si estas presentan un amplio margen de mejora.

El siguiente reporte de referencia por la NTE E.050 es aquel presentado por Youd et al. (1997), como resultado de un taller realizado en 1996, auspiciado por el *National Center for Earthquake Engineering*, en el que se convocó a 20 expertos para efectuar consensos en torno al estudio del fenómeno de la licuación. Youd et al. (1997) presentan una propuesta que refuerza la obtención de parámetros mediante distintas técnicas de investigación, de tal modo que cualquiera que sea el ensayo elegido, se obtenga resultados consistentes (Tabla 5). La elección de ensayo a tomar debería ser únicamente una cuestión de disponibilidad, costo y preferencia. Como se puede ver, el ensayo BPT (*Becker Penetration Test*) constituye una alternativa preferible para evaluar la resistencia a penetración de suelos gravosos frente al SPT. A pesar de ello, cabe mencionar que el equipo necesario para realizar el BPT no cuenta con amplia disponibilidad en el Perú.

Tabla 5. Comparación de ensayos de campo para caracterización de resistencia a la licuación

Características	Tipo de ensayo			
	SPT	CPT	V ₁	BPT
Número de mediciones de ensayo en sitios de licuación	Abundante	Abundante	Abundante (**)	Escasos
Tipo de comportamiento esfuerzo-deformación influenciando ensayo	Parcialmente drenado, gran deformación	Drenado, gran deformación	Pequeña deformación	Parcialmente drenado. Gran deformación
Control de calidad y repetibilidad	De pobre a buena	Muy buena	Buena	Pobre
Detección de variabilidad de depósitos de suelo	Buena	Muy buena	Aceptable	Aceptable
Tipos de suelo en los que el ensayo se recomienda	No gravoso	No gravoso	Todos	Principalmente gravas
Ensayo provee muestra de suelo	Sí	No (*)	No	No
Ensayo mide propiedad índice o ingenieril	Índice	Índice	Ingenieril	Índice

Notas: Adaptado de Youd e Idriss (1997), actualizado por Kavazanjian et al. (2022)

(*): En la actualidad, existen equipos de CPT que permiten la obtención de muestras de suelos para la evaluación de propiedades índice.

(**): Tras Kayen et al. (2013)

Esta publicación incluye la correlación del $(N_1)_{60}$ del SPT con el CRR actualmente presentada en la NTE E.050. La propuesta involucra, en primer lugar, la sección de la curva correspondiente a valores de $(N_1)_{60}$ bajos, que ahora pasa por un valor de CRR de aproximadamente 0.05. Anteriormente, se habría propuesto que este segmento pase por el origen (Seed e Idriss, 1982). Estos ajustes toman en cuenta información de ensayos CPT y análisis probabilísticos de Liao et al. (1988).

Adicionalmente, se propone una corrección adicional al valor de N de SPT por contenido de finos. La corrección sigue la siguiente forma:

Dicha corrección busca ajustar la resistencia a la penetración estándar de una arena con finos al de una arena limpia

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

Donde α y β son determinados de la siguiente manera:

$\alpha=0$ para $FC \leq 5\%$
 $\alpha=\exp[1.76-(190/FC)^2]$ para $5\% < FC < 35\%$
 $\alpha=5.0$ para $FC \geq 35\%$

$\beta=1$ para $FC \leq 5\%$
 $\beta=[0.99+(FC^{1.5}/1000)]$ para $5\% < FC < 35\%$
 $\beta=1.2$ para $FC \geq 35\%$

Donde FC refiere al porcentaje de finos obtenidos mediante ensayos granulométricos de muestras en laboratorio.

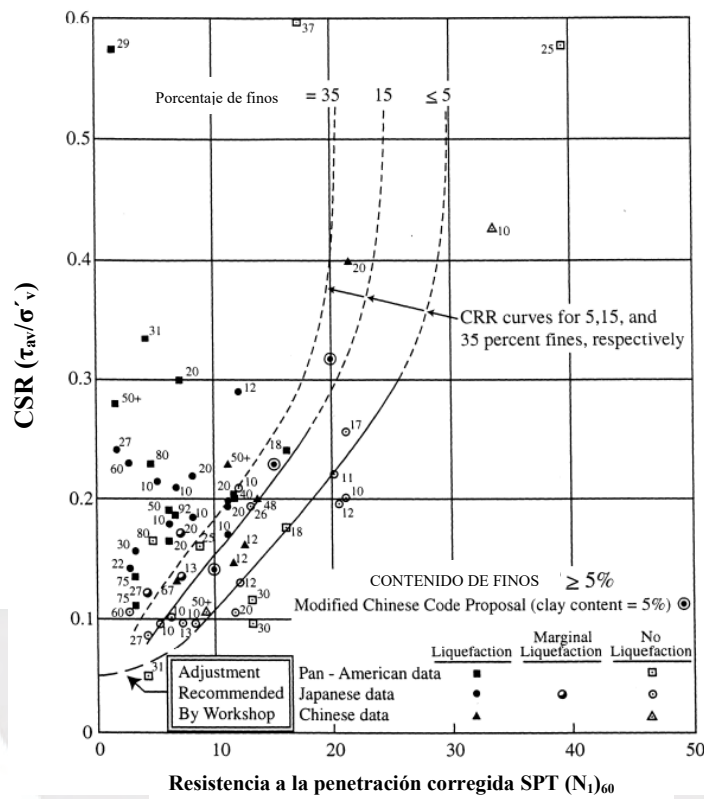


Figura 19. Correlación entre el CRR y (N_1)₆₀. Originalmente de Seed et al. (1985), ligera modificación por Robertson y Wride para la publicación del NCEER (1997). Actualmente usada en la NTE E.050.

Para la curva base (%<#200 menor a 5%) se plantea la siguiente ecuación (Fugro West Inc.), útil para su uso en hojas de cálculo para cálculos ingenieriles:

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

Donde:

$$x = (N_1)_{60}$$

$$a = 0.048, b = -0.1248, c = -0.004721$$

$$d = 0.009578, e = 0.0006136, f = -0.0003285$$

$$g = -1.673E - 05, h = 3.714E - 06$$

Asimismo, en esta publicación se incluye correlaciones de CRR basadas en la medición de velocidad de ondas de corte (V_s), que se mencionarán más a detalle en 2.4.6.

Seed et al. (2003), en su reporte realizado para el EERC, presentan los avances más recientes para el método simplificado. Se referencia el r_d de Cetin (2000) (referenciado en la E.050), las diferentes técnicas de mitigación de licuación y una correlación N-CRR probabilística nueva. Se presentan curvas de potencial de deformación de corte y deformaciones de reconsolidación volumétrica en función a $N_{1,60}$ y CSR, así como las distintas formas de estimar la resistencia a la penetración en suelos gravosos.

Aquí concluye la historia de la metodología conocida como “método simplificado”, en cuanto a lo referido para uso práctico por la Norma E.050., que básicamente consiste en comparar el esfuerzo medio inducido por un sismo (CSR) con el esfuerzo resistente del suelo (CRR), a través de un perfil. En el caso de este último, se ha podido ver que se han propuesto varias expresiones, dependiendo en un principio del tamaño D_{50} y la densidad relativa para un ajuste basado en una muestra reducida de arenas finas (Seed e Idriss, 1971), hasta las expresiones más recientes, basadas en conjuntos de datos inmensamente más amplios, y basadas en parámetros de ensayos in situ como SPT, CPT y aquellos que permiten obtener V_s . Son estas expresiones más recientes las que permiten obtener evaluaciones probabilísticas mediante métodos más avanzados para su planteamiento, como la regresión bayesiana. Así, se unifica el proceso de evaluación de la licuación mediante una expresión única, adecuada para uso en hojas de cálculo.

2.4.3 Índices de potencial de licuación

Los índices de potencial de licuación sirven para caracterizar de forma simple a un sitio de estudio, su riesgo de licuación y, en índices más recientes, el efecto de la manifestación

superficial de la licuación. Su uso contribuye a la elaboración de mapas de riesgo de fácil uso ingenieril.

2.4.3.1 Índice de potencial de licuación (LPI)

Lo propuesto por Iwasaki (1984), actualización de Iwasaki et al. (1977), constituye una bifurcación frente a lo visto en los anteriores párrafos, lo cual es todo derivado del método original de Seed e Idriss (1971). En sí, el método de Iwasaki contiene dos conceptos a los que corresponden dos términos distintos: Factor de resistencia a la licuación (F_L , comparable a FS), el cual representa la resistencia a la licuación de un suelo a una profundidad arbitraria (además, puede evaluar razonablemente los efectos de dicha licuación); y el índice de potencial de licuación (I_L , también referido en la literatura como LPI), que estima la severidad de la licuación ocurrida en el sitio que es objeto de estudio (Iwasaki, Arakawa, & Tokida, 1984). Este último método de por sí incluye una proposición interesante de la que carece el método original de Seed e Idriss: la posibilidad de cuantificar (así sea de una manera muy general) los efectos de la ocurrencia de la licuación ocurrida. Esta posibilidad sumada a lo práctico de su uso sugiere que resulta conveniente utilizar el método de Iwasaki como complementario al método simplificado. A continuación, se presenta el planteamiento de la metodología presentada por Iwasaki (1984). Se define el factor de resistencia a la licuación (F_L) como la capacidad de resistir la licuación de un elemento de suelo a una

profundidad arbitraria: $F_L = \frac{R}{L}$

Donde:

R: resistencia in situ a esfuerzos cíclicos durante terremotos (comparable a CRR) y se halla en base a:

$$0.04mm \leq D_{50} \leq 0.6mm$$

$$R = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} + 0.225 \log_{10} \frac{0.35}{D_{50}}$$

$$0.6mm \leq D_{50} \leq 1.5mm$$

$$R = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} - 0.05$$

L: la carga cíclica inducida por el terremoto (comparable a CSR)

$$L = \frac{\tau_{\max}}{\sigma'_v} = \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d$$

Para r_d , Iwasaki et al. (1984) proponen.: $r_d = 1 - 0.015z$, para lo cual z es la profundidad en metros.

Se define el segundo término de importancia, el Índice de potencial de licuación (I_L), el cual

se define como un estimador de la severidad de licuación: $I_L = \int_0^{20} F \cdot W(z) dz$

Donde:

$$F(z) = 0, \text{ para } F_L > 1$$

$$F(z) = 1 - F_L, \text{ para } F_L < 1$$

$W(Z) = 10 - 0.5z$, representa la función de ponderación o peso por profundidad.

La Figura 20 ilustra la integración de F_L :

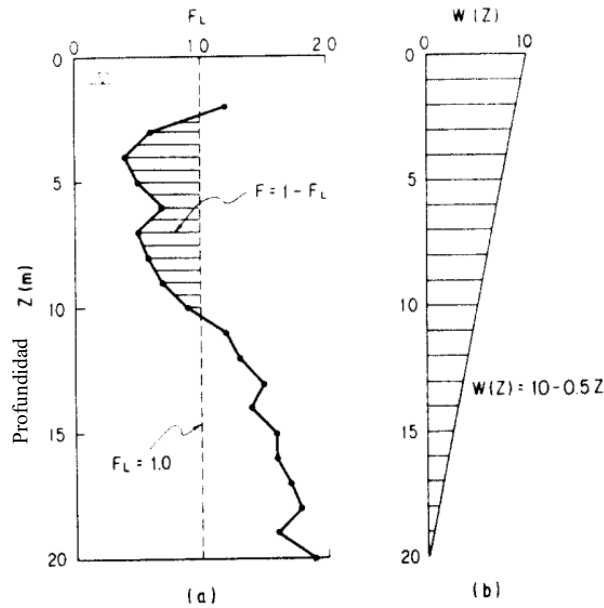


Figura 20. Integración de F_L . Adaptado de Iwasaki et al. (1984)

Iwasaki et al. (1984) presentan la clasificación de acuerdo a I_L , actualizada por Sonmez (2003). A su vez, este realiza una modificación sobre el cálculo de $F(z)$ para tomar en cuenta estas diferencias:

$$F(z) = 0, \text{ para } F_L > 1.2$$

$$F(z) = 2 \times 10^6 e^{-18.427 F_L}, \text{ para } 1.2 > F_L > 0.95$$

$$F(z) = 1 - F_L, \text{ para } F_L < 0.95$$

Tabla 6. Clasificación de Índice de Potencial de Licuación

Índice de potencial de licuación (I_L)	Riesgo de licuación
0	Muy bajo
$0 < I_L < 5$	Bajo
$5 < I_L < 15$	Alto
$15 < I_L$	Muy alto

Nota: Adaptado de Iwasaki et al. (1984)

Tabla 7. Clasificación de Índice de Potencial de Licuación (Sonmez, 2003)

Índice de potencial de licuación (I_L)	Riesgo de licuación
0	No hay licuación ($F_L > 1.2$)
$0 < I_L < 2$	Bajo

$2 < I_L < 5$	Moderado
$5 < I_L < 15$	Alto
$15 < I_L$	Muy alto

Nota: Adaptado de Sonmez (2003)

2.4.3.2 Índice de severidad a la licuación (LSI)

Sonmez y Gokceoglu (2005) presentan un índice basado en el índice de potencial de licuación, actualizado en base a algunas observaciones hechas en torno a los desarrollos probabilísticos por Chen y Juang (2000) y Juang et al. (2003). Este nuevo índice se denomina *Liquefaction Severity Index* (L_S o LSI), y se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$LSI = \int_0^{20 \text{ m}} P_L(z)(10 - 0.5z) dz$$

Donde:

P_L : probabilidad de licuación. Según el estudio probabilístico de Juang et al. (2003), se expresa mediante la siguiente expresión:

$$P_L = \frac{1}{1 + (F_L/0.96)^{4.5}}$$

La clasificación de severidad de licuación sugerida por Sonmez y Gokceoglu (2005) se presenta en la Tabla 8:

Tabla 8. Clasificación de severidad de licuación L_s

L_s	Descripción
0	No hay licuación
$0 < L_s < 15$	Muy baja
$15 < L_s < 35$	Baja
$35 < L_s < 65$	Moderada
$65 < L_s < 85$	Alta
$85 < L_s < 100$	Muy alta

Fuente: Sonmez y Gokceoglu (2005)

2.4.3.3 Número de severidad de licuación (LSN)

Desarrollado por Van Ballegooy et al. (2014), a partir de los datos de los terremotos de Christchurch, con el objetivo de incluir en su planteamiento la influencia del espesor de la capa no licuable, concepto planteado por Ishihara (1985). Es calculado como la suma de las deformaciones volumétricas de reconsolidación tras la licuación. Se presenta la siguiente

ecuación: $LSN = 1000 \int \frac{\varepsilon_v}{z} dz$ o

$$LSN = \int_0^{20m} \varepsilon_v \cdot w(z) dz$$

Donde:

ε_v : Deformación volumétrica de reconsolidación posterior a la licuación (%)

$w(z)$: $10 \cdot z^{-1}$

LSN va desde 0 (no vulnerabilidad a la licuación) hasta ∞ (vulnerabilidad extrema), aunque rara vez excede 100.

Los valores de ε_v se obtienen de dos ábacos incluidos en Zhang et al. (2002). En el primer ábaco, mostrado a continuación en la Figura 21, se requiere de la densidad relativa D_r y del FS_L para su obtención. En el segundo ábaco (Figura 22), se requiere la resistencia de punta por CPT equivalente para arenas limpias $(q_{c1N})_{CS}$ y el FS_L .

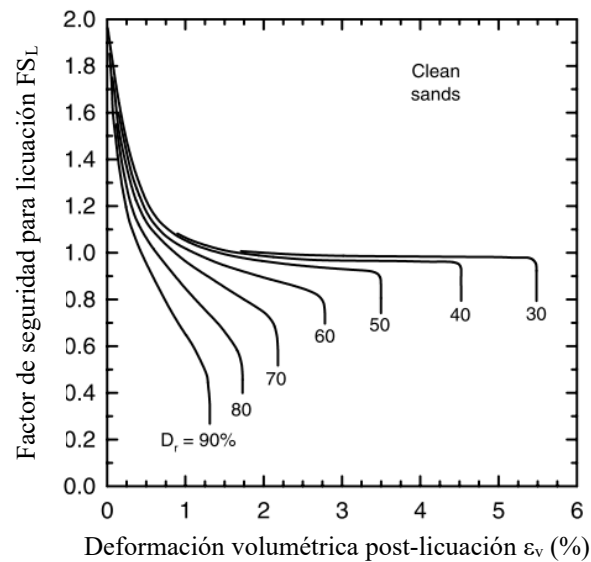


Figura 21. Curvas para estimar la deformación volumétrica de reconsolidación post-licuación para arenas limpias (Zhang et al., 2002)

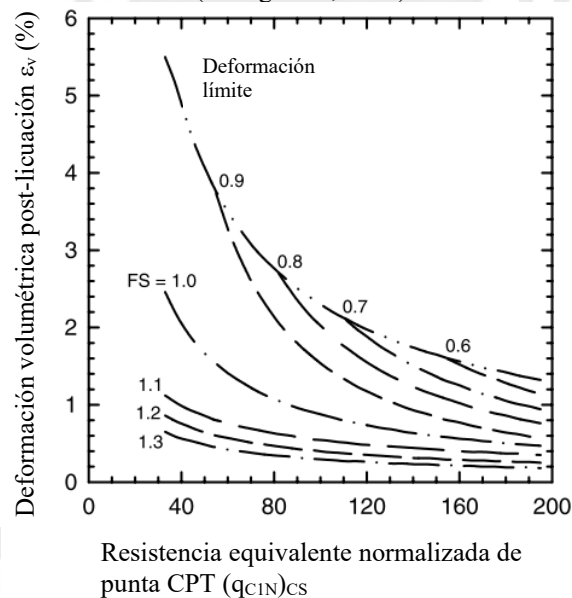


Figura 22. Relación entre ϵ_v y resistencia de punta normalizada para arenas limpias de CPT (Zhang et al., 2002)

Si bien resulta conveniente la opción de obtener la deformación ϵ_v por dos métodos diferentes, que se acomodan al menos a la evaluación de licuación usando los parámetros provenientes del SPT y del CPT, respectivamente; existe la desventaja de no contener ecuaciones matemáticas para su uso práctico en hojas de cálculo. Además, la primera de las curvas es solo aplicable para arenas limpias. De querer obtener ϵ_v para un suelo con porción

finalmente, se debe usar el parámetro $(q_{c1N})_{CS}$ del ensayo CPT. De haberse usado SPT, se tendría que proceder a utilizar una correlación, de igual modo que con ensayos que obtengan de parámetro la velocidad de ondas de corte V_s . Esto constituye un procedimiento con varios procesos arbitrarios (sin convención o procedimiento estándar) y enteramente basados en el criterio del profesional responsable que resultan a su vez difíciles de plasmar en una normativa que priorice tanto la practicidad como la confiabilidad en sus métodos. Las incertidumbres pueden componerse debido a lo indirecto del cálculo realizado.

2.4.3.4 Índice inspirado en Ishihara (LPI-ISH)

Otro índice desarrollado en base al I_L de Iwasaki et al. (1984) es el *Ishihara Inspired Index* (LPI-ISH) (Rateria y Maurer, 2022), y como indica su nombre, está también basado en el concepto de Ishihara (1985). Este nuevo índice parte de la obtención de resultados inconsistentes obtenidos con la evaluación de I_L . En la Figura 23 se presenta un mapa de Christchurch, donde se evaluó el I_L tras la secuencia de terremotos 2010-2011 y se comparó la estimación de I_L con los resultados de campo. Se puede apreciar que en una larga extensión del territorio evaluado los resultados de I_L muestran una sobre estimación excesiva.

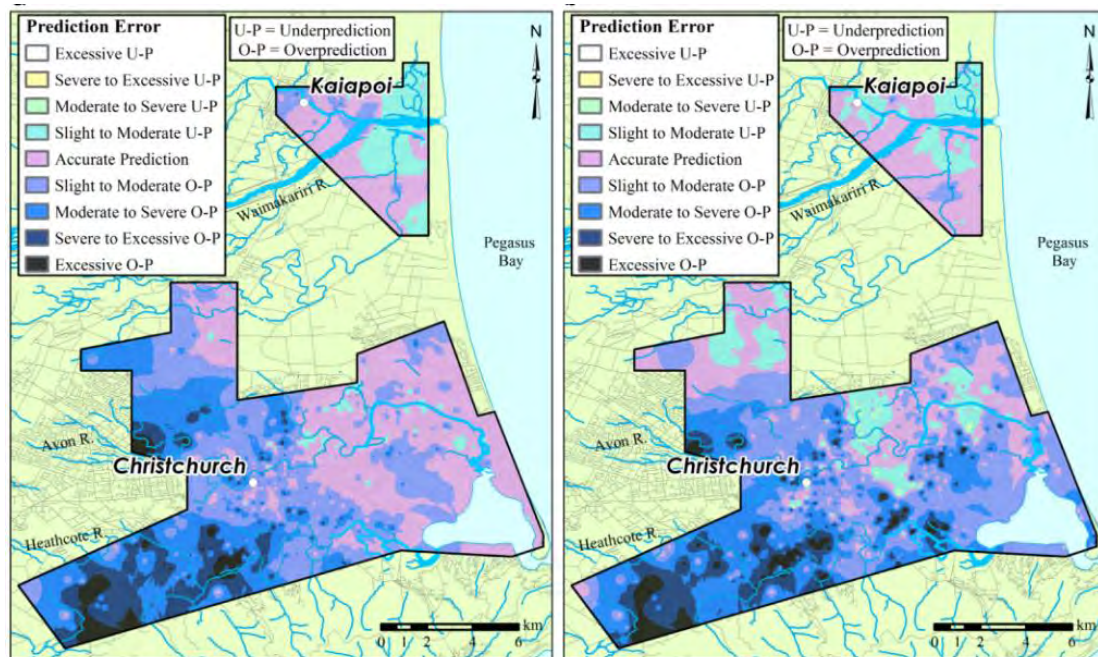


Figura 23. Errores de predicción por I_L (Iwasaki et al., 1984) tras la secuencia de terremotos de Canterbury 2010-2011. Izquierda: Darfield (Mw=7.1), derecha: Christchurch (Mw=6.2) (Maurer, Green y Taylor, 2015)

El nuevo índice propuesto complementa el I_L tomando en cuenta los conocimientos obtenidos por la investigación de Ishihara (1985), en particular, las curvas de límite (*boundary curves*). Tomando en cuenta las características de los estratos no licuables, se presenta un índice más completo. A continuación, se presenta la ecuación correspondiente a LPI-ISH:

$$LPI_{ISH} = \int_{H_1}^{20m} F(FS) \frac{25.56}{z} dz$$

$$F(FS) = \{1 - FS, si FS \leq 1 \cap H_1 x m(FS) \leq 3\}, si.no, F(FS) = 0$$

$$m(FS) = \exp\left(\frac{5}{25.56x(1-FS)}\right) - 1$$

Donde:

H_1 : Espesor de estrato superior no licuable (m). Se recomienda: $H_1 > 0.4$ m (Maurer et al., 2015)

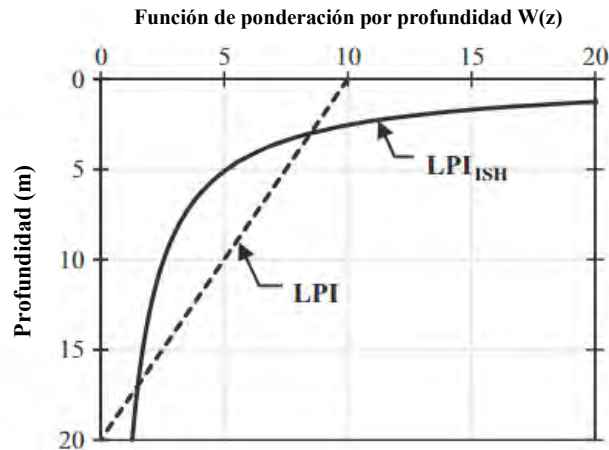


Figura 24. Comparación de función de peso $W(z)$ entre LPI de Iwasaki y LPI-ISH. Se puede apreciar cómo el nuevo $W(z)$ asigna un peso muy considerable a los primeros 3 metros de profundidad (Maurer et al., 2015)

2.4.4 Modelo de manifestación superficial de Ishihara (1985)

Es necesario incidir en el concepto de las curvas de límite (*boundary curves*) propuestas por Ishihara (1985). Este concepto se basa en la manifestación de la licuación del suelo en la superficie. A la profundidad crítica, aquella más profunda en donde ocurre la licuación, se idealiza una división en dos estratos: una capa superior que no licúa (H_1) y la capa inferior, que licúa (H_2). Ishihara (1985) estudia la relación entre el espesor de cada una de las capas y la expresión en la superficie mencionada. Dicha manifestación está caracterizada por agrietamiento de la superficie, eyección de conos de arena y asentamientos. La interpretación de este concepto se puede expresar de la siguiente forma: para una determinada aceleración máxima del suelo, existe un valor de H_1 al que le corresponderá un valor límite de H_2 . Si H_2 excede este valor límite, los efectos de la licuación se verán reflejados en daño en la superficie.

Cabe mencionar que Kayen et al. (1992) sugieren que cuando se presenta esta disposición del suelo en el que una capa de suelo rígido está sobre un suelo blando o suelto (denominada “inversión de impedancia”) se puede presentar amplificaciones de movimiento en la base de la capa rígida, lo que pone en cuestión el uso del procedimiento simplificado en

este tipo de situaciones. De darse esta condición, se recomienda un análisis de respuesta de sitio sobre el uso de coeficientes de reducción (r_d).

En un principio, la relación H_1 - H_2 se presenta en una sola curva, basada en terremotos que causaron una aceleración máxima del suelo de 0.2g. Esta curva se presenta en la Figura 25. A continuación, Ishihara (1985) desarrolla otra curva basada en la interpretación de la información de Gao et al. (1983) del terremoto de Tangshan de 1976, de 0.4 a 0.5g. Finalmente, mediante una interpolación simple se presenta una curva para un PGA de 0.3g. El resultado se presenta en la Figura 26.

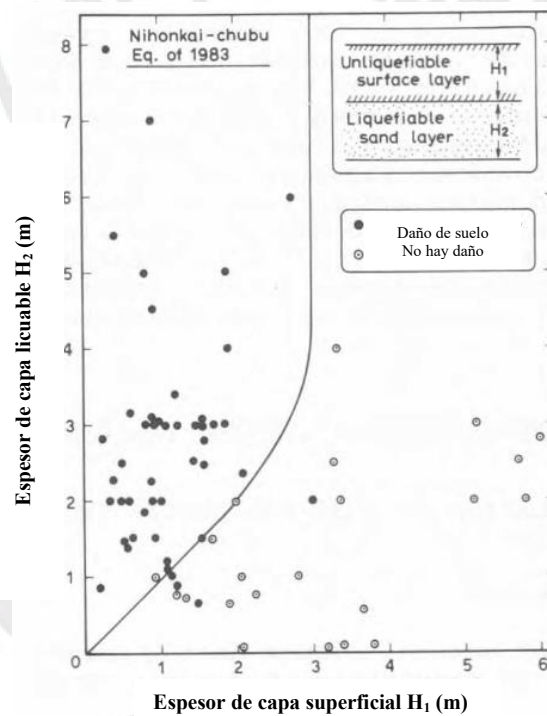


Figura 25. Condiciones de estratificación de suelo para la expresión de daño por licuación en la superficie, una sola curva (Ishihara, 1985)

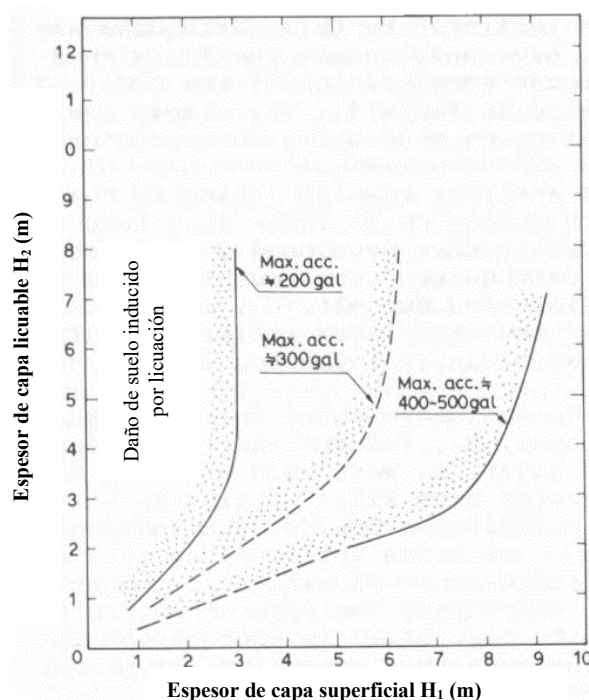


Figura 26. Relaciones H_1 - H_2 para la expresión de licuación en la superficie, tres curvas (Ishihara, 1985)

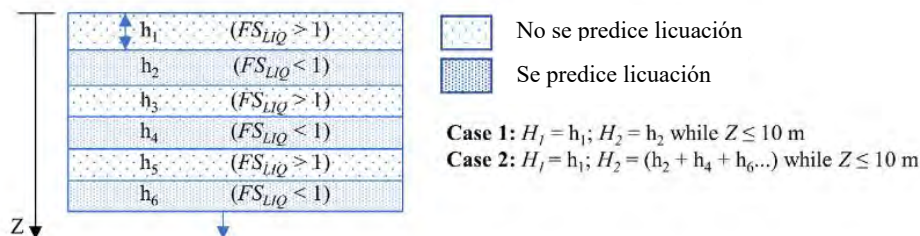
En el transcurso de los años a partir de Ishihara (1985), se plantearon índices relacionados, como el ya mencionado LSI, LSN y más recientemente el LPI-ISH. Sin embargo, no se había realizado alguna actualización sobre el modelo H_1 - H_2 que abarque sus limitaciones. Lo más cercano a esto había sido un informe por Youd y Garris (1995), quienes validaron el modelo de Ishihara, afirmando lo planteado, pero descartando su uso para sitios susceptibles a expansión lateral y oscilación de suelo.

Rateria y Maurer (2022) proponen una revisión rigurosa con fin de actualizar el criterio de Ishihara (1985). Para este fin, se tiene un conjunto de datos mucho más amplio, como el uso de métodos *machine-learning* (ML) y *deep-learning* (DL) para su desarrollo. El nuevo conjunto de datos integra el aporte de Geyin et al. (2020, 2021), el cual compila información basada en CPT, principalmente de terremotos en Nueva Zelanda. La comparación entre los datos y métodos usados por Rateria y Maurer (2022) e Ishihara (1985) para el modelo H_1 - H_2 se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 9. Resumen de la actualización del modelo H_1 - H_2 de Ishihara (Rateria y Maurer, 2022)

	Ishihara (1985)	Rateria y Maurer (2022)
Conjunto de datos	300	14400
Número de terremotos	2	24
Ensayo de conjunto de datos	SPT	CPT (*)
Solución	Gráfica	Analítica, con ecuación
#soluciones	1	4 (Bilineal, potencia, DL y ML)

A su vez, Rateria y Maurer (2022) cuestionan el concepto de H_2 presentado por Ishihara. El cuestionamiento parte de la ambigüedad de su planteamiento. Ante suelos donde hay una capa que no licúa, a la que le sigue una capa que sí lo hace, se entiende claramente que H_2 representa la capa inferior. Sin embargo, de haber múltiples estratos que licúan bajo H_1 (intercalados), el término se hace ambiguo. Se nota que los sitios de estudio en los que Ishihara planteó el modelo H_1 - H_2 concuerdan generalmente con el primer criterio, de los cuales solo se halló un estrato licuable. Esto constituye una limitación del modelo original para la evaluación de suelos con múltiples estratos licuables intercalados. En la siguiente Figura se presentan las dos definiciones de H_2 .

Figura 27. Definiciones alternativas de H_2 (Rateria y Maurer, 2022)

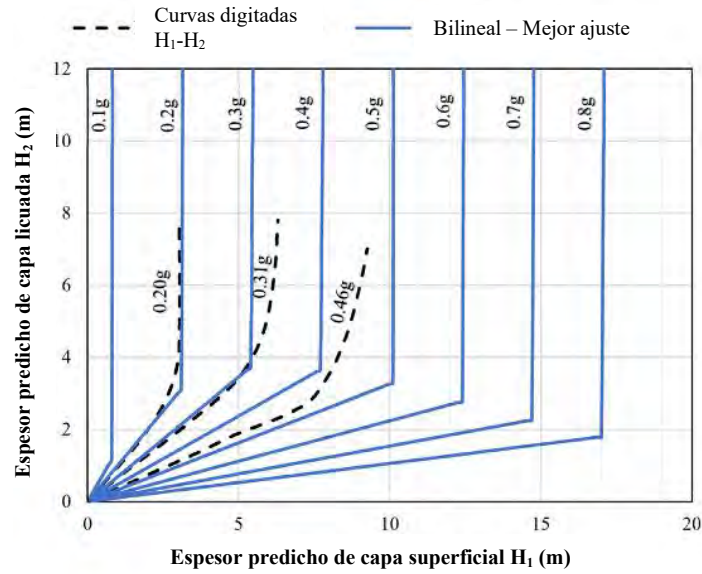


Figura 28. Ajuste bilineal propuesto por Rateria y Maurer (2022) para el modelo de Ishihara (1985)

Comparaciones fueron realizadas entre las cuatro modalidades de la actualización del modelo H_1 - H_2 , el original de Ishihara (1985) y algunos índices (como LPI, LPI-ISH y LSN) para evaluar su precisión en base a falsos positivos o falsos negativos. Los resultados van desde 0.5, equivalente a una conjetura aleatoria hasta 1, el cual representaría un modelo perfecto, presentados en la Figura 29. Estos resultados sugieren que el modelo actualizado es generalmente más preciso que el original. En promedio, el modelo más preciso es el DL, con una precisión de 0.83. En el caso de perfiles con solo un estrato licuable, el ML obtiene una precisión de casi 0.9. En las comparaciones realizadas para múltiples estratos licuales intercalados, cada uno de los modelos presenta un rendimiento reducido, siendo el menor el del modelo original con aproximadamente 0.7. Esto significa que una estimación de este modelo para múltiples estratos licuales se aproxima más a una conjetura aleatoria que a un modelo perfecto.

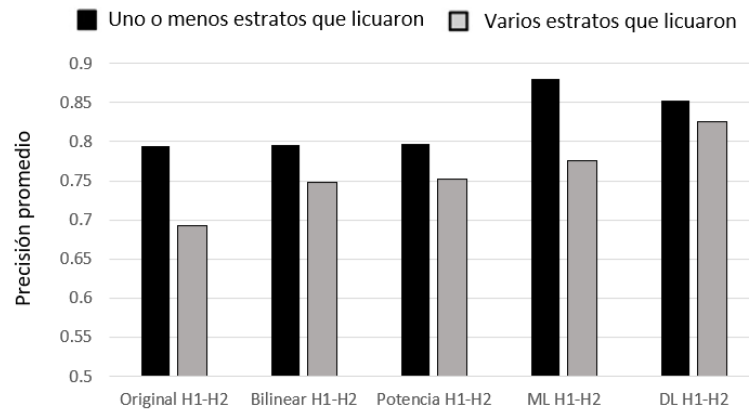


Figura 29. Resultados de precisión promedio para modelos H_1-H_2 , para uno y múltiples estratos licuables. Adaptado de Rateria y Maurer (2022)

Aun así, es remarcable que, a pesar del reducido conjunto de datos y simplificaciones considerados por Ishihara (1985), se obtiene un modelo razonablemente preciso. Al menos se le puede considerar como uno para aquellos perfiles con un solo estrato licuable.

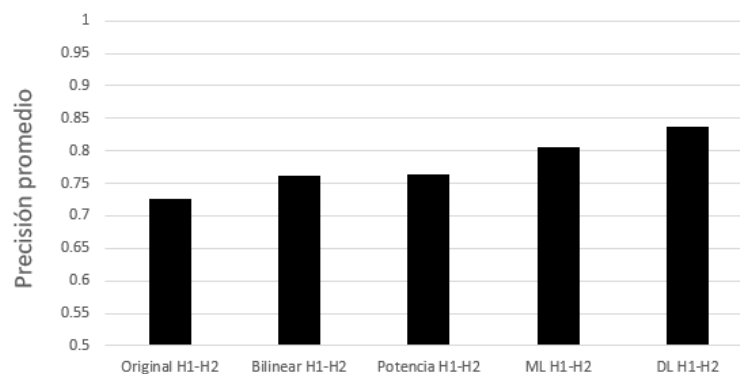


Figura 30. Resultados de precisión promedio de mediciones para modelos H_1-H_2 generales. Adaptado de Rateria y Maurer (2022)

2.4.5 Evaluación de la licuación en suelos finos: degradación cíclica

2.4.5.1 El Criterio chino

Criterio ampliamente usado desde fines de la década de los 70's. Se basa en el trabajo de Wang (1979), el cual consiste en tres condiciones que el suelo con contenido considerable de finos debe cumplir para considerarse susceptible a la licuación. Estos son:

- Que el %<#200 sea menor de 15%.

- Que la relación w/LL (cociente entre la humedad natural y el límite líquido) sea mayor a 0.9.
- Que el límite líquido (LL) sea menor a 35.

Si un suelo cumple con estas características y se sitúa sobre la línea A en la tabla de plasticidad (Figura 31), la manera más apropiada de determinar sus parámetros de carga cíclica (su resistencia a la licuación) será por ensayo de laboratorio. De no ser esta la situación, simplemente se considerará como un suelo no vulnerable a la licuación.

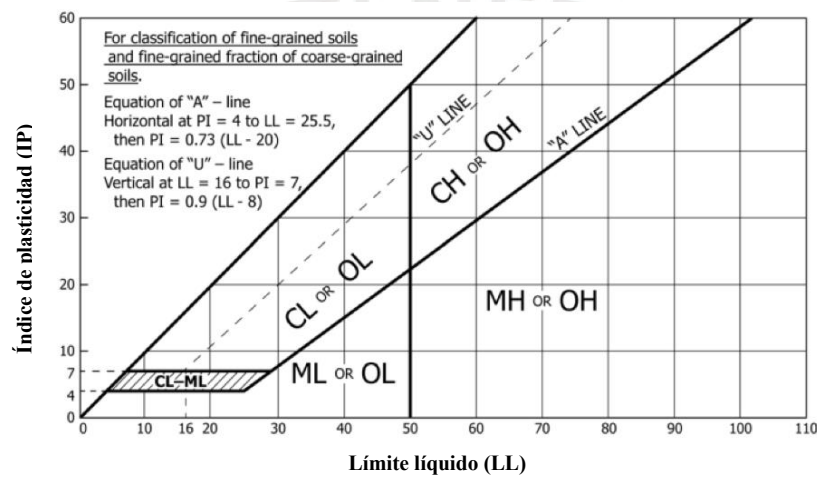


Figura 31. Carta de plasticidad (Casagrande, 1932)

Seed e Idriss (1982) recogen este criterio y lo integran en su propio marco teórico, considerando que el suelo solo será considerado como licuable si se cumplen los tres requisitos simultáneamente. A su vez, se establecen un límite para el N de un suelo susceptible a licuación:

$$N_{crit} = \bar{N} [1 + 0.125(d_s - 3) - 0.05(NF - 2) - 0.07FC]$$

Donde:

N_{crit} : Valor de N bajo el cual puede ocurrir licuación

d_s : Profundidad de capa de arena (m)

NF: Profundidad de nivel freático (m)

FC: Contenido de finos (m)

\bar{N} : Función de la intensidad del terremoto, como se muestra:

Escala Mercalli Modificada	\bar{N}
VII	6
VIII	10
IX	16

Numerosas interpretaciones y correcciones se han realizado sobre el criterio chino a través de los años. Por ejemplo, la diferencia en resultados de límite líquido en el ensayo del cono chino y la cuchara de Casagrande han instado a Koester (1992) y a Andrews y Martin (2000) a bajar el límite de $LL < 35$ a $LL < 32$. Estos últimos a su vez han establecido la distinción entre partículas de arcilla y de limo en 0.003 mm, con un porcentaje de menos de 10% en peso de arcilla para que el suelo pueda licuar. A diferencia del criterio original, Andrews y Martin (2000) descartan el criterio de la sensibilidad del suelo arcilloso. Seed et al. (2003) establecen que los suelos con $LL < 37$ y $IP < 12$ son propensos a licuar, mientras que para aquellos con $37 < LL < 47$ y $12 < IP < 20$ se recomienda evaluaciones en base a ensayos de laboratorio y lo propuesto por Sancio (2003).

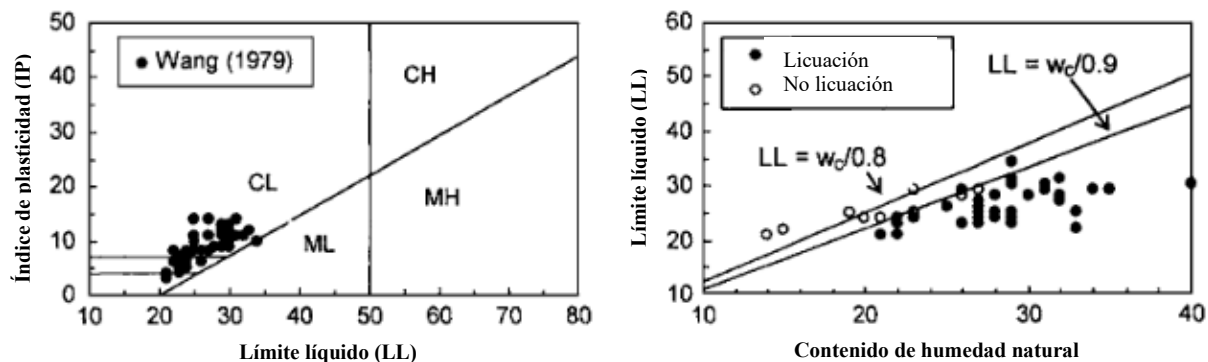


Figura 32. Registros de Wang (1979), previos al criterio chino

A partir de investigaciones más recientes, usualmente resultantes de investigaciones de campo post terremoto, se ha determinado que el criterio chino no es suficientemente fiable y que su uso indiscriminado debe ser evitado. Ante esto, Idriss y Boulanger (1997, 1998 y 2004) recomiendan el uso de ensayos de laboratorio para la correcta evaluación del suelo. El rechazo al uso del criterio chino es reforzado por Bray y Sancio (2006), en el cual descartan todo criterio con discriminador por tamaño de partículas. En este trabajo, se refuerza el uso de la relación entre humedad natural y límite líquido (w/LL) como índice de medición de susceptibilidad a la licuación de un suelo conformado por partículas finas. Valores de esta relación mayores a 0.8 indican que el suelo es susceptible a licuación, en complemento con la plasticidad del suelo (aquellos de baja plasticidad son más susceptibles). Otros factores que influyen en la susceptibilidad a la licuación son la relación de sobre consolidación (*over consolidation ratio* u OCR), la relación de vacíos, la edad geológica del suelo y su mineralogía.

2.4.5.2 Comportamiento de un suelo “tipo-arcilla”

En el trabajo de Idriss y Boulanger (2004), se recomienda la necesidad de clasificar a los suelos a evaluar en “de comportamiento arenoso” (*sand like*) y “de comportamiento arcilloso” (*clay like*), los cuales sufrirán de licuación y degradación cíclica, respectivamente. Los procedimientos para estas estimaciones están separados por las diferencias de

comportamiento del suelo arenoso y arcilloso. En el caso del comportamiento arenoso, el fenómeno de licuación es caracterizado por una pérdida considerable de resistencia del mismo suelo, causado por el aumento de presión de poros en el mismo. Sin embargo, el comportamiento del suelo arcilloso en la licuación se ve caracterizado por su tendencia a dilatar, que, a diferencia de la licuación en el suelo arenoso, limita los asentamientos y efectos generales de este.

Una conclusión de importancia sobre el efecto de la presencia de finos en la resistencia a licuación de un suelo radica en que, a porcentajes bajos (hasta el 20%, aproximadamente), el aumento en finos causa una disminución en la resistencia del suelo a licuar. Sin embargo, cuando la cantidad de finos se aproxima a valores más altos (excediendo tal 20%), ocurre el efecto contrario: la resistencia a licuación aumenta conforme el contenido de finos sea más alto. Es aproximadamente cuando hay suficientes finos como para que el comportamiento del suelo sea gobernado por las arcillas o sea de “tipo arcilla” cuando ocurre este cambio de tendencia (J. Liu, 2020). Según Thevanayagam (1998), este valor es de 25-33%.

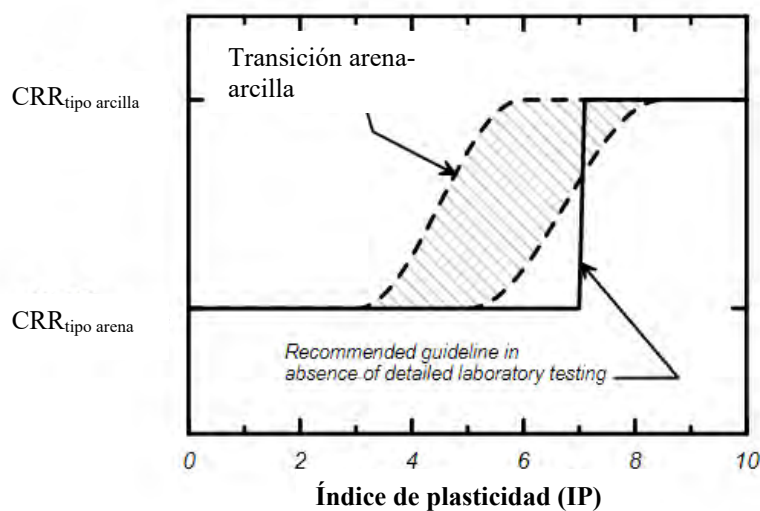


Figura 33. Transición de comportamiento “tipo arena” a “tipo arcilla”, a mayor IP (Boulangier e Idriss, 2004)

En vista de lo explicado, Idriss y Boulanger (2004) proponen medidas para la estimación del CRR en suelos arcillosos. Entre estas medidas, la estimación de la resistencia al corte no drenado (s_u), estimable mediante métodos de campo como el ensayo de la veleta o mediante ensayos de laboratorio resulta la propuesta más conveniente para la estimación del CRR de manera práctica y en el campo ingenieril. A su vez, se puede obtener este parámetro mediante correlaciones, tanto de N- SPT como de CPT, que incluyen a su vez factores como la humedad, índice de plasticidad, entre otros. Como ejemplo, se presenta la correlación de Sivrikaya (2009): $s_u = 4.43 \times (N_1)_{60} - 1.29 \times w_c + 1.06 \times LL + 1.02 \times PI$

Sin embargo, se considera precaución para su uso, debido a la considerable dispersión o incertidumbre en el uso de correlaciones. Para la obtención de s_u mediante el ensayo de veleta se considera un ajuste: $(s_u)_{campo} = \mu(s_u)_{VST}$

Donde μ : factor de corrección para ensayo de veleta (Bjerrum, 1972)

$$\mu = 2.131(1 + IP)^{-0.265}, \text{ ajuste por Kayabali et al. (2015)}$$

Finalmente se estima la resistencia a la licuación para una magnitud M_w de 7.5, en función de s_u y el esfuerzo efectivo: $CRR_{M=7.5} = 0.8 \frac{s_u}{\sigma'_{vc}}$

Para mantener la consistencia de la visión de los autores de este procedimiento, se utiliza los MSF correspondientes para la evaluación del CRR para otras magnitudes M_w . Para arcillas:

$$MSF = 1.12 \exp\left(\frac{-M_w}{4}\right) + 0.828 \quad (\text{Idriss y Boulanger, 2004})$$

$$MSF \leq 1.13$$

2.4.6 Consecuencias de degradación cíclica en suelos finos

El comportamiento de los suelos arcillosos ante la degradación cíclica es análogo al de los suelos arenosos en el sentido de que, al igual que las arenas sueltas, las arcillas blandas y

normalmente consolidadas, con alta humedad y sensibilidad son más susceptibles a sufrir los efectos de deformación más severos. Así, para suelos finos la licuación no debe ser vista necesariamente como un problema grave (Boulanger e Idriss, 2004), sino que se debe estimar las deformaciones causadas por este estado inducido. Boulanger e Idriss (2004) recomiendan estimar las deformaciones por un método tipo Newmark para su uso ingenieril. Por otro lado, se tiene la estimación de resistencia perdida del suelo. Resultados de las arcillas limosas de Anchorage presentan que los valores de s_u caen a menos de 40% de su valor inicial tras el sismo, cuando las deformaciones cíclicas pico excedían a la deformación de falla de un ensayo de compresión simple. Cuando estas deformaciones cíclicas pico se mantienen a menos de la mitad de la deformación de rotura mencionada, el s_u no baja del 90% del inicial. El factor de seguridad de lo propuesto por Boulanger e Idriss (2004) corresponde a una deformación de corte del 3%. Una vez pasado ese límite, se observaron deformaciones considerables.

2.4.7 Evaluación de la licuación por métodos geofísicos

A través de los años, se ha contemplado la posibilidad de realizar evaluaciones de licuación en suelos a partir de métodos geofísicos. Las ventajas de realizar esto son varias, puesto que el uso de los equipos como geófonos puede resultar más económico (dependiendo de las características de la investigación geotécnica, el traslado de los equipos, entre otros) y contar con mayor capacidad de muestreo por área frente a las barras y martillo SPT. En este ensayo en particular, se debe muestrear con un espaciado determinado, lo que lo hace de medición discontinua, lo que puede presentar inconveniente en algunos suelos de varios estratos. Seed et al. (1983) proponen una correlación aproximada entre el N- SPT corregido y la velocidad de ondas de corte V_s , basado en conceptos de deformaciones y el módulo de corte G , hasta una profundidad aproximada de 15 metros. La relación en particular es la siguiente: $V_s \approx 200\sqrt{N_1}$ Dicha correlación sería adaptada a las curvas propuestas en la Figura

18, obteniéndose así la primera evaluación de resistencia a la licuación en base a la velocidad de ondas de corte.

En los años siguientes, más correlaciones serían propuestas (Stokoe et al., 1988; Tokimatsu et al., 1991; Robertson et al., 1992; Kayen et al., 1992; Lodge, 1994; Andrus, 1994), a partir de información de sitios de licuación para diferentes perfiles de suelo y con una más amplia comprensión de la naturaleza de la estimación de la velocidad de ondas de corte y su relación con las propiedades del suelo. Andrus y Stokoe (1997) propusieron curvas de resistencia a la licuación (CRR) probabilísticas en base a la difusión de ondas de corte normalizadas (V_{s1}) bajo la recolección de una gran base de datos de sitios de licuación alrededor del mundo, donde se incluye licuación tanto de arena como de gravas. Donde:

V_{s1} : velocidad de ondas de corte normalizada a un esfuerzo efectivo de confinamiento vertical de 100 kPa. Entonces: $V_{s1} = V_s C_v = V_s \left(\frac{1.02}{\sigma'_0} \right)^{0.25}$ (esfuerzo efectivo en kg/cm^2), $C_v < 1.4$ (similar a la aplicación de C_N para $(N_1)_{60}$)

La correlación presentada por Andrus y Stokoe (1997) incluye la influencia del porcentaje de finos en la resistencia a la licuación, aunque solo como límites.

$$CRR = \left\{ a \left(\frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + b \left(\frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) \right\} MSF$$

Donde: $a=0.022$ (Andrus y Stokoe, 2000)

$$b=2.8 \text{ (Andrus y Stokoe, 2000) } (*)^2$$

V_{s1} : Velocidad de ondas de corte normalizada por esfuerzo de referencia de 100 kPa.

(*) $a=0.03$, $b=0.9$ (Andrus y Stokoe, 1997) Esta correlación es la incluida en el estado del arte del NCEER (Youd et al., 1997)

V_{s1}^* : Velocidad de onda de corte límite, corregida por contenido de finos como se detalla a continuación:

$V_{s1}^*=215$ m/s, para arenas con $FC<5\%$

$V_{s1}^*=215-0.5(FC-5)$ m/s, para arenas con $5\%<FC<35\%$

$V_{s1}^*=200$ m/s, para arenas con limos y $FC>35\%$

A su vez, Andrus y Stokoe (1997, 2000) plantean una corrección para aquellos suelos que se han cementado por su antigüedad. La fórmula antes planteada aplica para suelos de la era Holoceno. Para suelos anteriores:

$$CRR = \left\{ a \left(\frac{K_c V_{s1}}{100} \right)^2 + b \left(\frac{1}{V_{s1}^* - K_c V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) \right\} MSF$$

Donde K_c : Factor de corrección para valores altos de V_{s1} causados por cementación y antigüedad. Para suelos del pleistoceno, se tiene un promedio de 0.6 a 0.8 (Ohta y Goto, 1978; Rollins et al., 1998)

Zhou y Chen (2007) presentaron un estudio de correlaciones entre V_s y CRR para suelos arenosos. Un total de 291 arreglos de datos de 34 tipos de suelos fueron evaluados en ensayos de laboratorio (ensayos triaxiales cíclicos). De esta forma, se obtiene una curva CRR- V_s adecuada para su uso ingenieril. El uso de estudios controlados de laboratorio para la simulación de condiciones sísmicas de campo para la evaluación de criterios de evaluación ha sido validado previamente y ha obtenido resultados favorables (Dobry et al., 1981; De Alba et al., 1984; Tokimatsu y Uchida, 1990; entre otros). Zhou y Chen (2007) plantean una relación proporcional entre CRR y V_{s1} para suelos arenosos, expresada mediante la siguiente fórmula:

$$CRR = r_c \frac{1}{P_a} \left[\frac{k_N \rho}{F(e_{\min})} \right]^2 V_{s1}^4$$

Dónde:

r_c : Factor de corrección de movimiento multidireccional (aprox. De 0.9 a 1.0)

k_N : Pendiente correspondiente a línea N_1 (número de ciclos de carga para causar licuación)

P_a : esfuerzo de confinamiento referencial (100 kPa)

$F(e_{\min})$: Función basada en la relación de vacíos mínima de un suelo. Se expresa:

$$F(e_{\min}) = \frac{1}{(0.3 + 0.7e_{\min}^2)}$$

Los términos que constituyen esta expresión involucran términos que deben ser determinados mediante ensayos estándar, así como k_N , cuya determinación requiere de trabajo de laboratorio. Para esto, Zhou y Chen (2007) proponen una tabla para la determinación de k_N para uso práctico (Tabla 10). Asumiendo estos valores es que se obtiene la representación gráfica de la curva, planteada como un límite inferior (más conservador) y un ajuste promedio. k_{LB} refiere a *low boundary*, o el rango inferior de valores, mientras que k_{BF} hace referencia al mejor ajuste o *best fit*.

Tabla 10. Valores de k_N según N y $\%FC < 200$

Category Fitting k	$FC \leq 5\%$		$5\% < FC < 35\%$		$FC \geq 35\%$		Magnitude M_w
	k_{BF}	k_{LB}	k_{BF}	k_{LB}	k_{BF}	k_{LB}	
$N=26$	1.280	0.932	1.262	0.912	1.326	0.938	8.5
$N=15$	1.387	0.997	1.335	0.959	1.396	0.982	7.5
$N=10$	1.496	1.073	1.429	1.024	1.484	1.042	6.75
$N=5$	1.643	1.173	1.561	1.113	1.628	1.132	6
$N=3$	1.826	1.300	1.719	1.216	1.775	1.225	5.25
R^2	0.724	—	0.571	—	0.193	—	—

Fuente: Zhou y Chen (2007)

Kayen et al. (2013) presentan una curva de evaluación determinística y probabilística a partir de mediciones realizadas alrededor del mundo en la mayoría de puntos donde se ha

reportado históricamente la ocurrencia de licuación. Así, la información que compone la curva es de 422 sitios. Uno de los resultados observados consiste en el refinamiento de la correlación para valores altos de CSR (>0.3) y $V_{s1}(>200$ m/s). En la curva de Andrus y Stokoe (2000), la escasez de datos para ese rango de valores ocasiona que la curva se disperse, en dirección casi vertical. Es entendible que la curva adopte esta forma, pues aquellos suelos con mayores velocidades de propagación de ondas de corte tenderán cada vez más a ser dilatantes en vez de contractivos, comportamiento fundamental detrás de la licuación y sus efectos. Sin embargo, eventos de licuación de suelos con V_{s1} mayores a las asíntotas de la curva de Andrus y Stokoe (1997, 2000) han acontecido, si bien son relativamente raros. Dentro de los 422 casos considerados, solo 23 cumplen con estas características (Kayen et al., 2013). La forma adoptada de la curva para valores altos se asemeja a aquellos propuestos para el SPT y CPT, lo que es consistente. A continuación, se presenta la expresión de la curva probabilística CRR de Kayen et al. (2013):

$$CRR = \exp \left\{ \frac{[(0.0073 \cdot V_{s1})^{2.8011} - 2.6168 \cdot \ln(M_w) - 0.0099 \cdot \ln(\sigma'_{vo}) + 0.0028 \cdot FC - 0.4809 \cdot \Phi^{-1}(P_L)]}{1.946} \right\}$$

Donde:

FC: Contenido de finos (%)

$\Phi(x)$: Función acumulativa de distribución normal. En este caso, basada en el potencial de licuación (P_L). Se calcula con la siguiente función:

$$\Phi(x) = P(Z \leq x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

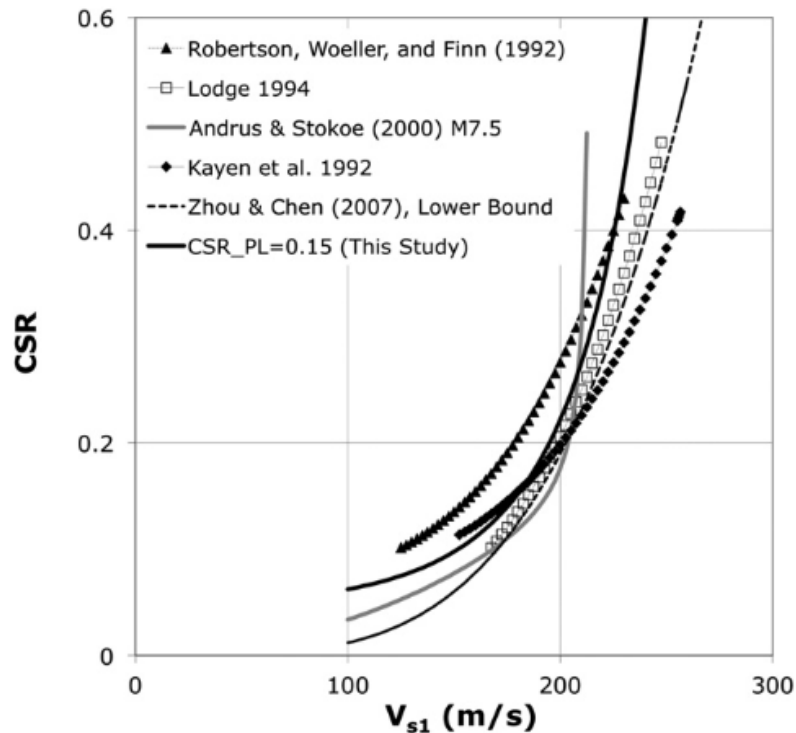


Figura 34. Comparación de varias curvas de resistencia a licuación V_{s1} -CRR. En línea negra continua Kayen et al. (2013)

A pesar de los avances presentados, la prospección geofísica no intrusiva sigue contando con ciertas limitaciones. Al ser no intrusivo, no es posible obtener muestras que permitan caracterizar al suelo en estratos, por lo que las variaciones en la mixtura arena-grava y su efecto en la resistencia a licuación no están incluidos. En casos en los cuales la mixtura de partículas del suelo varía constantemente, el uso de las correlaciones presentadas anteriormente se vuelve incierto (por ejemplo, un suelo en el que la mixtura en un estrato es de 60% gravas y 40% arenas, y 60% arenas con 40% de gravas en el siguiente), puesto que podría existir alternación entre estratos gravosos y de arena, a los cuales les corresponde una correlación de resistencia CRR diferente entre ellos si es que se quiere obtener un resultado confiable. Xia et al. (2024) presentan un modelo basado en simulaciones computacionales DEM (véase 2.4.14.2) que permite caracterizar la variación de la mixtura grava-arena conforme a la variación del contenido de partículas gruesas. Este modelo constituye un

avance notable respecto a la limitación mencionada; sin embargo, hace falta mayor esfuerzo para su integración en la práctica ingenieril.

2.4.8 Comparación teórica y limitaciones de la evaluación de licuación por ensayo SPT y por métodos geofísicos

Los ensayos geofísicos a partir de los cuales se halla la velocidad de propagación de las ondas de corte V_S en suelos evalúan el paso de las ondas a través de ellos cuando experimentan deformaciones de corte ínfimas, del orden de $10^{-4}\%$ - $10^{-3}\%$. Según los estudios de Tatsuoka (1994), la respuesta de un suelo arenoso para este nivel de deformaciones es razonablemente lineal, lo que se asocia al rango elástico. Por su parte, la ocurrencia del fenómeno de licuación ocasiona deformaciones considerables en arenas, por lo que entra en comportamiento elasto-plástico. Esto no va en concordancia con la premisa en la que se basan los ensayos geofísicos. En el nivel de deformación con los que la medición de V_S se asocia, el efecto de deformación volumétrica (a deformación por corte aproximada de $10^{-2}\%$) o efectos de variación de rigidez del suelo por reacomodo de partículas todavía no se presentan. En particular, el efecto de deformación volumétrica está asociado con la contracción o expansión del suelo, el cual es uno de los mecanismos fundamentales detrás del fenómeno de licuación.

Asimismo, la medición de velocidad de ondas de corte V_S captura modestamente los siguientes factores que influyen en la resistencia a licuación: estructura de suelo, edad, sobre consolidación, deformaciones y movimientos previos al sismo (Verdugo, 2016). En especial, V_S es poco sensible frente a la relación de sobre consolidación (OCR), y se correlaciona linealmente con la relación de vacíos e , sin tomar en cuenta los límites máximo y mínimo de esta. Resultados experimentales sobre la medición de V_S indican que esta está fuertemente correlacionada con el esfuerzo asociado a la dirección de propagación de las ondas, pero no es sensible ante el esfuerzo principal perpendicular (a menudo, el esfuerzo horizontal sobre el

suelo), el cual también es un factor significativo en la resistencia a la licuación del suelo. Es importante tomar en cuenta estas limitaciones para la utilización de ensayos geofísicos en la práctica ingenieril.

Sin ser carente de incertidumbres, el ensayo SPT cuenta con un rango de estudios más amplio, resultado de su utilización a través de todo el mundo. De tal modo, existen varias correcciones para su aplicación y las curvas desarrolladas para evaluar la licuación más calibradas y para distintos suelos. Las correcciones desarrolladas contemplan el efecto de aquellos factores que la medición de ondas de corte descuida, como lo es por ejemplo la sobre consolidación del suelo (Skempton, 1986). Además, resultados experimentales han demostrado que $(N_1)_{60}$ está fuertemente correlacionado con la historia de esfuerzos y la densidad relativa del suelo.

El principal punto que puede alterar la fiabilidad de la estimación del ensayo SPT que no está contemplado es la velocidad de ensayo. Aquellos SPT realizados a alta velocidad (usualmente con equipos mecánicos) inducen al suelo a desarrollar toda su resistencia al corte en modo no drenado, de tal modo que la presión intersticial se incrementa. En cambio, realizar el ensayo SPT de manera lenta otorga al suelo que recibe la energía la posibilidad de drenar (Verdugo, 2016). De este modo, incluso con el correcto uso de las correcciones, es posible obtener rangos de valores distintos de SPT en un mismo sitio. Esta inconsistencia debe ser considerada para mejorar la confiabilidad del ensayo SPT en general; y particularmente, para la estimación de la licuación. Adicionalmente, un mal manejo u operación de la perforación del sitio puede afectar sustancialmente los resultados obtenidos.

2.4.9 Licuación en suelos gravosos

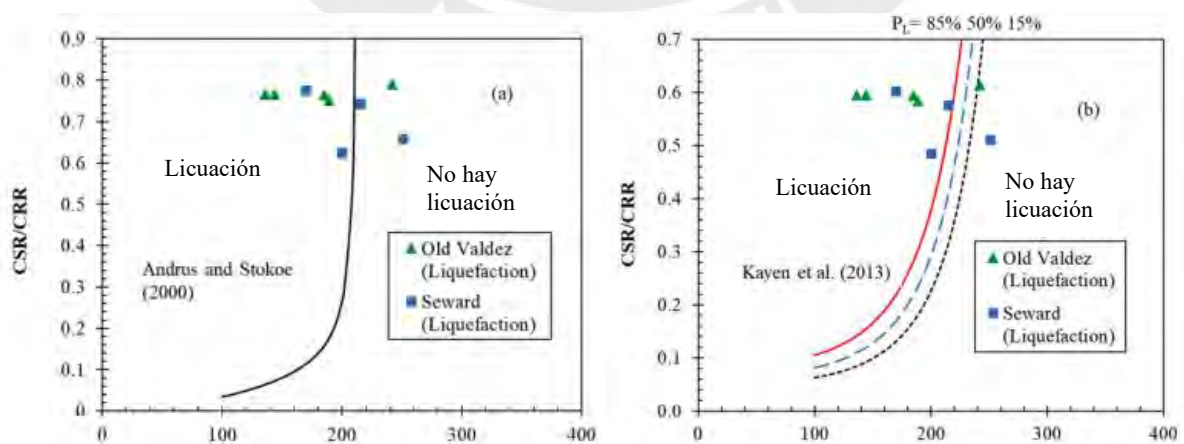
La licuación en gravas es un fenómeno que existe y que, similar a aquella en arenas, tiene consecuencias muy dañinas. Según Martínez (2003), se ha detectado evidencias de

licuación de gravas en el Perú, específicamente tras el terremoto de Nasca de 1996. La licuación de gravas fue registrada en el puente Yauca, en el departamento de Arequipa. Esta publicación documenta el reporte de Park (1939), quien sugiere que la presa de Malpaso, ubicada en Junín y construida en 1936, falló debido a la licuación de suelo gravoso. Otro ejemplo documentado es el colapso de presas en China tras el terremoto de Shumen de 1975 y la falla de talud en Tongshen de 1976, también atribuidas a licuación en gravas. A su vez, se detectó licuación de suelos gravosos por lo acontecido en el terremoto de Anchorage (Alaska) de 1964 (Ross et al., 1969). Unas de las ocurrencias de licuación en suelos gravosos mejor documentadas fueron aquellas del *CentrePort* de Wellington, Nueva Zelanda tras el terremoto de Kaikoukra de 2016 (M_w 7.8). Durante el proceso constructivo del puerto, se empezó a vaciar rellenos sobre el mar con el fin de tener más terreno, en su mayoría rellenos gravosos, con una menor cantidad de rellenos provenientes del fondo marino. Tras el vaciado, se realizó compactación de rodillos en los dos o 3 metros superiores del relleno a partir del nivel de superficie (habiendo alrededor de 10 a 18 metros de rellenos no compactados y bajo el nivel del mar). Tras el terremoto, se registraron múltiples ocurrencias de licuación, con evidencia de eyección de gravas a nivel superficial, asentamientos de hasta 1 metro y desplazamientos laterales considerables (Cubrinovski et al., 2017). Este evento demuestra que el fenómeno de licuación no deja de ser potencialmente devastador, incluso en gravas, suelos de los que por lo general se cree que tienen mejores propiedades ingenieriles (respecto a las arenas). Los suelos gravosos que pueden ser afectados por licuación se pueden presentar de dos disposiciones típicas: un suelo con matriz arenosa en el que partículas de grava se encuentran distribuidas sin mucho contacto entre ellas o partículas de grava en contacto entre sí con arenas en los vacíos. Debido a su mayor conductividad hidráulica, son los sitios de aquella última disposición los que presentarían menor susceptibilidad.

A nivel de caracterización, a menudo es de dificultad lograr una correcta caracterización de los suelos granulares gruesos en la práctica ingenieril de manera confiable y económica. Esto sucede puesto que, por lo usual, los ensayos in situ más utilizados son poco efectivos para este tipo de suelos. La interferencia de partículas de grandes dimensiones causa que, incluso en áreas de baja densidad relativa, se obtenga resultados engañosamente altos para ensayos SPT y CPT. El trabajo de Youd et al. (1997) recomienda el uso del *Becker Penetration Test* (BPT) para este objetivo; sin embargo, los equipos necesarios para su realización son de muy baja disponibilidad en el Perú. Del mismo modo, la dureza del suelo gravoso hace la exploración en sí costosa y complicada, a comparación de la exploración en un suelo arenoso o arcilloso. Seed et al. (2003) recomiendan en suelos donde la fracción gravosa es significativa, sin exceder el 50%, realizar una variación del SPT llamada “SPT de intervalos cortos”, en la que el conteo de golpes es realizado por cada pulgada (2.54cm) en vez de los 15 cm del SPT tradicional, hasta llegar a las 12 pulgadas. El procedimiento del SPT de intervalos cortos implica el descarte de valores de conteos por pulgada si se incrementan súbitamente (se considera que de ser así es porque una partícula de tamaño considerable ha obstruido el penetrómetro) y posteriormente escalar los valores selectos para representar el conteo de golpes de penetración de 30 cm, acorde al SPT tradicional. Por lo mencionado, efectuar el SPT de intervalos cortos requiere de un adecuado criterio para obtener resultados representativos del suelo a ensayar. En laboratorio, la caracterización de suelos gravosos requiere a menudo de equipos especiales de ensayo y de muestras muy grandes (debido a su elevado tamaño de partículas), lo que también dificulta esta labor.

Debido a ello, la evaluación de licuación en gravas por ensayos geofísicos resulta altamente atractiva, principalmente en el caso de ensayos no invasivos (MASW y SASW), puesto que implican un costo operativo relativamente bajo, al evitarse perforaciones en el suelo gravoso; así como evitar las limitaciones asociadas al uso de un cono de penetración en

suelos gravosos. Como una alternativa, Cao et al. (2011) desarrollaron curvas probabilísticas de ocurrencia de licuación para velocidades de ondas de corte (V_s) basadas en información de suelos gravosos del terremoto de Wenchuan de 2008 ($M_w=7.9$). Estas curvas incluyen incertidumbres significativas debido a la limitada base de datos en la que se basa. Roy et al. (2022) realizaron un estudio sobre licuación de gravas basado en los registros de campo tras el terremoto de Anchorage en 1964, utilizando ensayos DPT (*Chinese Dynamic Cone Penetration Test*) y mediciones de ondas de corte con ensayo MASW. De este estudio se obtienen conclusiones sobre la estimación de potencial de licuación en gravas. Por un lado, los resultados obtenidos por el DPT son exitosos y se ajustan a la realidad. Por otro lado, los resultados de los ensayos geofísicos son más complejos. Se utilizó para la evaluación tres curvas: Andrus y Stokoe (2000), Kayen et al. (2013) y Cao et al. (2011), cuyo objetivo fue estimar el CRR a partir de V_s . Las correlaciones de Andrus y Stokoe (2000) y Kayen et al. (2013) obtienen resultados inconsistentes, que sugieren la necesidad de una calibración para su uso en gravas. Puesto que la curva de Kayen et al. (2013) fue desarrollada en base de 422 casos de licuación en arenas esto no resulta inconsistente. La correlación de Cao et al. (2011), en cambio, brinda resultados consistentes con los obtenidos en campo. En la Figura 37 se presentan estas estimaciones gráficamente:



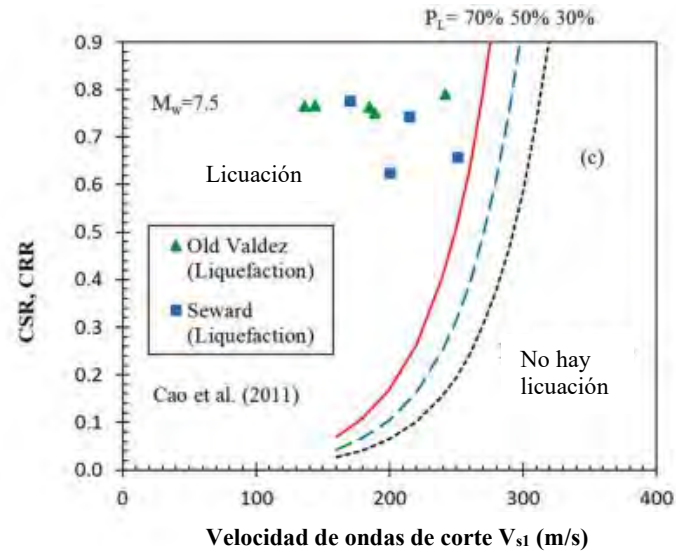


Figura 35. Evaluación de potencial de licuación en Seward y Valdez, Alaska; en base a medición de ondas de corte V_s , con tres correlaciones distintas (Roy et al., 2022)

Finalmente, Rollins et al. (2022) presentan una curva probabilística de resistencia a la licuación a partir de medición de ondas de corte, que a comparación de la propuesta por Cao et al (2011), usa un conjunto de datos más amplio, de 174 sitios de evaluación y basado en 17 terremotos. Los resultados indican un ajuste más preciso para las curvas de resistencia a la licuación probabilísticas. Existe una menor distancia entre las curvas de $P_L=80\%$ y $P_L=15\%$, atribuible a la reducción de incertidumbre. A su vez, los valores de CRR presentados para velocidades de onda de corte normalizadas V_{s1} bajos (alrededor de 150 m/s) empiezan en un rango de valores más alto. Esta comparación se puede visualizar en la Figura 36.

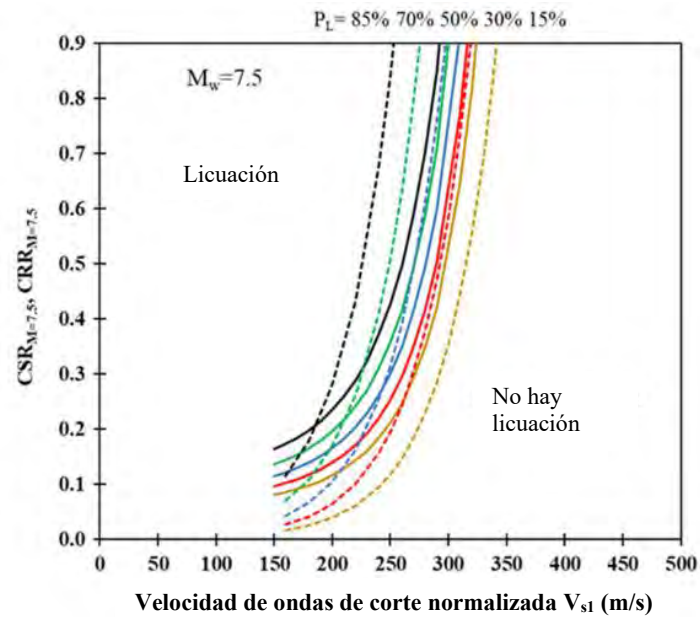


Figura 36. Comparación entre curvas probabilísticas: Cao et al. (2011) en líneas punteadas, Rollins et al. (2022) en líneas sólidas

Previamente, Cao et al. (2011) presentaron una curva basada en un solo sismo, por lo que para su uso en evaluación de licuación en gravas para sismos de magnitudes distintas habría que haberse utilizado un factor de escala de magnitud (MSF) desarrollado para arenas (por ejemplo, Youd et al, 2001). Por lo tanto, Rollins et al. (2022) proponen una versión de MSF particular para la evaluación de licuación en gravas: $MSF = 10.667 \exp(-0.316M_w)$. Cabe mencionar que este valor de MSF cae en un rango intermedio entre otros formulados a través de los años (para arenas), lo que sugiere que el efecto de la magnitud del sismo no difiere mucho entre estos.

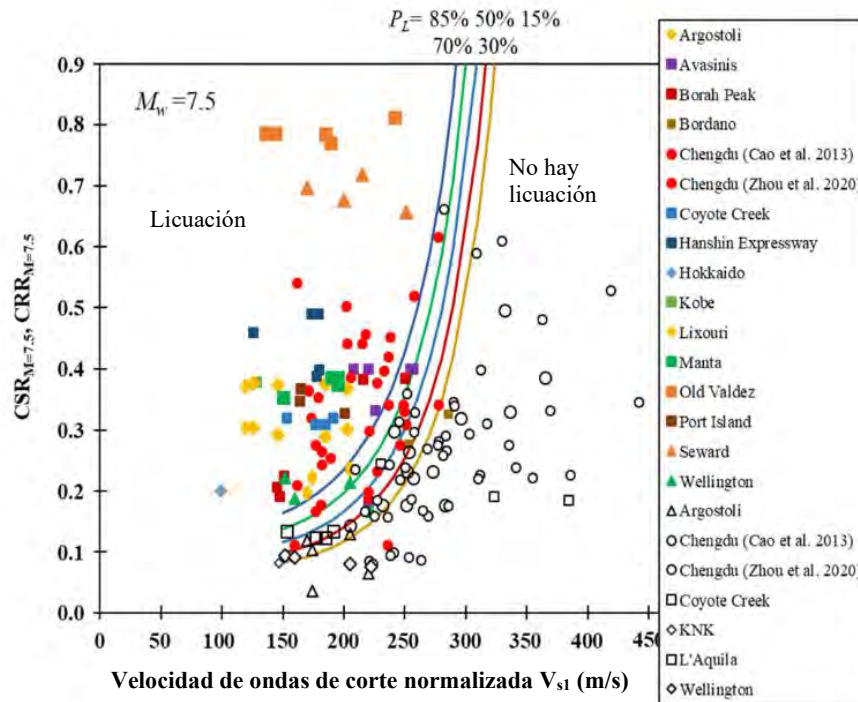


Figura 37. Curva probabilística de resistencia a licuación para gravas a partir de medición de ondas de corte V_s (Rollins et al., 2022)

2.4.10 Efectos post-licuación

Como se ha mencionado anteriormente, el fenómeno de licuación induce al suelo a asentamientos enormes, flujos laterales, pérdida de resistencia portante, entre otras consecuencias dañinas. En esta sección, se presentan algunos de los modelos desarrollados para estimar estas consecuencias.

2.4.10.1 Asentamientos inducidos por la licuación

Ishihara y Yoshimine (1992) propusieron un método de campo abierto (es decir, sin los efectos causados por el peso de estructuras) para la estimación de asentamientos inducidos por la licuación. Si bien este método constituye un paso importante para la estimación de efectos post licuación, el conjunto de datos utilizado en su planteamiento empírico era limitado y el entendimiento de los mecanismos que afectan la licuación no eran lo suficientemente comprendidos.

Bray y Macedo (2017) plantean un procedimiento simplificado para la estimación de asentamientos inducidos por la licuación en edificaciones. Trabajan sobre la base de numerosos estudios conducidos a través de las décadas pasadas, incluyendo al método antes mencionado; y análisis de interacción suelo-estructura (SSI). Se permutan diversos escenarios mediante una serie de parámetros (espesor de suelo licuable, densidad relativa, presión sobre el suelo a cimentar, ancho de construcción, entre otros) y 12 conjuntos de registros sísmicos, un total de 1260 casos. Adicionalmente, se definen los mecanismos que afectan los movimientos inducidos por la licuación en estructuras, señalados en Figura 38.

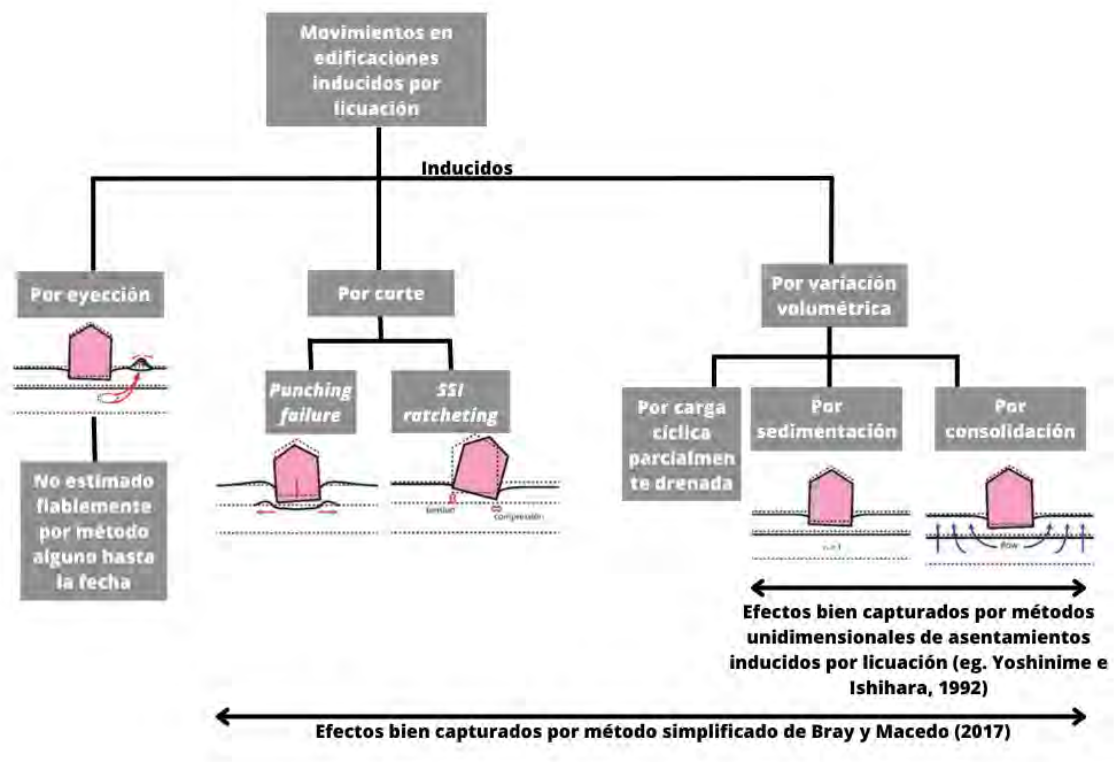


Figura 38. Mecanismos de movimientos inducidos por licuación en estructuras. Adaptado de Bray y Macedo (2017)

Dicho método resulta reminiscente a las correlaciones presentadas por Seed e Idriss (1982), en el cual se relacionan características de edificios (altura, amortiguamiento), profundidad y tipología del suelo (que afecta las características del movimiento del suelo

durante el terremoto, lo cual se presenta en distintos espectros de aceleración para cada suelo). Sin embargo, presenta un enfoque mucho más orientado al fenómeno de licuación que al comportamiento sísmico de las estructuras.

2.4.10.2 Resistencia residual de un suelo tras la licuación

Mediante el estudio del comportamiento del suelo respecto a la relación entre el esfuerzo cortante y la deformación del mismo, Kramer y Wang (2015) proponen un modelo empírico para estimar la resistencia residual del suelo después de la ocurrencia de licuación. La licuación en un suelo está relacionada a un estado de deformación considerable, referido como estado estable (*steady state*, en el cual la tasa de deformación y volumen son constantes), estado teórico cuyas condiciones son poco posibles de representar en laboratorio (aunque este marco teórico también difiere de las condiciones de campo y solo puede ser considerado como una idealización). Para esto, se propone un “modelo híbrido”, en el que la resistencia residual es dependiente tanto de N- SPT como de la presión de confinamiento. El modelo referido es el siguiente:

$$S_r = \exp(-8.444 + 0.109(N_1)_{60} + 5.379\sigma'_{v0}{}^{0.1})$$

Donde:

S_r : resistencia residual al corte del suelo (atm)

Sabiendo que la resistencia a la licuación (CRR) se expresa:

$$CRR = \left(\frac{\tau}{\sigma'_{v0}}\right)_{ID_r} = \left(\frac{S_r}{\sigma'_{v0}}\right)_{ID_r}, \text{ este modelo puede resultar conveniente para la evaluación de la}$$

resistencia a licuación de aquel suelo que ya sufrió sus efectos, en caso de que ocurriese otro terremoto. Cabe mencionar que los modelos existentes para la estimación de resistencia residual están basados en flujos laterales (este modelo híbrido incluye adicionalmente casos

de expansión lateral), de los cuales se reconstruye la geometría existente previa a la falla. Dichos casos históricos son muy limitados en su cantidad y perjudicados por la calidad de la información (limitada cantidad de muestreo, el cual es realizado cercano en la falla y no en la misma, a menudo; entre otros), por lo que se presentan incertidumbres considerables y se requiere de mayor investigación para obtener ajustes más razonables.

2.4.11 Métodos alternativos

Como continuación del estado del arte de evaluación de licuación, se presenta de manera resumida algunos métodos alternativos al basado en esfuerzos, con sus ventajas y limitaciones. Al final de la sección se presenta un breve análisis comparativo entre los enfoques (incluyendo el método basado en esfuerzos), bajo los conceptos de suficiencia, eficiencia y predictibilidad.

2.4.11.1 Método basado en deformaciones

Este método se basa en predecir la presión de poros ocasionada por deformaciones, a partir de ensayos de laboratorio realizados a distintas densidades relativas. Esta estimación se realiza a partir de la deformación causada por un terremoto de un determinado número de ciclos significativos. Tal sería, comparándolo con el método basado en esfuerzos, el factor de demanda, así como hay un factor de resistencia (deformación crítica). La deformación inducida se expresa:

$$\gamma_c = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{vo} r_d}{G_c}$$

Donde:

γ_c : Deformación de corte inducida por el terremoto.

G_c : Módulo de corte a determinada deformación. Se obtiene a partir de V_s del suelo.

Este método tiene a su favor el que la generación de presiones intersticiales (proceso fundamental en la licuación) tiene una asociación más fuerte a las deformaciones de corte que a los esfuerzos inducidos. Además, reproduce más cercana a la realidad el comportamiento del suelo, el cual según Dobry (1989) cuenta con una deformación crítica a partir de la cual su comportamiento deja de ser elástico (empíricamente de 0.01% para arenas limpias, se puede determinar también por ensayos de laboratorio). Este método toma en cuenta que no se generen presiones intersticiales antes de llegar a este límite. Además, diversas muestras de laboratorio al ser sometidas a ensayos con ciclos de deformación experimentan un comportamiento similar, lo que posibilita esta metodología de forma complementaria a métodos empíricos basados en campo.

Por otro lado, este método tiene numerosas desventajas que limitan su aplicabilidad ingenieril y lo relegan a ser una alternativa complementaria. El muestreo de suelos para ensayar en laboratorio y que se asemeje lo más posible al campo es complicado y costoso, y a menudo se producen alteraciones que pueden invalidar los resultados obtenidos. Otra limitación es la de estimar el número de ciclos de deformación significativos a utilizarse. Si bien se puede utilizar una equivalencia como la de Seed e Idriss (1982) (como el MSF), esto asumiría que los ciclos de deformación equivalen a los ciclos de esfuerzo inducido, lo cual no se puede afirmar con certeza. Por otro lado, el parámetro γ_c es imposible de estimar con certeza, y debido a su relación con G_c (el cual varía conforme aumenta la deformación de corte), es poco probable de emplear este método al incrementarse la presión de poros. Su utilización en métodos formalmente probabilísticos también se ve limitada por esto.

2.4.11.2 Método basado en energía: Intensidad de Arias

Método inicialmente planteado por Nemat-Nasser y Shokoh (1979) , plantea que existe una relación entre la variación volumétrica, la energía histerética disipada y la

generación de presión intersticial de una matriz de partículas de suelo. En base a ello, su unidad de medición es un término integrado conocido como intensidad de Arias:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a_x^2(t) dt + \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a_y^2(t) dt$$

Donde:

a_x : Componente horizontal de la aceleración en x

a_y : Componente horizontal de la aceleración en y

t_0 : Duración del sismo

Este método aventaja al método simplificado en que, al expresarse I_a como un término integrable, se toma en cuenta los registros acelerográficos en su totalidad, en vez de una sola aceleración a_{\max} representativa, la cual puede presentarse o casi al inicio o casi al final del sismo en sí. Las consecuencias causadas por esta última posibilidad no cuentan con representación en el método basado en esfuerzos.

Kramer y Mayfield (2007) ejemplifican el defecto principal de usar una sola aceleración representativa comparando dos registros acelerográficos de sismos de magnitudes y a_{\max} similares: Niigata, 1964 ($M_w=7.5$, $a_{\max}=0.17g$) y Nihonkai-Chubu, 1983 ($M_w=7.7$, $a_{\max}=0.165g$). A pesar de esto, la alta cantidad de pulsos de alta aceleración del terremoto de Nihonkai-Chubu (derecha, Figura 39) nos indica que este sismo debería ejercer una distinta sollicitación sobre el suelo que el terremoto de Niigata. Usando la ecuación simplificada de CSR, se obtiene valores similares para ambos sismos. Por otro lado, el valor de I_a es de 0.82 m/s (Niigata) y 4.47 m/s (Nihonkai-Chubu), valores radicalmente distintos.

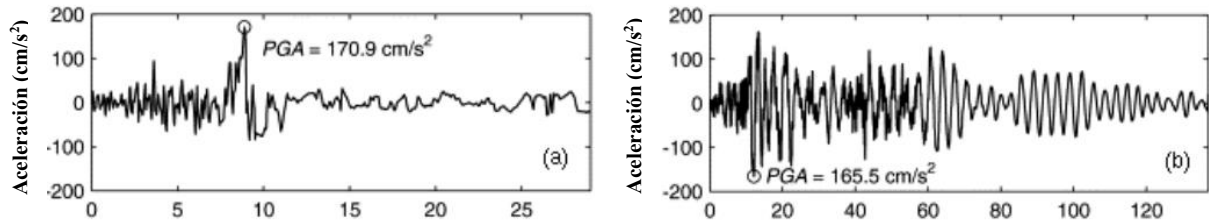


Figura 39. Registros acelerográficos de sismos de Niigata y Nihonkai-Chubu (Kramer y Mayfield, 2007).

Adicionalmente, se resalta la capacidad de I_a de estimar posibles daños y su sensibilidad a la duración del sismo y el momento en el que se presenta la aceleración máxima respecto a este (el aumento de presión intersticial previo a la licuación es notorio recién tras haber ocurrido la aceleración máxima, hecho que no puede plasmar el método basado en esfuerzos).

A pesar de estas ventajas fundamentales, el conjunto de mediciones de I_a existentes es muy reducido a los desarrollados para el método basado en esfuerzos, así como que no existen curvas probabilísticas desarrolladas para esta unidad de medición; así, imposibilitando su integración en un método probabilístico más riguroso de evaluación de licuación. Como estimador de demanda sísmica, la ecuación matemática de Travararou et al. (2003) incorpora los resultados de 1208 mediciones, así como separa las incertidumbres en un término aparte, dependiente en la magnitud, la intensidad de Arias y las condiciones de sitio. A continuación, se presenta tal expresión:

$$\ln(I_a) = 2.8 - 1.981(M_w - 6) + 20.72 \ln(M_w / 6) - 1.703 \ln(R^2 + 8.78^2) + (0.454 + 0.101(M_w - 6))S_C + (0.479 + 0.334(M_w - 6))S_D - 0.166F_N + 0.512F_R$$

Donde:

R: Distancia a ruptura en km

S_C : Variable para materiales de perfil de suelo: 0 para roca firme, 1 para roca suave y 0 para

arenas medias y arcillas rígidas.

S_D : Variable para materiales de perfil de suelo: 0 para roca firme, 0 para roca suave y 1 para arenas medias y arcillas rígidas.

F_N : Variable por tipo de falla. 0 para falla de deslizamiento horizontal, 1 para fallas normales y 0 para fallas inversas u oblicuas.

F_R : Variable por tipo de falla. 0 para falla de deslizamiento horizontal, 0 para fallas normales y 1 para fallas inversas u oblicuas.

La incertidumbre total se desglosa en dos términos, uno inter-evento, $\tau(M)$ y uno intra-evento, $\sigma(I_a, \text{sitio})$.

$$\tau(M_w) = 0.611 - 0.047(M_w - 4.7), \text{ para } 4.7 \leq M_w \leq 7.6$$

$$\sigma(I_a, \text{sitio}) = \begin{cases} \sigma_1 & \text{para } I_a \leq 0.013 \text{ m/s} \\ \sigma_1 - 0.106(\ln(I_a) - \ln(0.0132)) & \text{para } 0.013 < I_a < 0.125 \text{ m/s} \\ \sigma_2 & \text{para } I_a \geq 0.125 \text{ m/s} \end{cases}$$

$$\sigma_{\text{tot}}(M_w, I_a, \text{sitio}) = \sqrt{\tau(M_w)^2 + \sigma(I_a, \text{sitio})^2}$$

Donde $\sigma_1 = 1.18$ y $\sigma_2 = 0.94$ para roca, $\sigma_1 = 1.17$ y $\sigma_2 = 0.93$ para roca suave, y $\sigma_1 = 0.96$, y $\sigma_2 = 0.73$ para arcillas rígidas y arenas medias.

Como desventaja más significativa, está el hecho de que las incertidumbres resultantes de ecuaciones de estimación de I_a (como la anterior) son muy altas, excediendo hasta en 50% los valores obtenidos con a_{max} . A pesar de sus virtudes, tales motivos han evitado mayor difusión del uso ingenieril de este enfoque.

2.4.11.3 Método basado en energía: CAV_5

La velocidad absoluta acumulativa, o CAV_5 , es otro parámetro integral, que cuenta con los beneficios de la intensidad de Arias; y adicionalmente, con el concepto del límite inferior

a partir del cual recién se genera la presión de poros, del método por deformaciones. CAV_5 parte del original CAV , que es equivalente al absoluto del área bajo los acelerogramas, o matemáticamente:

$$CAV = \int_0^{t_{max}} |a(t)| dt$$

Ante la medición desproporcionadamente alta que se obtenía de CAV para sismos de larga duración y poca amplitud, se desarrolló CAV_5 . Para esto, se limitó el rango de aceleraciones tomado a un mínimo de 5 cm/s^2 . Se tiene:

$$CAV_5 = \int_0^{\infty} x|a(t)| dt, \text{ donde}$$

$$x=0, \text{ si } |a(t)| < 5 \text{ cm/s}^2 \text{ o } x=1, \text{ si } |a(t)| > 5 \text{ cm/s}^2$$

Gráficamente:

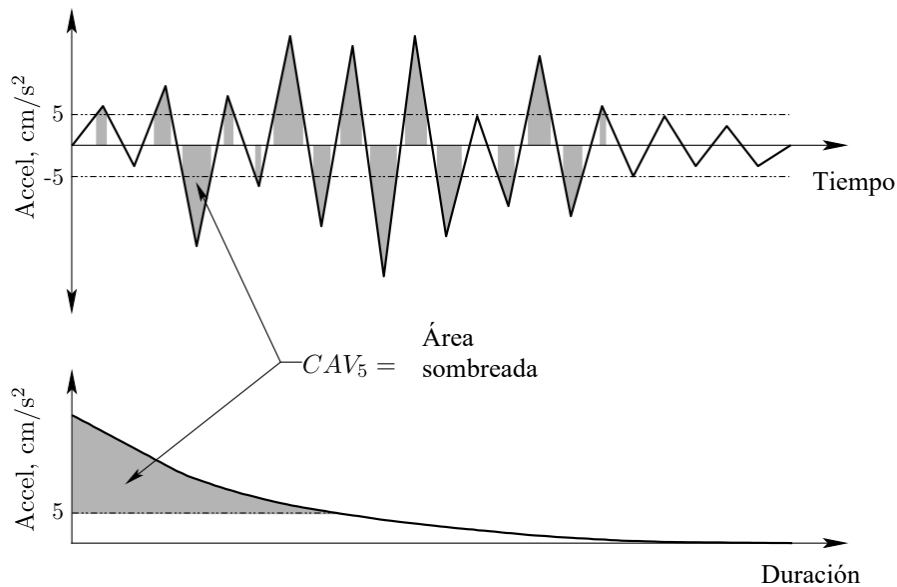


Figura 40. Representación gráfica de CAV_5 (Kramer y Mayfield, 2007). Se puede apreciar que la integración no es completa, aquellas aceleraciones menores a 5 cm/s^2 no son integradas.

Kramer y Mayfield (2007) proponen un marco teórico para la aplicación práctica de CAV_5 . En primer lugar, esto involucra el planteamiento de un coeficiente análogo a r_d , el cual se conoce como r_c .

A continuación, Kramer y Mayfield (2007) toman casos históricos para crear una correlación probabilística entre CAV_5 y $N_{1,60}$. Para obtener los valores de CAV_5 utilizan la ley de atenuación de Kramer y Mitchell (2006), la cual depende del tipo de ruptura, magnitud momento y distancia al epicentro. La ecuación resultante se presenta a continuación, y obtiene resultados comparables a la ecuación de Cetin (2000):

$$P_L = \Phi \left[-\frac{N_{1,60,cs} - 5.12 \ln(CAV_5) - 4.03 \ln\left(\frac{\sigma'_{vo}}{pa}\right) - 12.42}{4.98} \right]$$

Finalmente, usando el software EZ FRISK y la fórmula antes presentada, Kramer y Mayfield (2007) proponen el método de análisis de licuación basado en *performance* (marco teórico del PEER), que permite conocer los tiempos de retorno de licuación en torno al parámetro CAV_5 , incluyendo resultados correspondientes a sitios a lo largo de diez ciudades en los Estados Unidos.

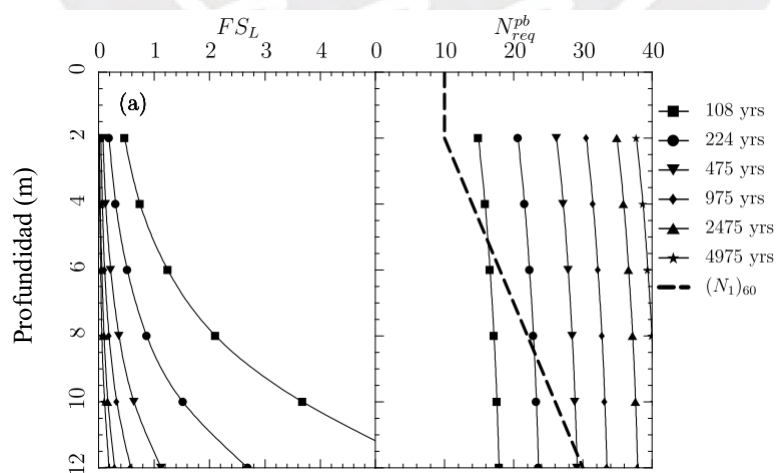


Figura 41. Resultados de análisis performance-based en perfil de suelo de Seattle, basado en CAV_5 . (Kramer y Mayfield, 2007)

Para sintetizar, cabe mencionar que el método de análisis de licuación por CAV_5 tiene ventajas debido a su naturaleza, la cual captura el registro entero del sismo, así permitiendo conocer aproximadamente en qué momento se inicia la licuación. Según lo presentado, los resultados presentados que usan CAV_5 (por ejemplo, Figura 43) son consistentes con los vistos usando CSR, de manera que las pocas diferencias que hay se presentan probablemente por la existencia de sismos de M_w de hasta 9.0 en la zona estudiada, mientras que la ley de atenuación existente cubre M_w de hasta 7.4. En el caso de zonas altamente sísmicas, como lo es la costa peruana, esta limitación puede afectar considerablemente la confiabilidad del estudio realizado. Es por este lado que se encuentran las mayores limitaciones, las correlaciones de CAV_5 con $N_{1,60}$ requieren validación adicional mediante la ampliación de los casos históricos en los que se basan y correlaciones (r_c , amplificación de roca a suelo licuable específicos, la ley de atenuación antes mencionada, entre otros), lo que derive en su inclusión en algún reporte o estudio del arte de amplio alcance como lo es el del NCEER (Youd et al., 1997). Además, la realización de estudios probabilísticos que usen CAV_5 (mediante la ley de atenuación de Kramer y Mitchell) se ve severamente limitada por falta de soporte en *software*, siendo EZ-FRISK el único *software* que permite realizar tales análisis. Cabe mencionar que, excediendo las limitaciones del *software* en sí, existe una falta general de capacitación hacia los ingenieros para estos tipos de análisis.

2.4.11.4 Comparación entre enfoques

Kramer y Mayfield (2007) abordan las comparaciones entre estos enfoques desde su aplicabilidad al marco teórico del PEER. Mediante métodos computacionales, que permiten estimar la respuesta del suelo (más generación de presión de poros r_u) (véase 2.4.14), y para diferentes registros sísmicos, se planteó correlaciones con las distintas medidas de intensidad y se comparó la calidad de cada correlación. Con tal motivo, se definen los siguientes conceptos:

- Eficiencia: Capacidad de una medición de intensidad de estimar correctamente una respuesta. En este caso, la generación de presión de poros.
- Suficiencia: Capacidad de una medición de intensidad de por sí mismo abordar las características requeridas para la estimación del problema. En este caso, se comparó la variación del residual de r_u (es decir, su diferencia con el ajuste realizado) con I_a distancia R y la magnitud (M_w).
- Predictibilidad: La capacidad de estimar el parámetro. A partir de 282 registros provenientes de 40 eventos sísmicos, se realizó la comparación entre a_{max} , I_a y CAV_5 . Para la estimación de CAV_5 , se desarrolló una fórmula de atenuación a partir de la propuesta por Travararou et al. (2003).

A continuación, se presenta la Tabla 11, la cual incorpora los resultados generales de este análisis comparativo:

Tabla 11. Comparación entre capacidad de enfoques de evaluación de licuación.

Método	Medida de intensidad	Eficiencia	Suficiencia	Predictibilidad
Esfuerzos cíclicos	a_{max} , M_w	3	3	1
Deformaciones	a_{max} , M_w	1	1	3
Intensidad de Arias	I_a	2	2	2
CAV_5	CAV_5	1	1	1

Nota: El número 1 representa la mejor funcionalidad, mientras que 3 la peor. Adaptado de Kramer y Mayfield (2007)

Se concluye de tal que las propuestas alternativas ofrecen beneficios inherentes a su naturaleza, la cual se correlaciona mejor al fenómeno mismo de la licuación que la propuesta basada en esfuerzos cíclicos (suficiencia y eficiencia); sin embargo, tales ventajas son lastradas por falta de desarrollo de leyes de atenuación (CAV_5) y fuentes de error considerables (deformaciones). Esto deriva en escasa aplicación ingenieril, lo mismo cual inhibe el desarrollo continuo de estos enfoques y viceversa.

2.4.12 Estudio de licuación mediante procedimientos de laboratorio

2.4.12.1 Ensayos cíclicos de laboratorio

- Ensayo triaxial cíclico: Se ensaya una muestra cilíndrica (relación altura/diámetro: 2) en la celda triaxial, cubierta por una membrana flexible y tapas en los extremos, para garantizar un entorno de esfuerzos controlados. Tras presurizar la celda, aplicando esfuerzos de confinamiento, se aplican esfuerzos cíclicos controlados sobre la muestra mediante la ida y vuelta del pistón al tope de la muestra. Las condiciones de deformación lateral son controladas por la celda triaxial. Entre los ensayos cíclicos de laboratorio este es el más utilizado debido a la amplia disponibilidad de equipos.
- Ensayo de corte simple cíclico: Usan muestras cilíndricas (relación altura/diámetro: 0.5). Las condiciones de deformación lateral son restringidas totalmente por anillos metálicos que cubren el cuerpo de la muestra. Se aplica desplazamiento horizontal en el tope o base, con el otro extremo fijo (ambos extremos tapados). El ensayo de corte directo cíclico ofrece diversas ventajas respecto al triaxial, en cuanto respecta a la preparación de la muestra (al ser de menor altura esta requiere de menor consolidación, así como representa más adecuadamente las condiciones de esfuerzo de reposo (K_0) de campo, ya que ofrece la capacidad de rotar los ejes de esfuerzo principales. Sin embargo, su ejecución cuenta con limitaciones, como lo son la distribución poco uniforme de esfuerzos y deformaciones (acentuada en los límites de la muestra), la ausencia de esfuerzos de corte verticales como condición de borde, dificultades en la definición del círculo de Mohr, entre otros, los cuales pueden inducir a resultados poco confiables (Kang, Ma, y Ge, 2025).

Ambos ensayos son valiosos para el estudio continuo de la influencia de factores como la cementación, la edad geológica, la sobre consolidación, la influencia de finos, la densidad

relativa, entre otros, en los mecanismos que preceden la ocurrencia de licuación. Sirven para evaluar la licuación en suelos fuera de los rangos establecidos como “licuables” por correlaciones del método simplificado, así como permiten el desarrollo de modelos constitutivos que permiten estimar el aumento de presión en los poros ocurrido durante la licuación y el comportamiento del suelo post-licuación. Los ensayos en suelos licuables sin suficientes finos que aporten cohesión en la matriz se suelen realizar con muestras reconstituidas, de no ser así se recurre a la técnica de congelamiento de suelo, la cual asume que la humedad congelada no altera la estructura del suelo. Estas aplicaciones de ensayos de laboratorio para la estimación de la resistencia a la licuación solo se realizan en proyectos críticos de gran envergadura o con fines investigativos, debido al alto costo y cuidado asociado con la integridad de las muestras.

2.4.12.2 Ensayos de modelos físicos en laboratorio

Refiere a la preparación de muestras a ser ensayadas en una mesa vibratoria, buscando replicar las condiciones de sitio en un entorno controlado. El ensayo se da en dos modalidades: no acopladas (“1-g”) o acopladas a un aparato centrífugo, el cual sirve para aplicar aceleración centrífuga y multiplicar las fuerzas en la muestra de suelo, con propósito de ajustar su aplicación en modelos a escala. Los modelos físicos pueden incluir suelos heterogéneos de múltiples estratos, e incluso con estratos inclinados y estructuras a escala para el estudio de la interacción entre el suelo y la estructura. La modalidad “1-g” es limitada por la dificultad y el costo de obtener muestras de alta calidad del tamaño que esta requiere (incluyendo nivel freático y compactación de estratos para replicar condiciones de campo), especialmente para suelos heterogéneos. La modalidad con aceleración centrífuga, por su lado, es cuestionada por la influencia de condiciones de límite, tamaño de partículas y

problemas en preparación de muestras que se ajusten a condiciones de campo a tamaño de escala. Dichos inconvenientes orientan este tipo de ensayos a uso particularmente apropiado para evaluar la resistencia a la licuación en suelos con contenido de finos considerable, en los cuales el método simplificado no es conveniente, así como el que la dificultad de la obtención de muestras de alta calidad y la elaboración de modelos físicos se reduce.

2.4.13 Medición en campo de generación de presión de poros

Mediante una fuente de carga dinámica controlada y la instrumentación necesaria para el registro de presión de poros, mediante sensores insertados a través del perfil de suelo, se registran las presiones generadas. Las dos técnicas para inducir esfuerzos en el suelo son la detonación controlada y el uso del vibrador sísmico (*vibroscis*). Debido a que las aceleraciones inducidas por la detonación controlada son muy altas y los tiempos de carga son muy cortos, se dificulta la correlación de carga inducida con un nivel de esfuerzos cíclicos, de tal manera que su uso bajo el enfoque basado en esfuerzos es limitado (sin embargo, no es una limitación para el enfoque en deformaciones y energía). Las cargas inducidas son cuantificadas mediante el registro de las deformaciones cortantes cíclicas (mediante dos o más sensores de movimiento) o los esfuerzos cíclicos inducidos (se obtienen indirectamente de las deformaciones y una estimación del módulo de corte G_s).

Este método se asemeja más a condiciones de campo en la medida que las deformaciones y esfuerzos inducidos no son constantes. Sin embargo, el alcance de los ensayos está limitado a estratos superficiales, de hasta 4 metros. Asimismo, los resultados pueden verse afectados por la conductividad hidráulica del suelo, puesto que en el suelo que circunda los instrumentos de medición puede que no se generen presiones de poros (así, no se cumpliría con la condición no drenada).

2.4.14 Evaluación mediante métodos computacionales

2.4.14.1 Uso de modelos constitutivos avanzados

Los modelos constitutivos consisten en ecuaciones que representan las características más complejas del comportamiento del suelo en la relación esfuerzos-deformaciones. Los modelos constitutivos hacen especial énfasis en los estados críticos, la dilatancia, pérdida de resistencia post licuación, reducción de módulo de corte, generación de presión de poros, entre otros. Si bien esto permite una representación más integral de la respuesta del suelo, su uso generalmente requiere de una amplia gama de parámetros y calibración adicional, lo que requiere un esfuerzo mayor y bastante criterio ingenieril. Algunos ejemplos de modelos constitutivos son PMSand 3 (Boulanger y Ziotopoulou, 2015) y PM4Silt (Boulanger y Ziotopoulou, 2018). Algunos *software* compatibles con los modelos constitutivos son FLAC (método de diferencias finitas) o PLAXIS (método de elementos finitos). Respecto al estudio de la licuación, los modelos constitutivos se presentan en dos variantes:

- Los modelos de asociación baja entre presión de poros (r_u) y deformación de corte se basan en la validación de ensayos drenados en laboratorio con la medición de presiones de poros en ensayos no drenados. Esta variante está incorporada en *software* de análisis de respuesta de sitios unidimensionales como DEEPSOIL y D-MOD2000, permitiendo estimar la generación de presiones en función de un registro de movimiento sísmico.
- Los modelos constitutivos de alta asociación, en cambio, enfocan simultáneamente el desarrollo de esfuerzo y deformaciones con la generación de presión de poros. Uno de los modelos compatibles con esta formulación es UBCSAND.

En ambos casos, una de las limitaciones para su uso en la evaluación de licuación reside en la consideración de registros de aceleración. El ASCE recomienda el uso de 3 o más (óptimo). Por otro lado, los modelos constitutivos existentes aún no cuentan con la capacidad

de estimar las respuestas del suelo tras la ocurrencia de licuación, funcionalidad que se encuentra en desarrollo. La Figura 42 muestra los resultados de una simulación computacional de licuación.

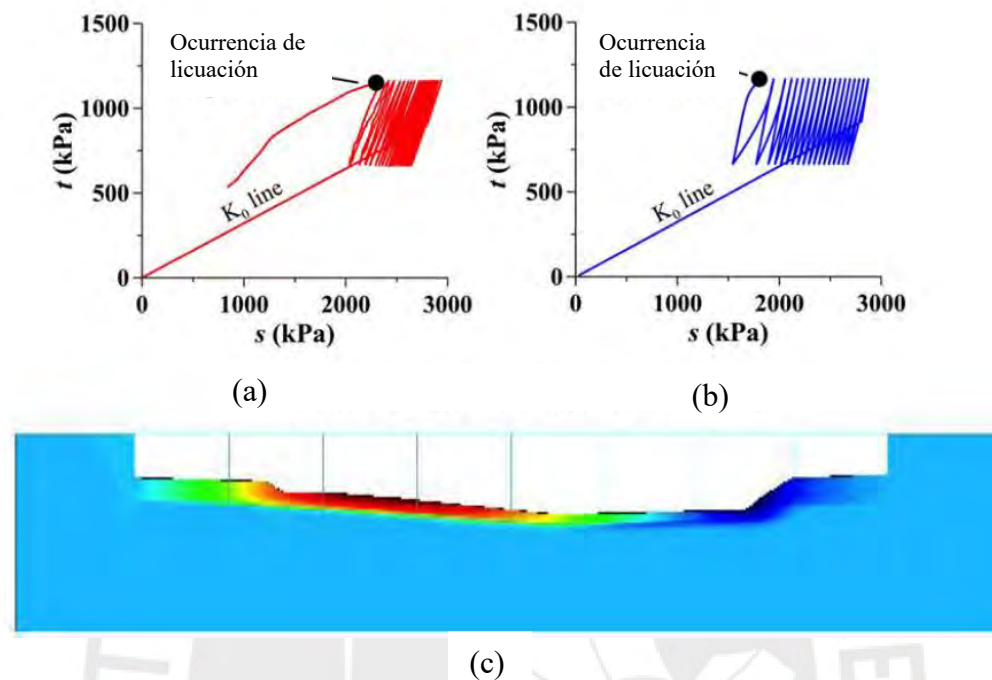


Figura 42. (a) Registro de ensayo de laboratorio triaxial no drenado (b) Simulación computacional de ensayo triaxial no drenado con modelo constitutivo de Manzari y Dafalias (1997) (c) Simulación de flujo de licuación en campo bajo un puente. Tomado de Kavazanjian et al. (2022)

2.4.14.2 Modelos de contacto (Métodos de elementos discretos)

Mediante el uso de modelos complejos de contacto entre partículas, que consideran las interacciones de fricción, deslizamiento, amortiguamiento entre partículas individuales, se realizan simulaciones computacionales de pruebas de laboratorio como triaxiales cíclicas, centradas predominantemente en suelos granulares. Este enfoque, de carácter experimental, se usa principalmente para la investigación de la influencia en la resistencia a licuación y propiedades mecánicas del suelo de algunas de las propiedades menos consideradas bajo el enfoque basado en esfuerzos, como lo son la cementación del suelo (Zhang et al., 2022), el contenido de partículas gruesas (Xia et al., 2024), el quebrantamiento de partículas (Zhang et al., 2024), entre otros. El éxito de este tipo de simulaciones depende de la calibración de los modelos de contacto en base a información experimental, así como la caracterización

adecuada de la estructura granular del suelo y el uso del modelo de contacto más apropiado (Chareyre, 2007).



3. Licuación de suelos en la NTE E.050 (2018): una visión general

3.1 Condiciones previas

La norma E.050 describe a un suelo susceptible a licuar frente a la acción de un sismo a aquel que cumple las características siguientes: estar constituido por arenas limpias, arcillosas, limosas, limos arenosos no plásticos o gravas empacadas en una matriz de alguno de los suelos mencionados previamente, y encontrarse sumergido. En tal caso, se debe incluir en el EMS un apartado dedicado al análisis de licuación.

3.2 Exploración de Campo

De darse indicios de licuación, basado en la historia sísmica del lugar (se puede asumir que refiere al registro de ocurrencia previa de licuación), se realiza una investigación previa conforme a la *Tabla 6 (NTE.050)*, sin embargo, con profundidades de exploración de 15 metros. De obtenerse un suelo con las características previamente detalladas (suelo "licuable"), será necesario asumir la probabilidad de ocurrencia de licuación y ampliar el programa de exploración para incluir el Análisis de Licuación en el EMS. Se indica realizar puntos de exploración mediante las técnicas de lavado o rotativa de al menos 15 metros de profundidad. En las perforaciones se realizará ensayos SPT espaciados obligatoriamente cada 1 metro, y se obtendrán muestras y en cada una de ellas se efectuará los siguientes ensayos: análisis granulométrico, límites de plasticidad, peso específico relativo, ensayo de clasificación SUCS.

Se permite el uso de ensayos DPSH, Cono Tipo Peck, CPT y medición de velocidades de propagación de las ondas de corte como investigación complementaria de los ensayos SPT.

3.3 Muestreo y ensayos de laboratorio

Obligatoriamente, se tomará en todas las muestras obtenidas de la cuchara SPT los siguientes ensayos de laboratorio (cómo mínimo): Análisis granulométrico, límites de Atterberg, peso específico relativo de los sólidos (Gs), clasificación visual manual. (Anula los requerimientos de 15.3.2.e)

3.4 Metodología de evaluación

En su estado actual, el capítulo de licuación de la NTE E.050 utiliza la metodología de licuación del método simplificado (basada en esfuerzos), referenciando la publicación del año 2003 por el EERC, para la evaluación del potencial de licuación. Los enfoques de su aplicación solicitados son tanto el determinístico cómo el probabilístico. Cómo parámetros complementarios al N(SPT) para el cálculo del potencial de licuación, se permite utilizar la resistencia al cono CPT (q_{c1}) o las velocidades de ondas de corte V_{s1} .

Enfoque determinístico: Conforme al “método simplificado” (con referencia de hasta EERC 2003), calcular el CRR (resistencia cíclica mínima para que licúe el suelo) y el CSR (resistencia inducida por el sismo). Conforme al tipo de edificación (NTE E.030), se establece el factor de seguridad mínimo (FSL). Tal que: $FS_L = CRR_M / CSR$. La siguiente tabla muestra los FS_L para cada tipo de edificación:

Tabla 12. FS_L mínimo por tipo de edificación (Tabla 13A E.050)

Categoría de las edificaciones (E.030)	FSL mínimo
A	1.25
B	1.15
C	1.00

Fuente: NTE E.050 (2018)

Enfoque probabilístico: Basado en los posibles sismos que podrían ocurrir en la zona. La severidad de la ocurrencia de licuación se ilustra mediante la siguiente tabla:

Tabla 13. Severidad de licuación (Tabla 13 E.050)

Clasificación del Potencial de Licuación	
Licuación	P_L
Alta	$>50\%$
Moderada	$10\% < P_L < 50\%$
Baja	$5\% < P_L < 10\%$
Muy baja	$< 5\%$

Fuente: NTE E.050 (2018)



4. Observaciones y discusión

4.1 Descripción de interrogantes y cuestionamientos, partiendo de la revisión

bibliográfica

4.1.1 Artículos 38.1. y 38.2.

En estos artículos de la E.050 se plantea que las características de un suelo susceptible a licuar son las siguientes (en simultáneo):

- Estar constituido por arena, arena limosa, arena arcillosa, limo arenoso no plástico o grava empacada en una matriz constituida por alguno de los materiales anteriores.
- Encontrarse sumergido.

Por lo visto en los trabajos de Idriss y Boulanger (2004), el criterio chino que le precede, y múltiples trabajos intermedios, el fenómeno de degradación cíclica de arcillas (*cyclic failure*) existe, y es análogo a la licuación en su comportamiento. Esta posibilidad no está comprendida por la NTE E.050, que solo propone obligatoriedad cuando las dos proposiciones previas se cumplen simultáneamente.

Un punto favorable sobre dichas proposiciones es que consideran la existencia de licuación en gravas, y dan una pauta clara y sensible sobre su consideración: el estar envueltas en una matriz arenosa (limpia, limosa o arcillosa) o limosa de por sí. Se debe evaluar hasta qué nivel darles una consideración a estos nuevos criterios. Esto dependerá de las consecuencias conocidas de la licuación en suelos finos y gravosos, afectadas por el entendimiento de su comportamiento. En tal caso, se tomará en consideración plantear casos adicionales en los cuales un suelo pueda presentar licuación, sin formar parte de los requisitos actualmente especificados. Respecto a la evaluación de la licuación en gravas, la obtención de parámetros fiables puede resultar problemática (especialmente en prospección intrusiva, la cual rige la versión actual de la NTE E.050 y la práctica actual), para lo cual la inclusión a cabalidad de

los métodos geofísicos será fundamental para ofrecer alternativas viables para la estimación de la resistencia a la licuación. Adicionalmente, es limitado el conocimiento sobre los efectos de la licuación en estos suelos, respecto de aquellos compuestos mayormente por arenas.

Además, es de interés plantear algún requisito de obligatoriedad arbitrario para el análisis de degradación cíclica en suelos finos. En primera instancia corresponde la evaluación de la susceptibilidad de los suelos finos a licuar, para lo cual el criterio de Bray y Sancio (2006) parece de carácter adecuado. Posterior a ello, de clasificar tal suelo como susceptible o potencialmente susceptible, se puede proponer la estimación mediante fórmulas empíricas por licuación de asentamientos, desplazamientos horizontales y la resistencia cortante post licuación. En determinados casos, se puede reglamentar la estimación de tales propiedades a partir de ensayos de laboratorio.

Por otro lado, cabe cuestionar si los criterios mencionados en la NTE E.050 son suficientes para afirmar si el suelo es susceptible o no a la licuación. Es de máxima prioridad evitar los falsos negativos. Es decir, aquella situación en la que se diagnostique al suelo como no licuable, ocasionando en que no se amplíe la campaña geotécnica; sin embargo, que al realizarse la investigación correspondiente los resultados sugieran lo contrario (o aún peor, tras ya haber construido). Este escenario es plausible en zonas donde las caracterizaciones geotécnicas y geológicas sean menos detalladas o cuya información disponible no ofrezca un veredicto contundente. Asimismo, se procura evitar escenarios demasiado conservadores, los cuales provoquen innecesariamente costos elevados al ampliar la campaña de exploración sin ser realmente necesario. Para tal fin, resulta conveniente adoptar el índice de susceptibilidad SRF, propuesto por Kramer (2008), en el cual se comprende la historia, la geología, la composición y el nivel freático del suelo. El incorporar dichos factores, incluso en el caso en el que se desconozcan ciertas características, permite un estándar integral donde el rol de lo subjetivo se reduce considerablemente.

Finalmente, cabe añadir que el método referido clasifica la susceptibilidad a licuar de un sitio de acuerdo a sus características intrínsecas, sin la consideración de la sismicidad en el sitio de estudio. Esto revela un problema en el estado del arte actual: no hay un amplio consenso sobre la definición de susceptibilidad de licuación; para algunos, esta representa cuán plausible es que un suelo licúe independientemente de la sismicidad a la que fuera sometido, mientras que otros consideran que la sismicidad del sitio es un factor de la susceptibilidad a licuación (Stuedlein et al., 2023). Dado que el fin de dicha evaluación es el reglamentar si se deberá o no ampliar el programa de exploración, acción con consecuencias económicas considerables, y que hay variabilidad considerable de sismicidad en el territorio peruano, se deberá incorporar tomar en cuenta este factor.

4.1.2 Artículo 38.4.3.

Se atribuye una profundidad de perforación mínima por punto de exploración de 15 metros para suelos potencialmente licuables. Esta profundidad es referida como P , la cual incluye la profundidad de cimentación proyectada desde el nivel de piso terminado al fondo de cimentación (D_f), sumada con la distancia entre el nivel del último sótano y la superficie del terreno (h , en edificaciones con sótanos) y la profundidad de influencia de la cimentación (z). El problema de esto es que no se puede aplicar el lineamiento en coherencia con la teoría en edificaciones con varios sótanos. De tener una profundidad desde la superficie del terreno hasta el fondo de la cimentación ($h+D_f$) de más de 15 metros (4 sótanos a más), entonces se estaría investigando menos de lo que se va a excavar y cimentar con una perforación de 15 metros, como indica actualmente la NTE E.050. Esto resulta incoherente. Tal profundidad de 15 metros resulta más consistente con la misma profundidad de influencia z .

4.1.3 Artículo 38.5.2.

Se debe validar las correcciones de N_{60} propuestas, e incluir más correcciones si fuera el caso. Por ejemplo, se conoce de un ajuste de N_{60} a $N_{60(a)}$ para arenas finas y limosas bajo el

nivel freático, así como la correspondiente para gravas y arenas gravosas. Esta corrección adicional está basada en la imposibilidad de disipar la sobrepresión hidrostática, que ofrece una resistencia adicional temporal frente a cargas dinámicas (Peck et al., 1974). Siendo que se trata de licuación, fenómeno al que las arenas finas o limosas bajo el nivel freático son susceptibles, es incluso más relevante realizar esta corrección adicional (Peck et al. (1974); Terzaghi y Peck (1948), respectivamente). A continuación, se presentan dichas correcciones:

En arena fina o limosa sumergida bajo el nivel freático, con $N_{60} > 15$: $N_{60(a)} = 15 + \frac{N_{60} - 15}{2}$

Para gravas y arenas gravosas (o con más de 15% de grava): $N_{60(a)} = 1.25N_{60}$

Adicionalmente, existen correcciones por contenido de finos $(\Delta N_1)_{60CS}$ en algunos de los artículos de correlaciones de resistencia a la licuación CRR. Dado que es imposible englobar las normas de cada autor como pautas generales, puesto que varían entre sí, queda recomendar el uso consistente de acuerdo a la correlación elegida y lo recomendado por su publicación. Por ejemplo, Cetin et al. (2018b) incluyen en su correlación dos posibles aplicaciones. Una aplicación directa en la cual la fórmula global incluye a $N_{1,60}$ y a FC, la cual permite directamente obtener P_L :

$$P_L(N_{1,60}, CSR_{\sigma'_v, \alpha=0, M_w}, M_w, \sigma'_v, FC) = \Phi \left(\frac{(N_{1,60} \cdot (1 + \theta_1 \cdot FC) - \theta_6 \cdot \ln(CSR_{\sigma'_v, \alpha=0, M_w}) - \theta_2 \cdot \ln(M_w) - \theta_3 \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + \theta_4 \cdot FC + \theta_5)}{\sigma_\varepsilon} \right)$$

Y una aplicación de la fórmula “en partes”, en la cual se debe corregir a $N_{1,60}$ sumándole la referida corrección $(\Delta N_1)_{60CS}$. Al final, los resultados son similares, y no se trata más que de cuestión de comodidad el uso de cualquiera de ellas.

$$\Delta(N_1)_{60} = FC \times [0.00167(N_1)_{60} + 0.089], 5\% < FC < 35\%$$

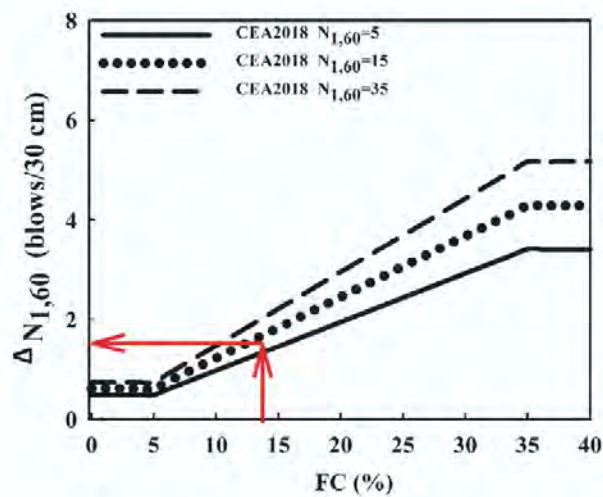


Figura 43. Variación de $(N_1)_{60}$ por contenido de finos para aplicación “en partes” (Cetin et al., 2018b)

La misma situación se da para las correcciones por magnitud (MSF) y por esfuerzo de confinamiento (K_σ), lo que implica normalizar al CSR a tales condiciones mediante la división:

$$CSR_{\sigma'_v=1 \text{ atm}, \alpha=0, M_w=7.5} = CSR_{\sigma'_v, \alpha, M_w} \cdot \frac{1}{K_\sigma} \cdot \frac{1}{K_{M_w}} \cdot \frac{1}{K_\alpha}$$

4.1.4 Artículo 38.5.3.

En este lineamiento se menciona que se puede utilizar de forma complementaria los parámetros de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) y resistencia a la penetración de cono estático CPT (q_c) de forma complementaria a la evaluación realizada con SPT. Si bien no se le puede restar importancia al SPT, el cual es uno de los ensayos in situ más usados y estudiados en su capacidad de caracterizar las propiedades ingenieriles de un suelo, existe más que suficiente bibliografía que demuestra que los otros dos parámetros mencionados con sus métodos de investigación son más que capaces para realizar la evaluación por licuación por sí solos. Incluso, en el caso del CPT se puede considerar como más confiable que el SPT, debido a su capacidad de muestreo (registro de mediciones), la cual es prácticamente continua.

4.1.5 Artículo 38.5.4.

El artículo señala el uso del a_{\max} para la evaluación por licuación, la cual debería ser congruente con el diseño estructural. Se señalan los mapas de aceleraciones máximas como referencia a usar por el PR. Tanto el mapa de la E.030 *Diseño sismorresistente* como los propuestos por el estudio probabilístico de Tavera et al. (2014) cumplen el rol, siendo el primero el más accesible desde el punto de vista que cumple con el lineamiento de la congruencia estructural y es referencia directa a otra Norma NTE. Más adelante, se discutirá la aplicabilidad de estos mapas mediante sus fundamentos teóricos, cuestión que está directamente asociada al siguiente artículo.

4.1.6 Artículo 38.5.5.

Se menciona la realización de un estudio probabilístico basado en un análisis estadístico de los posibles sismos que puedan ocurrir en un lugar. Esta reglamentación podría implementarse de muchas maneras, puesto que hay estudios probabilísticos que varían en distintos grados, desde los que se basan en la probabilidad de licuación mediante un único valor de a_{\max} hasta los que toman en cuenta la respuesta de la estructura y los posibles daños (cuantificando incertidumbres y tiempos de retorno para desplazamientos), desde los que son entre determinísticos a relativamente probabilísticos hasta los que son puramente probabilísticos. Por lo tanto, se discutirán los procedimientos recomendados para una evaluación probabilística de licuación consistente teóricamente y aplicable en el ámbito ingenieril.

4.1.7 Artículo 38.5.6.

Este artículo propone que el PR calcula la probabilidad de licuación (P_L) empleando los criterios y procedimientos más recientes aceptados por la geotecnia. Considerando la gran cantidad de expresiones para factores como r_d y correlaciones para CRR que son usados hasta el día de hoy (incluso algunas expresiones desactualizadas), este artículo resulta muy

ambiguo en su lineamiento. El cambio de alguno de estos parámetros para la evaluación brinda en ocasiones resultados notoriamente diferentes, lo que hace la interpretación de este artículo no solo dependiente en los mismos procedimientos, sino en el criterio del PR. Por ejemplo, el r_d de Cetin et al. (2000, 2004) incluye un término de desviación estándar que bien podría ser considerado como positivo para un cálculo conservador como no podría ser considerado. Por lo tanto, este artículo debe ser replanteado en su totalidad.

4.1.8 Artículo 38.5.7.

La Tabla 13 de la E.050 hace referencia a “Iwasaki (1984)”. Sin embargo, en el artículo referenciado no hay alguna alusión a este contenido. Cabe preguntarse el origen del contenido de la tabla de la E.050, o el criterio en el que se basa su propuesta.

4.1.9 Artículo 38.6.1.

Este artículo establece la imposibilidad absoluta de cimentar sobre suelos licuables. Por motivos de practicidad esta medida resulta muy lógica. Sin embargo, cabe la pena evaluar si bajo los estudios más recientes (Bray y Macedo, 2017) no existe una situación en la cual un suelo pueda licuar, pero sus efectos inducidos por la licuación sean poco significativos. A su vez, Ishihara (1985), así como se menciona en 2.4.4., estudia los efectos del espesor de un estrato no licuable, directamente bajo la superficie; y el espesor de un estrato licuable inferior. La comprensión de esta relación nos podría ofrecer situaciones en las cuales exista un estrato licuable en el perfil del sitio a estudiar, sin embargo, cuyos efectos en la superficie sean muy poco notables.

4.1.10 Artículo 38.6.4.

Este artículo establece que, de ser necesario mejorar el suelo para alcanzar condiciones satisfactorias, el PR debería proponer las técnicas de mejoramiento a ser planteadas. Este enunciado podría recibir especificaciones adicionales, incluyendo listar algunas de las

técnicas de mejoramiento de suelos más aceptadas en la actualidad. Algunas de estas son: *soil nailing*, columnas de grava, vibrocompactación, compactación por explosivos, entre otros. Actualmente se está realizando trabajos de investigación en métodos relacionados al mejoramiento de suelos, como lo es el uso de biopolímeros, que se espera que eventualmente sean incluidos en este apartado. Frente a la inclusión de un apartado de mejoramiento de suelos, cabe indicar la ausencia de normativa específica para su implementación en la cual basarse. Solo existen manuales referenciales con recomendaciones sobre el procedimiento constructivo y ejecución como el manual del *Federal Highway Administration (Ground Modification Methods Reference Manual – Volume I y II)*. A su vez, el Código de Cimentaciones de Costa Rica (2009) incluye un resumen sobre los distintos métodos y sus campos de aplicación.

4.1.11 Sismo de diseño en licuación

La NTE E.050 carece de lineamientos precisos sobre las características del sismo al que se someterá el suelo, sea M_w o a_{max} . Lo más sensato resultaría establecer un estándar de uso y posiblemente un ajuste. A su vez, el uso de una magnitud momento M_w asociada a tal aceleración máxima no es mencionado, a pesar de ser necesario. La norma E.050 actualmente no incluye lineamiento alguno respecto al M_w a utilizar. Más adelante, en el capítulo de discusión de problemáticas, se ahondará en los fundamentos en los cuales los mapas probabilísticos se basan y en cuál resulta la elección de sismo de diseño (pares a_{max} - M_w) adecuada para la evaluación de licuación, desde el punto de vista teórico.

4.1.12 Factor de participación de masa corte no lineal (r_d)

De acuerdo a lo propuesto a la NTE E.050, se infiere que el r_d a utilizar es el presentado por Cetin (2000) y Cetin et al. (2004). Es de importancia constatar bajo la discusión geotécnica si no hay alguna correlación más actualizada para utilizar en la E.050 e interpretar las diferencias entre las correlaciones de mayor uso en la geotecnia actual, así como tener en

cuenta los parámetros necesarios para el cálculo. Esto es, porque los valores obtenidos en una correlación pueden diferir de los obtenidos con otra.

4.1.13 Los métodos geofísicos

En los últimos años, los ensayos geofísicos o indirectos han cobrado relevancia como métodos complementarios de exploración del suelo y en la comprensión de sus propiedades. Códigos nacionales como el español (Código Nacional de la Edificación), el mexicano (Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones), costarricense (Código de Cimentaciones de Costa Rica), entre otros, incluyen la utilización de los ensayos geofísicos en su desarrollo, de manera que su uso complementario permite mejorar la caracterización geotécnica de un sitio, tanto para propiedades como el módulo de rigidez al cortante (G), la velocidad de transmisión de ondas de corte (V_s) o la caracterización estratigráfica. Algunos de los ensayos geofísicos más importantes se listan a continuación:

- Ensayo MASW
- Ensayo *Down Hole*
- Ensayo *Cross Hole*
- Ensayo de refracción sísmica
- Ensayo SCPT (cono sísmico)
- Geo-radar
- Resistividad eléctrica
- Ensayos MAM
- Microtremores

La utilización de los ensayos geofísicos a través de la NTE E.050 es muy limitado. Por un lado, el capítulo de Técnicas de Exploración de Campo para ITS y EMS (Artículo 14) no

menciona en ningún apartado su uso. Esto quiere decir que no hay normativa alguna que estandarice su uso, en caso de querer realizar alguno de estos ensayos.

En el caso particular del capítulo de licuación (Artículo 38), los ensayos geofísicos son mencionados (Artículos 38.4.4. y 38.5.3, Figura 11), aunque solo en el caso de la velocidad de ondas de corte. Se entiende que su uso es válido en dos ámbitos. Primero, como ensayo complementario al SPT se puede usar la velocidad de ondas de corte V_{s1} (corregido) para calcular el potencial de licuación. Y segundo, se considera en el V_{*s12m} , parte de la fórmula de r_d (EERC, 2004), proveniente de los estudios de Cetin (2000) y Cetin et al. (2004).

En paralelo, la velocidad de ondas de corte se utiliza para hallar el parámetro de tipo de suelo, necesario para el análisis sísmico de una estructura. Esto compete a la NTE E.030 *Diseño Sismorresistente*, pero vale la pena mencionar puesto que haría la realización del ensayo geofísico obligatoria para cada proyecto. A continuación, se presenta la tabla que determina el tipo de suelo por la velocidad de ondas de corte hasta los 30 metros, y a su vez, los N-SPT hasta dicha profundidad:

Tabla 14. Clasificación de perfiles de suelo (Norma E.030)

Clasificación de los perfiles de suelo			
Perfil	V_s	N_{60}	S_u
S0	>1500 m/s	-	-
S1	500 m/s a 1500 m/s	>50	>100 kPa
S2	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S3	<180 m/s	<15	25 kPa a 50kPa
S4	Clasificación basada en el EMS		

Fuente: NTE E.030 (2018)

En este caso (suelo potencialmente licuable) se tienen varias posibles opciones. Descartamos el ensayo a compresión simple (parámetro s_u) puesto que nos centramos principalmente en suelos granulares. En primer lugar, una opción es el realizar el ensayo SPT en una perforación que alcanza los 30 metros de profundidad. De esta manera se puede clasificar directamente el perfil de suelo. A pesar de que el ensayo SPT sea el más usado,

usado en casi todos los proyectos, el alcanzar una perforación de 30 metros de profundidad resulta usualmente muy costoso. Y más aún si se consideran múltiples puntos de exploración. Incluso si se considera un suelo licuable, el requisito de exploración de la norma es de 15 metros de profundidad. Esto es la mitad de lo que sería necesario para clasificar el suelo por N_{60} . Dada la imposibilidad o inconveniencia de realizar perforaciones tan profundas es que surgen dos posibles opciones. Una de ellas es la de realizar los SPT ya planificados (con la profundidad de perforación especificada en la exploración) y asumir el restante, o trabajar con el promedio hasta dicha profundidad y extrapolar. Esto puede resultar riesgoso al trabajar sobre suelos heterogéneos, lo que significa que es dependiente del buen criterio del PR.

Para el caso en el que se decida usar solo ensayos SPT (asumiendo que ya se tiene solucionada la clasificación del perfil de suelo), la velocidad de ondas de corte también será de necesidad, puesto que el parámetro r_d lo incluye en su desarrollo (EERC, 2004). Ante esto, surgen tres posibles alternativas:

- Asumir el V_s : Tomar un valor arbitrario de V_s .
- Utilizar correlaciones entre N y V_s : El uso de correlaciones resulta solo fiable de haberse desarrollado una correlación local, con un amplio conjunto de datos que la respalde. En el Perú, existen tan solo algunas correlaciones entre N -SPT y V_s desarrolladas, por ejemplo, en las arenas eólicas de Olmos (Alhuay-León y Trejo-Noreña, 2021) o en las arenas de Juliaca (Alata, Zevillanos, & Durán, 2020). De usarse una correlación no correspondiente al área a evaluar, se debe mantener precaución (Dikmen, 2009). Ante esto, se puede considerar un análisis de sensibilidad que ilustre cuánto efecto tiene la variación de V_{s12m} en el r_d obtenido.
- Utilizar otra versión de r_d : Implicaría simplificar el problema, ya que fórmulas como la de Liao y Whitman (1986) representan el r_d linealmente y solo en función de la profundidad, de tal modo que no se necesita V_s . Sin embargo, esto iría en contra de

las correcciones y ampliación de la comprensión que se adquiere a través de los años sobre los factores de influencia en r_d , lo que hace esta opción contraria a lo que se está buscando en esta tesis.

Frente a esta problemática es que el uso de ensayos geofísicos para la medición de velocidad de ondas de corte resulta altamente conveniente, y resulta inconsistente y hasta contradictorio que pese a formar parte de una considerable cantidad de proyectos se siga relegando su uso en la E.050 como de meramente complementario. Incluso, a día de hoy se cuenta con la bibliografía necesaria como para efectuar evaluaciones de licuación tan solo utilizando métodos geofísicos (como se ve en 2.2.5). La motivación para esto puede ser explicada desde el solo hecho de existir disponibilidad, conveniencia económica o preferencia, hasta la incapacidad de realizar los sondeos SPT en algunas localidades lejanas y poco accesibles, como en la selva. Los equipos para ensayos geofísicos son prácticos y de fácil transporte comparativamente con los equipos usuales y tradicionales para evaluar estos casos, tales como equipos para ensayos de Ensayos de Penetración Estándar - SPT y ensayos de penetración de cono - CPT (Rengifo, 2023).

Respecto a la normativa sobre ensayos geofísicos, es de amplio conocimiento su necesidad en la propuesta de la NTE E.050. Solorzano (2023) presenta un estudio integral sobre los diversos ensayos geofísicos y un esquema en el que clasifica a tales en dos tipos: aquellos que brindan respuesta lineal y aquellos que brindan respuestas de área. Ambos tipos de ensayos serían incluidos en las tablas correspondientes de técnicas de exploración y aplicación de los ensayos de la NTE E.050. A continuación, se presentan las técnicas de exploración geofísicas a incluirse con sus normativas respectivas:

Tabla 15. Propuesta de métodos de exploración geofísicos con su normativa

Descripción ensayo geofísico	Procedimiento aplicable
SUELOS. Guía estándar para Caracterización del sitio para propósitos de diseño y construcción de ingeniería.	ASTM D420-18
SUELOS. <i>Standard Guide for Planning and Conducting Geotechnical Borehole Geophysical Logging</i> (Planificación y realización de registros geofísicos en boreholes o sondeos geotécnicos).	ASTM D5753
<i>Standard Test Methods for Down-hole Seismic Testing</i> (Ensayo down-hole)	ASTM D7400/ D7400M-19
<i>Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing</i> (Ensayo cross-hole)	ASTM D4428/ D4428M-14
<i>P-S suspension logging</i>	GEOVision (2006)
<i>Standard Guide for Using the Seismic-Reflection Method for Shallow Subsurface Investigation</i> (Uso del Método de Sísmica de reflexión para investigaciones superficiales)	ASTM D7128-18
<i>Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation</i> (Uso de refracción sísmica para investigación superficial)	ASTM D5777-18
<i>Multichannel Analysis of Surface Waves</i> (MASW, Análisis multicanal de ondas de superficie)	Park et al. (1999)
<i>Refraction Microtremor ReMi</i> (Microtremores o microtrepidaciones)	Louie (2001)
<i>Seismic Tomography</i> (Tomografía sísmica)	Sheehan J.R. (2005)
<i>Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Site Characterization</i> (Uso de la Tomografía de Resistividad eléctrica para la caracterización superficial de sitio)	ASTM D6431-18/ IEEE STD 81
<i>Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation</i> (Uso del Georradar para investigaciones superficiales de suelo)	ASTM 6432-19
<i>Microtremor Array Measurement</i> (MAM, Medición de microtremores em arreglos multicanal)	Okada, H (2003)
<i>Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Soil and Soil-Aggregate In-Place by Electro-Mechanical Method</i> (método SASW)	ASTM D6758 Nazarian y Stokoe (1984)
<i>Standard Guide for Using the Gravity Method for Subsurface Site Characterization</i> (Guía estándar para el uso del método gravitacional para la exploración subterránea - Método de gravimetría)	ASTM D6430-18
<i>Standard Guide for Use of the Time Domain Electromagnetic Method for Subsurface Site Characterization</i> (Guía estándar para el uso del Método electromagnético para la exploración subterránea)	ASTM D6820

Fuente: Solórzano (2023)

Tabla 16. Alcances de los ensayos geofísicos

Ensayos geofísicos con respuesta lineal				
Ensayo geofísico	Norma Aplicable	Técnica de exploración	Tipo de suelos	Parámetro a obtener
<i>Down-hole</i>	ASTM D7400/ D7400M-19	Un sondeo	Todos	V_p , V_s , G
<i>Crosshole</i>	ASTM D4428/ D4428M-14	Dos o más sondeos	Todos	V_p , V_s , G
P-S Logging	GEOVision (2006)	Un sondeo	Recomendado para suelos blandos	V_p , V_s , G
Tomografía de resistividad eléctrica	ASTM D6431-18/ IIEE STD 81	Sondeos	Todos	Resistividad aparente Ωm
Ensayos geofísicos con respuesta de área				
Sísmica de reflexión	ASTM D7128-18	Arreglo lineal	Todos	V_p
Sísmica de refracción	ASTM D5777-18	Arreglo lineal	Todos	V_p
MASW	Park et al. (1999)	Arreglo lineal	Todos	V_s
Microtremores o microtrepidaciones	Louie (2001)	Arreglo lineal	Todos	Períodos predominantes de vibración natural T_s y factores de ampliación sísmica
Tomografía sísmica	Sheehan J.R. (2005)	Arreglo lineal	Todos	V_p , V_s
Tomografía de resistencia eléctrica	ASTM D6431-18/ IIEE STD 81	Mediante una serie de electrodos	Todos	Resistividad aparente Ωm
Georadar o GPR	ASTM 6432-19	Arreglo lineal	Todos	Velocidad de onda en el medio
MAM	Okada, H (2003)	Arreglo lineal	Todos	V_s
SASW	-	Arreglo lineal	Todos	V_s

Fuente: Solórzano (2023).

4.1.14 Índices propuestos para el estudio de severidad de licuación

Como se ha visto previamente, diversos índices se han planteado para la caracterización de la vulnerabilidad de licuación de un sitio. Estos indican la susceptibilidad del sitio y los potenciales efectos de la licuación, de forma resumida. Su uso es conveniente tanto para trabajos de caracterización y zonificación de riesgos (Nilay, Chakraborty, y Popescu, 2022). Por lo tanto, proponer el uso de alguno de estos índices en la norma resulta apropiado en la práctica ingenieril. Se presenta la necesidad de proponer uno que prime sobre los otros, de acuerdo a su aplicabilidad y eficacia.

4.1.15 Curvas actualizadas de CRR

Tras la revisión de la literatura realizada, es necesario proponer correlaciones actualizadas para la evaluación de licuación. Estas correlaciones son preferibles a las existentes puesto a que han sido desarrolladas en base a conjuntos de datos mayores, criterios de peso de acuerdo a la fiabilidad de la información de los casos históricos, mejor selección de datos y tipos de perfiles de suelo, entre otros.

4.1.16 Incongruencia entre valores de FS_L y P_L (determinístico y probabilístico), e insuficiencia de tales parámetros para controlar el riesgo

En el planteo de curvas de CRR probabilísticas, es usual que los autores propongan equivalencias entre P_L y FS_L para entrelazar el uso de ambos términos, de modo que se pueda usar ambos de forma intercambiable (Cetin et al., 2018; Juang et al., 2003; entre otros). Por poner un ejemplo, Cetin et al. (2018) proponen las siguientes equivalencias:

Tabla 17. Asociación entre potencial de licuación y factor de seguridad

P_L	FS_L
5%	1.5
20%	1.2
50%	1.0
80%	0.8
95%	0.7

Fuente: Cetin et al. (2018a)

Otro ejemplo es lo propuesto en Kayen et al. (2013), en el cual se asevera que un FS_L de 1.17 corresponde al P_L de 15% y un P_L de 50% corresponde a un FS_L de 1. Los autores recomiendan el uso del P_L de 15% para el uso de esta correlación.

El límite de P_L propuesto por la E.050 a través de varios de sus artículos (38.6.1-38.6.4) es de 10%. Tal es un potencial arbitrario, por el propio criterio personal de los integrantes del comité (presentado en la tabla mencionada en 4.1.5). Por lo visto, este P_L de 10% correspondería a un FS_L de aproximadamente 1.4, lo que es superior a cualquiera de los

vistos en la NTE E.050, y actúa como P_L único, opuesto a lo presentado en la Tabla 13A (E.050), que divide al FS por tipo de edificación. En esta situación, lo adecuado aparentemente sería relacionar a P_L y FS_L con una equivalencia, tal que se flexibiliza el uso y concepto de ambos, y adoptar valores mínimos diferentes de cada uno de acuerdo al tipo de edificación (A, B y C). Sin embargo, este planteamiento ignora que el riesgo de licuación es un fenómeno que no solo depende del P_L o FS_L establecido como límite mínimo, puesto que parte del fenómeno sísmico. Dado a la falta de lineamientos concretos sobre a_{max} y M_w (sismo de diseño), mencionado en 4.1.12, es falaz asumir que el P_L es suficiente para controlar el riesgo de licuación existente. De no cumplir con el P_L requerido, el PR podría valerse de resultados de a_{max} y/o M_w convenientes (usando un mapa de aceleraciones de T_R menor, por ejemplo), lo que refleja un vacío considerable en la reglamentación actual. Por lo tanto, lo apropiado sería establecer límites mínimos para ambas partes, tanto el sismo como el FS o P_L .

4.1.17 Otras observaciones

Las curvas incorporadas en la NTE E.050 fueron traducidas para ser consistentes con el resto del contenido de la misma. En tal objetivo, se ha cometido algunos errores considerables. Por ejemplo, la curva de Andrus y Stokoe (1997) incorpora la fórmula para el cálculo de CRR mediante V_{s1} . La versión adaptada para la NTE E.050 cuenta con la fórmula mal redactada, en la que no distingue la velocidad normalizada de ondas de corte V_{S1} de la velocidad límite V^*_{s1} . Del mismo modo, las curvas de CRR en base a $(N_1)_{60}$ muestran condiciones para un contenido de finos “menor igual a 5%”. Por sentido común (el hecho que se consideren contenidos de finos de 15% y 35%) y la misma fuente, aquí debería mostrarse “mayor igual a 5%”.

4.2 Discusión de problemáticas planteadas

A partir de las recomendaciones previas y el criterio personal basado en las prioridades a tener en cuenta en el desarrollo de una norma técnica, las recomendaciones sobre la norma

vigente se realizarán en torno a los siguientes principios deseables, que gobernarán los fundamentos racionales detrás de las propuestas de mejora a idearse:

- Seguridad: Es un criterio fundamental, pues de esta depende la vida de las personas y la integridad de la edificación. Se buscará mantenerla inalterada y, de ser posible, mejorarla en base a los últimos desarrollos en el estado del arte actual. Al abarcar metodologías más completas y actualizadas, y que abarquen la más amplia variedad posible de criterios que influyen el análisis en un tema tan complejamente empírico, se considera que se actúa a favor de un análisis que refleja la realidad más fiablemente. Esta situación se alinea a menudo con el concepto de la seguridad. En este principio también se cuenta la utilización de Factores de Seguridad o criterios de esta índole.
- Practicidad: Referido a el rango de opciones otorgado al Profesional Responsable para actuar y proponer la campaña geotécnica. La practicidad busca no abarcar cálculos altamente complejos (o al menos sin justificación) o solicitar parámetros de compleja obtención, o que requieran un alto número de ensayos y muestras. Esto último está estrechamente relacionado con el ámbito económico. Se debe mantener precaución a la hora de imponer requisitos de esta índole.
- Exactitud: En base a lo propuesto por Kavazanjian et al. (2022), es necesario mantener determinada consistencia metodológica, con el fin de no generar márgenes de error o incertidumbres amplificadas o de fuentes desconocidas.
- Aplicabilidad: Es importante que las medidas a recomendar abarquen el estudio de un amplio rango de perfiles de suelos, incluyendo consideraciones para perfiles de características heterogéneas y estratos con contenidos de finos variados. Asegurar una alta aplicabilidad reducirá el error considerablemente y

es fundamental para la correcta interpretación de los cálculos de potencial de licuación.

- Claridad: Se toma como principio el minimizar o eliminar totalmente lineamientos que puedan resultar ambiguos o poco claros, que puedan conducir a malentendidos.
- Ajuste a la realidad peruana: Se debe mantener los conceptos y medidas propuestas en concordancia con las necesidades y condiciones existentes en el país. Para esto se tomará en cuenta el riesgo, resultado del peligro (sismicidad) y vulnerabilidad (propiedades del suelo), así como se tomará en cuenta el uso de determinados ensayos sobre otros.

4.2.1 Evaluación de licuación por ensayos geofísicos

A continuación, se presentan las correlaciones desarrolladas para los CRR basados en el parámetro de velocidad de ondas de corte, con sus descripciones respectivas. Como se puede ver, la curva de Kayen et al. (2013) es aquella cuyo planteamiento abarca mayor riqueza de datos, excediendo considerablemente a aquellas de Andrus y Stokoe (1997, 2000). Por lo tanto, es plausible proponer su uso en la NTE E.050. La correlación de Rollins et al. (2022), por su parte, es planteada con datos de sitios gravosos, para cuales situaciones podría ser usada.

Tabla 18. Tabla resumen de correlaciones de CRR por ensayos geofísicos

CRR propuesto	Descripción
Andrus y Stokoe (1997, 2000)	Elaborado a partir de más de 70 puntos en suelos de diferentes perfiles, desde gravas arenosas hasta arcillas limosas. Se tomó información histórica de 26 terremotos.
Zhou y Chen (2007)	Elaborado a partir de 291 arreglos de datos de 34 tipos de suelos arenosos, mediante ensayos de laboratorio (triaxiales cíclicos).
Cao et al. (2011)	Elaborado a partir de 47 sitios gravosos, tras el sismo de Wenchuan, China de 2008.
Kayen et al. (2013)	Elaborada a partir de mediciones de V_s en 422 sitios, los cuales constituyen la mayoría de observaciones de licuación desde 1948 hasta 2011.
Rollins et al. (2022)	Elaborado a partir de 174 puntos de gravas obtenidos de 17 terremotos.

Fuente: propia.

4.2.2 Evaluación probabilística de sismos en el método simplificado por esfuerzos

4.2.2.1 Parámetros de sismo de diseño en la práctica actual

Los procedimientos que conllevan la realización del método simplificado basado en esfuerzos requieren de dos variables que, en teoría, representan las características de la demanda sísmica inducida sobre el suelo. Estos son $a_{m\acute{a}x}$ y M_w . El primero de estos términos se utiliza en la ecuación simplificada de CSR, mientras que M_w repercute en el factor de escala de magnitud MSF y en el r_d propuesto por Cetin et al. (2000).

En la práctica actual, la determinación de los valores de estas dos variables es asignada al profesional responsable (en el caso de M_w , la NTE E.050 no incluye pauta alguna). En el caso de $a_{m\acute{a}x}$, se recomienda el uso de mapas de aceleraciones máximas basadas en estudios probabilísticos y en congruencia con los valores empleados en el diseño estructural. Siguiendo esta pauta, el mapa predominante en la práctica actual es el incluido en la Norma E.030 *Diseño Sismorresistente*, mostrado en la Figura 9, el cual divide al territorio nacional en 4 zonas sísmicas. Más completos en información son los mapas presentados por Tavera et al. (2014), quienes a partir de un estudio probabilístico del Perú con el algoritmo CRISIS obtienen dos mapas de curvas de isoaceleraciones, orientadas en la dirección de la subducción entre la placa de Nazca y la sudamericana: de 10% de excedencia para un tiempo de exposición de 50 años ($T_r=475$ años) y de 10% de excedencia para un tiempo de exposición de 100 años ($T_r=975$ años). Este estudio está basado en la recopilación de información de sismicidad histórica (del siglo XV hasta inicios del siglo XX, basada en lo recopilado por cronistas) y sismicidad instrumental (aproximada de 1900 a 1960, de alta precisión del 1960 hasta 2012). La aceleración incluida en estos mapas de peligro sísmico se trata de una aceleración máxima media en suelo firme, sin contar los efectos de sitio. Desde la misma publicación se recomienda que en el estudio del peligro sísmico en obras de gran envergadura se consideren estudios específicos (interacción suelo estructura y efectos de

sitio). La publicación de Aguilar y Tarazona (2024) propone la caracterización sísmica más reciente para el territorio peruano, la cual incorpora conceptos sismológicos y tectónicos. De esta resultan dos mapas de aceleraciones máximas, de tiempos de retorno de 475 años y de 2475 años. Respecto a mapas previos, Aguilar y Tarazona (2024) estiman aceleraciones máximas alrededor de 20% mayores en la zona norte del Perú (departamentos de San Martín y Amazonas), alcanzando hasta 46% mayor cerca de la frontera de Ecuador: principalmente dado que se incluye una fuente sismogénica cortical adicional.

4.2.2.2 Metodologías de evaluación de peligro sísmico

De la revisión bibliográfica, dos metodologías principales mediante las cuales los mapas de aceleraciones máximas han sido desarrollados —útiles para la evaluación por licuación— sobresalen, y es importante comprender sus fundamentos para comprender las diferencias en los resultados entre sí.

- **Análisis probabilístico de peligro sísmico:** Consiste en caracterizar las fuentes sísmicas existentes, asignarle parámetros de sismicidad a partir del catálogo sísmico (ley de Gutenberg-Richter) y mediante cómputo se obtiene de estas una aceleración máxima para cada punto, esto a partir de leyes de atenuación (permite obtener aceleración en un sitio de estudio a partir de una fuente sísmica). Este método es puramente estocástico. Los mapas más usados en la práctica ingenieril en Perú han sido desarrollados mediante este método.
- **Métodos de acoplamiento sísmico:** Mediante el monitoreo de desplazamientos entre los puntos de convergencia de placas, se estima la energía liberada en un escenario sísmico específicos. Pulido et al. (2012) proponen esta metodología para el escenario de la costa peruana en vista de que el análisis de peligro sísmico basado en catálogos sísmicos puede no cumplir adecuadamente su fin, como en el terremoto de Tohoku

del 2011 (M_w 9.0), cuyo epicentro fue en una zona donde no se esperaba un megaterremoto (Pulido et al., 2015). Como desventaja notable, la información existente para uso ingenieril, particularmente, para la evaluación de potencial de licuación, es escasa. Solo existe un mapa de aceleraciones publicado mediante esta metodología, correspondiente a Lima, en un escenario sísmico con M_w de 8.8 y correspondiente a la zona de máximo acoplamiento sísmico (ZMAS) de la costa central. En el caso de tal, se considera un periodo intersísmico que parte del mega terremoto de 1746. Este es un escenario crítico, con aceleraciones máximas que alcanzan hasta 0.9g (véase la Figura 48). Adicionalmente, existen mapas de intensidades (MM) para las cinco zonas de máximo acoplamiento sísmico costeras caracterizadas por Condori y Tavera (2012), publicados por el IGP, de cierta utilidad, pero sin la información suficiente para su aplicación en el análisis de licuación. Adicionalmente, Condori y Tavera (2012) atribuyen a cada ZMAS una posible magnitud momento.

4.2.2.3 Inconsistencias en el uso de a_{\max} únicos en evaluación probabilística

La evaluación del potencial de licuación mediante el método simplificado basado en esfuerzos implica el uso de pares a_{\max} - M_w , es decir, no basta con la aceleración máxima obtenida por un PSHA. En la práctica actual, se emplea un valor representativo de M_w (a criterio del geotecnista), el que conjugado con el a_{\max} único del PSHA permite realizar la evaluación. De no escoger alguna magnitud momento referencial, en este caso resulta plausible hacer uso de una magnitud momento única obtenida por una ley de atenuación (o movimiento de suelos) a la inversa, planteada para evaluación de eventos sísmicos singulares, partiendo de la a_{\max} única obtenida del PSHA (que superpone las diversas fuentes sísmicas). Esto resulta teóricamente inconsistente y puede ocasionar incertidumbres considerables. Dickenson (2005) señala que tal a_{\max} no es representativo de ninguna de estas fuentes

sísmicas de por sí; es decir, por separado (en oposición al alcance de las leyes de atenuación). Dickenson (2005) estima la diferencia entre esta a_{\max} promedio y la a_{\max} obtenida para un escenario sísmico específico (leyes de atenuación) como de hasta 20% (estimadas en la costa oeste de EE.UU.), e incluso podría incluso exceder tal valor. Tavera et al. (2014) caracterizan en el territorio peruano 33 fuentes sísmicas: 8 son asociadas al proceso de subducción (interfase), 10 asociadas a sistemas de fallas (corticales) y 13 asociadas a la geometría de la placa de Nazca bajo el continente (intraplaca). Estas tres categorías presentan a menudo efectos superpuestos espacialmente, causantes de una considerable complejidad que repercute en el cálculo del a_{\max} promedio mencionado, y es consistente con las incertidumbres señaladas por Dickenson (2005). Youd et al. (1997), y más recientemente, Kavazanjian et al. (2022) recogen esta idea en sus publicaciones, de las cuales se desprenden recomendaciones puntuales. La evaluación puede ser clasificada en tres modalidades, en las cuales se ahondará en la subsección siguiente.

4.2.2.4 Escenario de sismo único

Escenario único, en base a un par a_{\max} y M_w elegidos por criterio del geotecnista. Su realización requiere de poca intensidad de cómputo y resulta fácil de realizar. Sin embargo, no representa con confianza el riesgo sísmico y requiere de una elección sensata por parte del PR para su correcta realización. A través del territorio peruano, es usual el evaluar sitios afectados por múltiples fuentes sísmicas simultáneamente, por lo que la fiabilidad de este procedimiento se reduce. Finalmente, mediante este método aplicado en la práctica se suele escoger como valor representativo de M_w un valor promedio o modal. Una vez más, esta elección es responsabilidad del PR, y suele contar con incertidumbres considerables.

4.2.2.5 Desagregación de datos de riesgo sísmico

La desagregación de riesgo sísmico refiere a un análisis computacional que desagrega para un determinado sitio, y una a_{\max} con determinado T_R (T_R único), las magnitudes sísmicas que contribuyen a la determinación probabilística de tal a_{\max} , así como la distancia de la fuente al sitio. En la Figura 44 se muestra un esquema que ilustra este proceso paso a paso mediante la plataforma de *USGS Hazard Tool*, la cual tiene integrada modelos de riesgo sísmico y la capacidad de efectuar tales desagregaciones. Los pasos son los siguientes: (a) En primer lugar, se introducen los datos de localización del sitio de estudio, el modelo sísmico deseado, la aceleración de interés (PGA), el período de retorno para el cual efectuar la desagregación y el perfil de suelo esperado (clasificado por V_s). (b) A continuación, se efectúa la desagregación en la pestaña correspondiente, en la cual se obtiene un gráfico con los siguientes ejes: distancia de la ruptura hasta el punto de estudio (km), magnitud del sismo (M_w) y el porcentaje de contribución al riesgo sísmico. Asimismo, se indica la a_{\max} correspondiente (a usar para la evaluación de potencial de licuación). Esta desagregación se puede realizar con la ley de movimiento de suelo escogida por el PR. (c) Se descarga el reporte de desagregación (formato de texto), se carga en una hoja de cálculo y se procede a sumar las contribuciones de riesgo sísmico correspondiente a cada uno de los intervalos de magnitud identificados. (d) Ya teniendo la contribución correspondiente a cada intervalo de magnitud sobre el riesgo sísmico total, se realiza un promedio ponderado sobre el FS obtenido por evaluación de potencial de licuación, el peso es la contribución al riesgo sísmico por intervalo.

(a) Input

Herramienta de riesgo sísmico de United States Geological Survey
<https://earthquake.usgs.gov/hazards/interactive/>

Please also see the new [USGS Earthquake Hazard Toolbox](#) for access to the most recent NSHMs for the conterminous U.S. and Hawaii.

Earthquake Hazard and Probability Maps

Input

Modelo de riesgo sísmico. Integra un catálogo de sismos pasados, leyes de atenuación basadas en los tipos de falla, profundidad, entre otros.

Edition: Dynamic: Conterminous U.S. 2014 (unknown)

Spectral Period: Peak Ground Acceleration

Time Horizon: 2475

Latitude: 33.428

Longitude: -120.059

Site Class: D30 m/s (D/E boundary)

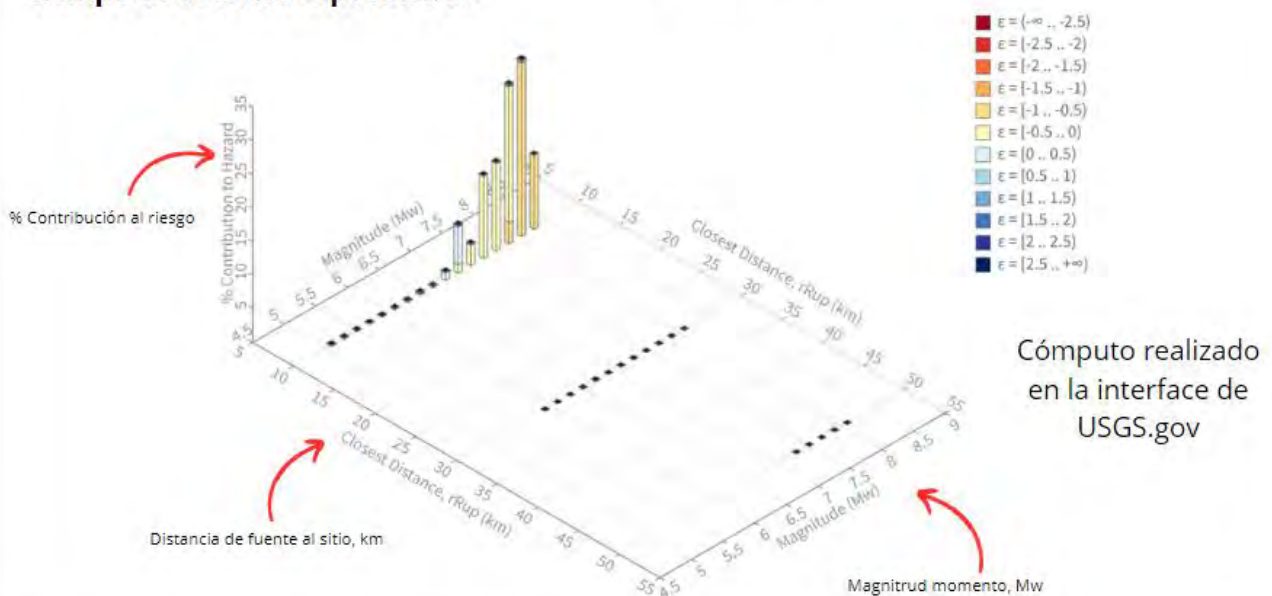
Ubicación geográfica de sitio a evaluar

Tipo de período a considerar. Para análisis de licuación sería apropiado PGA (equivalente a período estructural de 0s)

Tiempo de retorno: incluye prob. de excedencia para tiempo de exposición. Para congruencia con el diseño sismorresistente, se emplearía el de 475 años.

Perfil de suelo, permite ajustar amax de la calculada en suelo firme para tomar en cuenta que la evaluación de licuación no es para tal, sino para un suelo de diferentes características.

(b) Desagregación de datos de riesgo sísmico para amax correspondiente a tiempo de retorno especificado



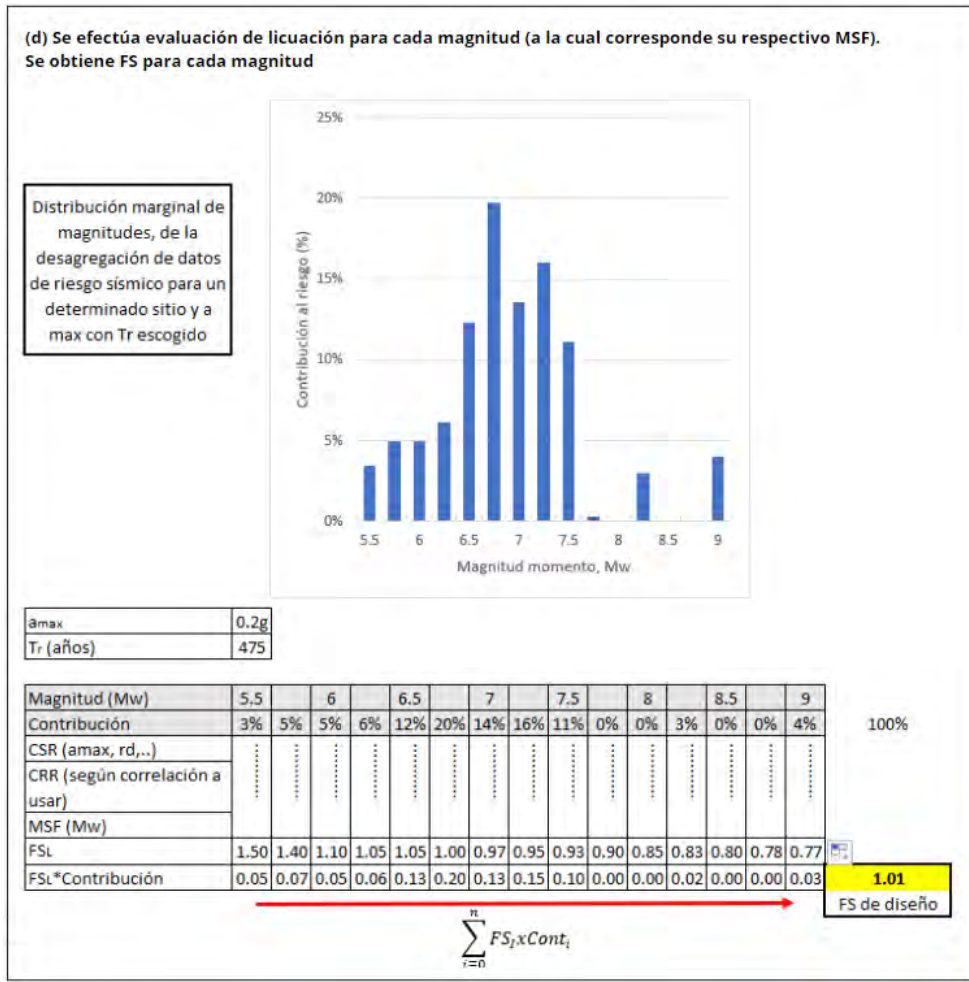
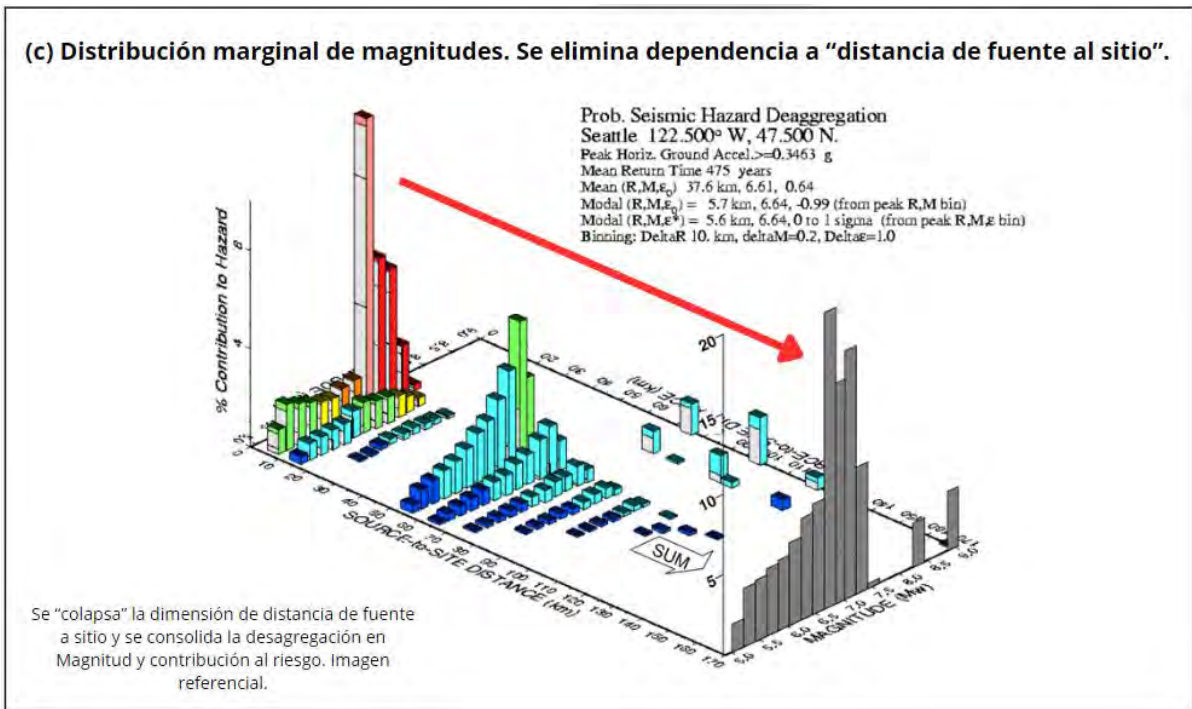


Figura 44. Procedimiento recomendado por Kavazanjian et al. (2022) para evaluación de licuación tomando en cuenta la contribución de todas las magnitudes posibles para una a_{max} resultante de un estudio probabilístico. Cabe mencionar que el FS mencionado en (d) es aquel FS mínimo en el estrato crítico. El cómputo del PSHA y la desagregación fueron hechos en el portal de USGS.gov

4.2.2.6 Evaluaciones performance-based

El enfoque basado en rendimiento (*performance-based*), cuyo marco teórico parte del PEER (*Pacific Earthquake Engineering Research*), considera las distribuciones de magnitud en todos los tiempos de retorno existentes, y cuenta con el objetivo de atribuir a variables de daño en aplicaciones de ingeniería (deflexiones, asentamientos, entre otros) probabilidades de excedencia, así como enfocar las incertidumbres desde un enfoque probabilístico formal. Según la aplicación propuesta por Kramer y Mayfield (2007), esto se realiza mediante curvas de riesgo, las que dependen de medidas de intensidad (M_w y a_{max}), pasando por curvas de fragilidad con un parámetro de demanda ingenieril asignado (N-SPT requeridos o FS_L), obteniéndose curvas de riesgo de tales parámetros de demanda (es decir, se obtienen sus tasas anuales de excedencia). Se ilustra de forma breve este procedimiento en la Figura 45. De tal manera, el resultado final es el de curvas de FS_L para distintos tiempos de retorno. En la Figura 47 se muestra un ejemplo del resultado obtenido por este método, efectuado para un perfil idealizado de arenas limpias en Seattle.

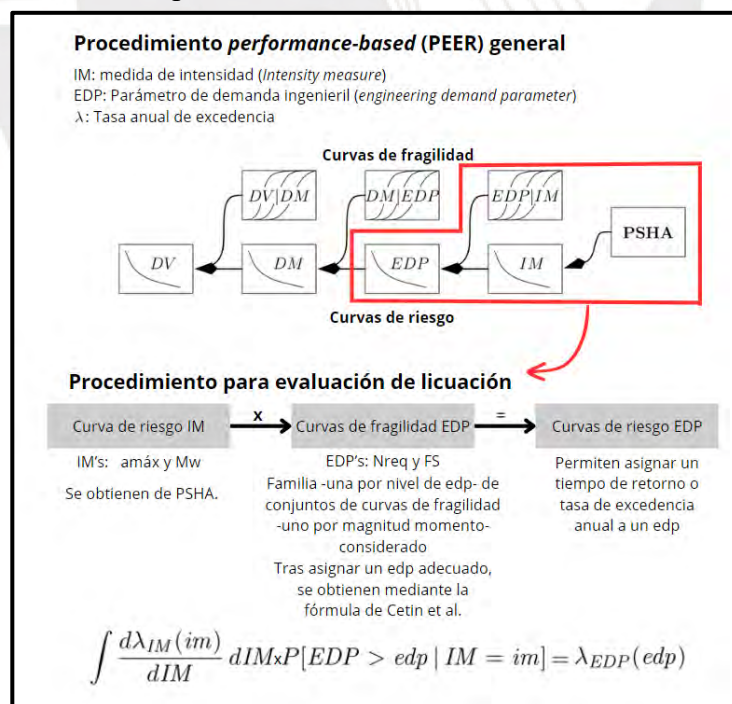
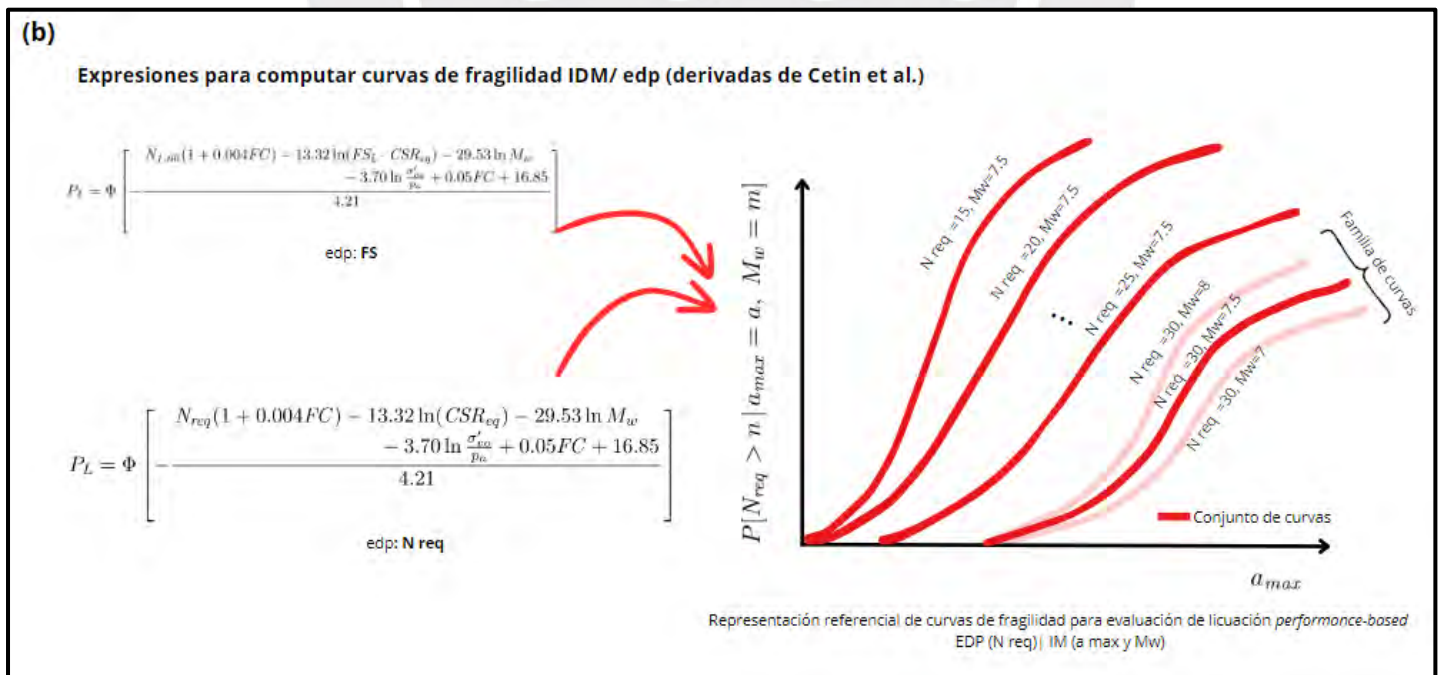
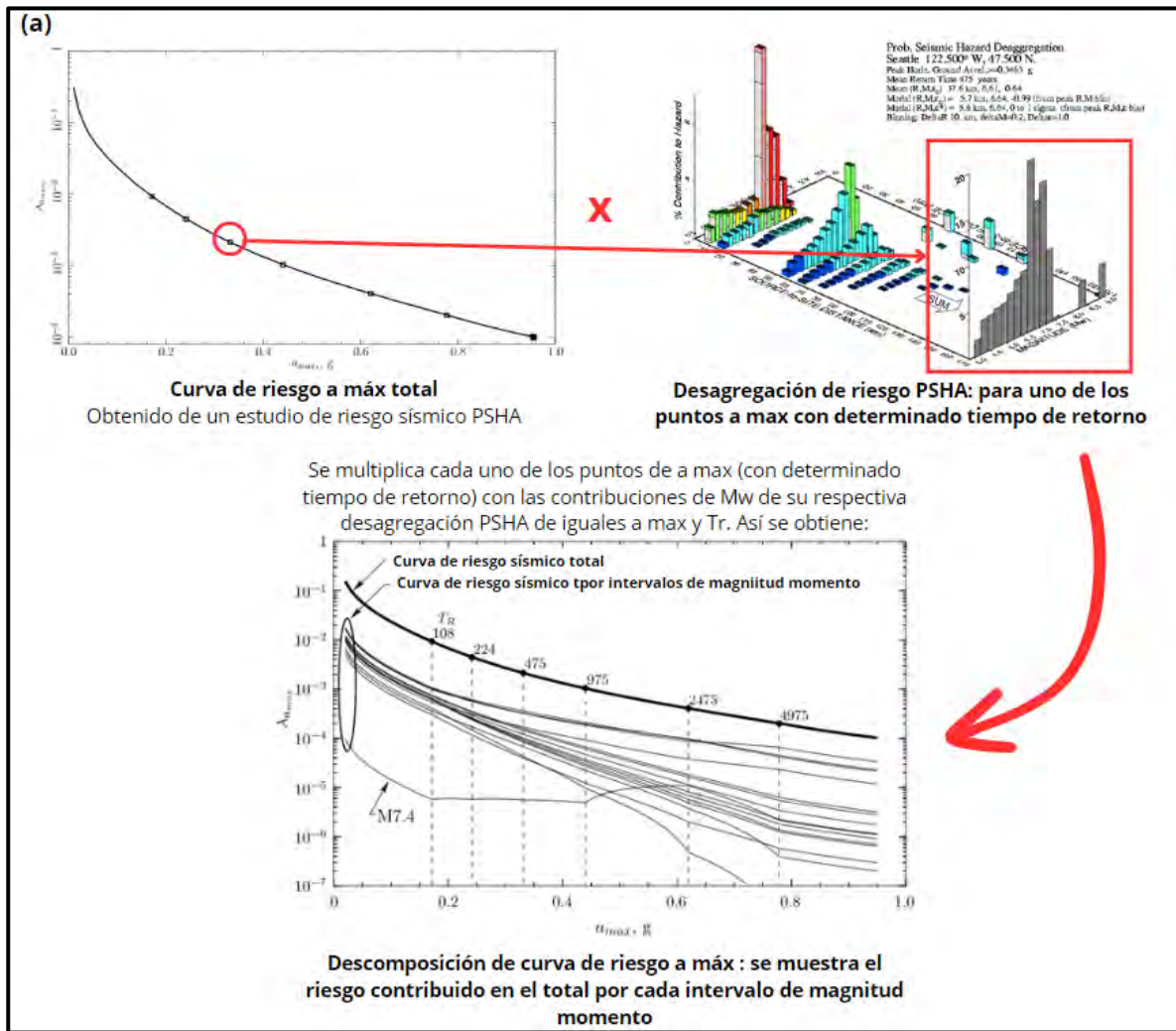


Figura 45. Resumen de método *performance-based*, tanto uso general como aplicación para evaluación de licuación. Adaptado de Kramer y Mayfield (2007)



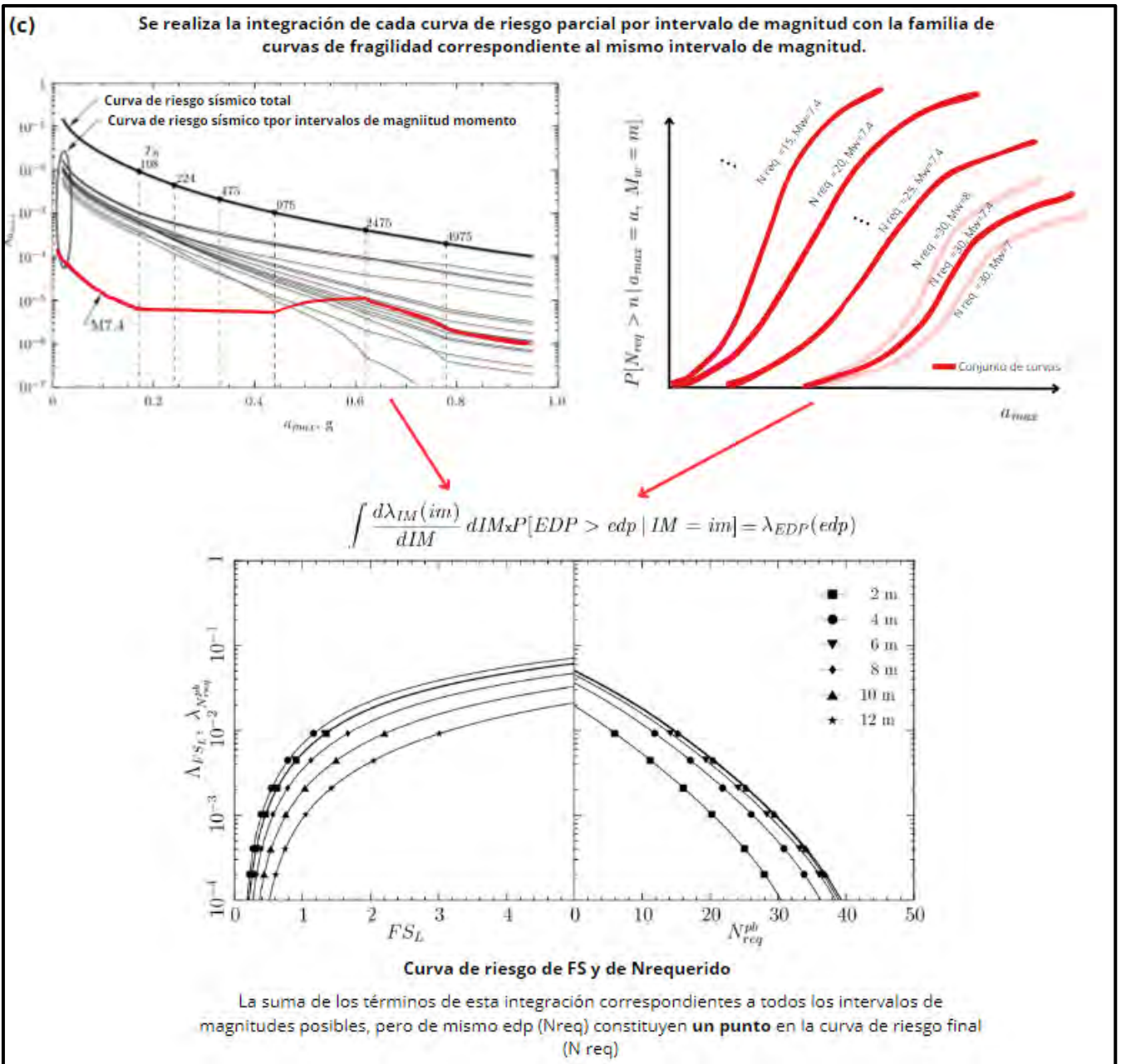
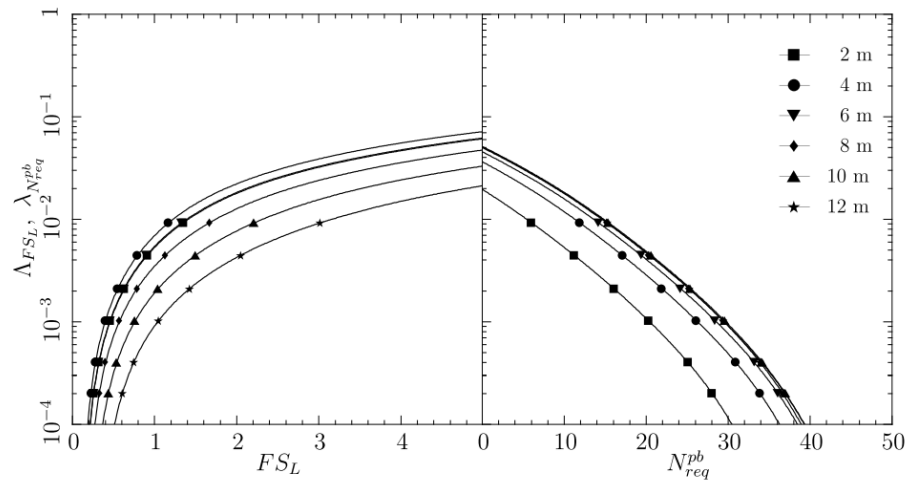
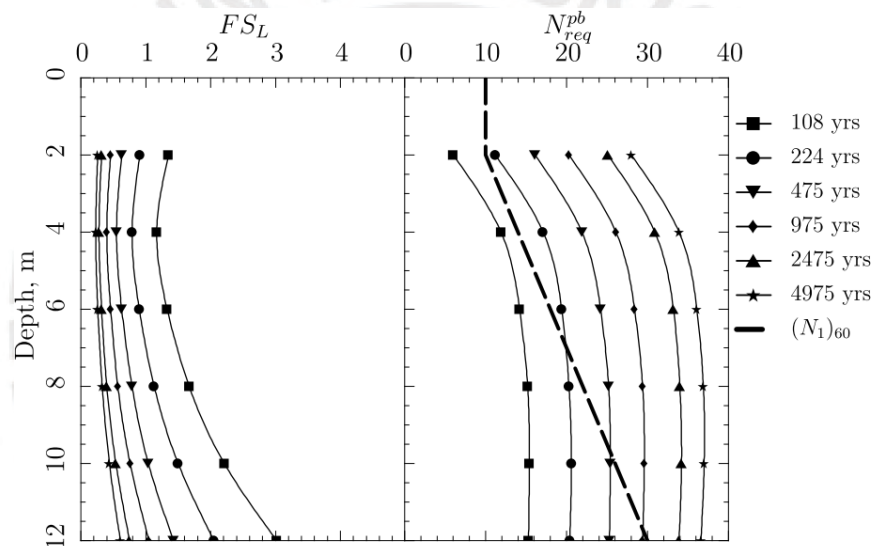


Figura 46. Procedimiento de evaluación de riesgo de licuación *performance-based*. Adaptado de Kramer y Mayfield (2007)



(a)



(b)

Figura 47. Curvas obtenidas por método *performance-based*.

- (a) Tasa de excedencia (N_{req}) o no excedencia (FS_L). A distintas profundidades del sitio evaluadas.
- (b) FS_L y N_{req} a través de la profundidad del perfil evaluado, para distintos períodos de retorno. Comparación de N_{req} con el N del sitio. Esta gráfica permite conocer qué profundidades de terreno natural deberían ser mejoradas y el N requerido para evitar la licuación.

4.2.2.7 Conclusiones

La aplicación de escenario único (es decir, escoger un par de a_{\max} y M_w) se asemeja al procedimiento reglamentado en la actualidad por la E.050. Se deja al criterio del profesional responsable la elección del sismo de diseño. En la práctica ingenieril actual, entra en discusión si utilizar valores como la media y la moda, sobre la cual no hay un consenso uniforme. Para tal aplicación, hay que tomar en consideración sus limitaciones, ya mencionadas en la sección anterior. En el escenario sísmico del Perú, y particularmente la costa peruana, se puede sugerir utilizar la magnitud estimada para el próximo sismo de gran magnitud, de M_w 8.8, y las aceleraciones máximas generadas por esta ruptura conforme a la Figura 48. Esta metodología de estimaciones no se realiza mediante análisis probabilístico de catálogos de historia sísmica, sino que por mediciones de acoplamiento sísmico. Se toma en cuenta los desplazamientos relativos intraplaca, siendo así estimaciones apropiadas para horizontes de tiempo menores. Dado que se propone esta medición en asociación con la aplicación de evaluación de licuación por escenario único -metodología determinística- se mantiene consistencia y resulta incluso más adecuado que recurrir al resultado promedio de aceleraciones de un PSHA.

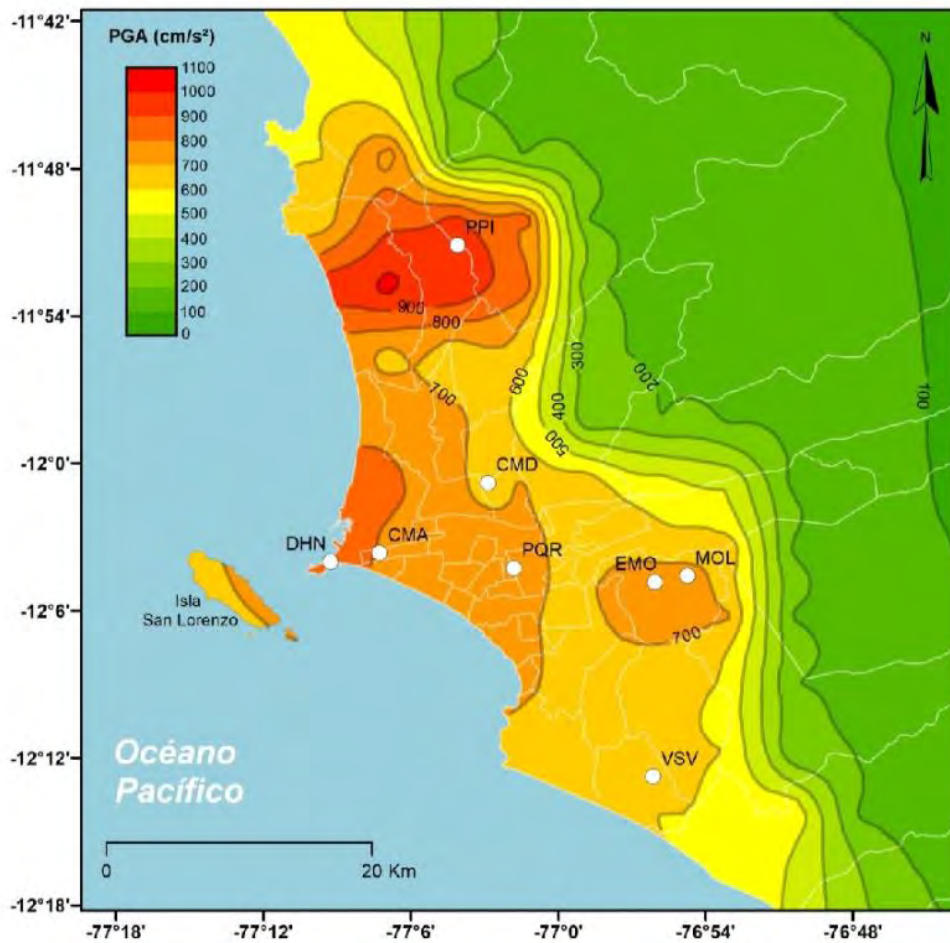


Figura 48. Aceleraciones máximas generadas por sismo de $M_w=8.8$ en zona de máximo acoplamiento sísmico de costa. Este mapa de aceleraciones toma en consideración los efectos de sitio. Tomado de Pulido et al. (2012)

Para una evaluación más integral y certera, la evaluación que toma en cuenta la desagregación de datos de estudio de riesgo sísmico para un único T_R es una opción más completa, pues toma la contribución de todas las magnitudes sísmicas. Entre las tres alternativas, esta representa un punto medio razonable de confiabilidad y accesibilidad. A día de hoy, no existe una herramienta de riesgo sísmico apropiada y de uso abierto como lo es la plataforma de USGS, lo que limita su realización. La capacidad de tal plataforma de obtener tales desagregaciones en cualquier ubicación tan solo en base en el tiempo de retorno (e incluyendo ajustes por tipo de suelo) es fundamental para justificar el uso ingenieril de este método.

El uso del *software* libre CRISIS (en su última versión, R- CRISIS), mismo empleado por Tavera et al. (2014), permite la realización de análisis de peligro sísmico y desagregaciones de magnitudes, tal como se busca; no obstante, los parámetros en los que se realiza el PSHA son múltiples y están sujetos a revisiones, con el fin de mejorar la caracterización tectónica existente. La alternativa *performance-based* también podría efectuarse mediante el uso de este software; sin embargo, la implementación ingenieril en un código de tal opción se considera demasiado complicada, puesto que su aplicación requiere de múltiples variables, dependiendo de la obra en sí a realizar; así como consecuencias a nivel de respuesta (y en su nivel más avanzado, al nivel de daños) y árboles lógicos de eventos, conceptos que involucran mediciones de incertidumbres y conceptos estadísticos avanzados. Se considera una desviación demasiado radical de las filosofías de diseño actuales. No hay consensos ingenieriles sobre los estudios realizados en base a este marco teórico en lo referido a la evaluación de licuación, cabe mencionar. Un punto intermedio se podría obtener si se fuese a realizar el procedimiento propuesto:

- i. Introducción de datos en R-CRISIS
- ii. PSHA con diversas P_{max} para un solo tiempo de exposición.
- iii. Para cada a_{max} obtenido obtener la desagregación de magnitudes.
- iv. Realizar la evaluación de licuación para cada a_{max} e intervalo de magnitud, se obtiene el FS_L para cada magnitud.
- v. Se obtiene un FS_L por cada P_{max} al ponderar por la contribución de cada magnitud.
- vi. Cada uno de estos FS_L se pondera por su P_{max} respectivo. Se obtiene un FS_L que considera todas las posibles magnitudes para todos los posibles tiempos de retorno.

A este se le puede denominar como “opción 2.5”, un intermedio entre el procedimiento probabilístico más riguroso y el que considera la contribución de todas las magnitudes para un solo tiempo de retorno. Para 9 intervalos de magnitud y eligiendo 3 tiempos de retorno (suficientes para obtener un resultado preciso), se realizan 27 iteraciones de FS (evaluación de licuación), como se muestra en la siguiente Figura:

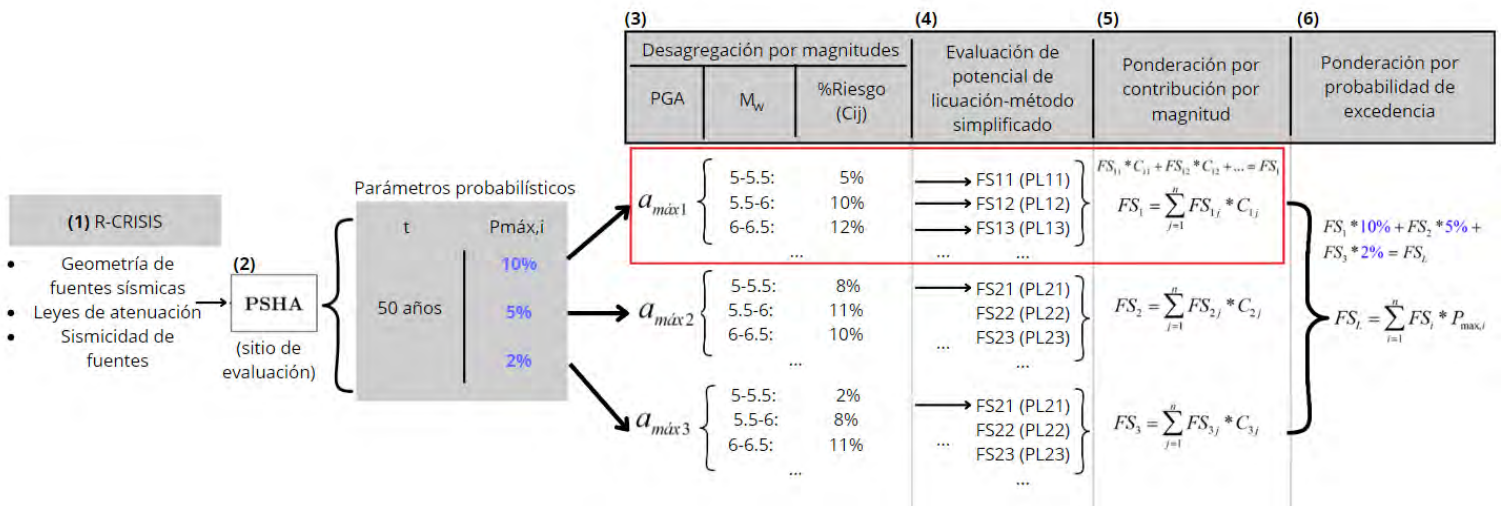


Figura 49. Procedimiento de “opción 2.5”. Fuente: propia.

Como conclusión, lo investigado sugiere que es factible la reglamentación de la primera opción, evaluación de escenario único, siempre y cuando se use con un mapa de acoplamiento sísmico, cuyo uso se adecúa mejor a corto plazo, o a un evento sísmico extremo. La segunda opción (único T_R , con contribución de todas las posibles magnitudes) sería recomendable sobre la primera, mientras que la tercera opción (y la “opción 2.5”) pueden ser tomadas como referencia o a nivel de recomendación, por el alto costo computacional para su realización, así como la complejidad para su uso. A pesar de esto, se puede obtener lecciones valiosas del marco teórico asociado a evaluaciones *performance-based*, que incluso puede generar aportes en las aplicaciones más básicas mencionadas previamente.

4.2.2.8 *Uso del software R-CRISIS*

En esta tesis se ha empleado el software R-CRISIS Ver 20.3.0, previamente mencionado, con el fin de facilitar una configuración previa hacia el PR, incluyendo datos tales como: geometría de fuentes sísmicas, asignación de leyes de atenuación y sismicidad de fuentes; todo esto con el fin de brindar una herramienta accesible para la realización de PSHA y desagregaciones. Se brinda en el ANEXO 1 una guía de uso de R-CRISIS para evaluación de licuación con una explicación de los parámetros asignados por defecto, así como los *inputs* requeridos por parte del PR para obtener la desagregación de magnitudes.

4.2.3 Parámetros probabilísticos

En esta sección se abordará en los conceptos probabilísticos de periodo de retorno T_R , tiempo de exposición y probabilidad de excedencia $P(a_{\max} > a)$, los cuales sirven para el diseño de estructuras seguras ante sismos. Se buscará una solución razonable para establecer como estándar reglamentario, tomando en cuenta los consensos existentes y la naturaleza del fenómeno probabilístico.

- Probabilidad de excedencia ($P_{MÁX}$): Probabilidad de que ocurra un sismo que ocasione una aceleración en el sitio mayor a la establecida en un tiempo de exposición establecido.
- Tiempo de exposición (t): Tiempo de vida útil de la estructura a construir, y durante el cual estará expuesto a la ocurrencia de fenómenos sísmicos.
- Periodo de retorno (T_R): Intervalo promedio entre sismos que causan determinada aceleración máxima.

Se relacionan:

$$P_{máx}(A > a) = 1 - e^{-\frac{t}{T_R}}$$

Para edificaciones comunes, el tiempo de vida útil es usualmente de 50 años, y la probabilidad de excedencia elegida es de 10%, tal que los sismos de diseño tienen un T_R de 475 años (para diseño sismorresistente).

Se considera al escenario de licuación como un fenómeno probabilístico desglosable en dos etapas. En primer lugar, el fenómeno sísmico cuenta con su propia probabilidad, la que se reduce a un intervalo de tiempo de acuerdo a la estructura a proyectar. Una vez ocurrido el sismo, el fenómeno de licuación presenta una probabilidad de ocurrir. Se puede expresar:

$$P_{total} = P(a_{max} > a) * P(Liq | a_{max} > a)$$

Tomando en cuenta esto, se presentan tres propuestas para edificaciones comunes:

- Propuesta 1: El análisis probabilístico se realiza en base a una probabilidad de excedencia de 10%, de tal forma que es similar a la usada en el diseño sismorresistente. El FS_L mínimo exigible es de 1.15, el cual equivale a una probabilidad de licuación de 15%. Este FS_L es un factor de seguridad conservador, y es similar al exigido por la E.050 actualmente (edificaciones de categoría B).
- Propuesta 2: Siguiendo la recomendación de Muñoz (2020), se debería reducir la probabilidad de excedencia a menos de 10%. Se elige 5%. El FS_L mínimo se establece como 1, equivalente a P_L de 50% (Kayen et al, 2013).
- Propuesta 3: Se reduce la probabilidad de excedencia a 5%, mientras se elige un FS_L de 1.15 ($P_L \approx 15\%$). Entre las tres, esta es la opción más conservadora.

4.2.3.1 Comparación entre parámetros probabilísticos

Si bien la recomendación de reducir la probabilidad de excedencia bajo 10% (Propuestas 2 y 3) está bien fundada, puesto que se establece una jerarquía entre el fenómeno sísmico y la ocurrencia de licuación, el riesgo total también se puede manejar desde el factor

de seguridad FS_L . Con el fin de sincronizar la utilización conjunta de las normas E.050 y E.030, resulta conveniente el uso de parámetros similares a los usados en el diseño sismorresistente, de tal manera que podría preservarse el uso de aquella de 10%. El T_R para un tiempo de exposición de 50 años permanecería de 475 años, clasificado como “sismo raro” (SEAOC, 1995). De tal modo, para mantener la probabilidad total de licuación reducida se puede optar por usar un FS_L de 1.15 ($P_L \approx 15\%$, acorde a lo recomendado en procedimientos como Kayen et al. (2013) y Cetin et al. (2018)). Se descarta la propuesta de un FS_L de 1, el cual representa un potencial de licuación demasiado alto (50%). En conclusión, para la evaluación probabilística se tomará la propuesta 1, el cual representa una propuesta de bajo riesgo y conveniente por su compatibilidad con la NTE E.030 y el enfoque conservador que aún prevalece en la NTE E.050. La Tabla 19 presenta un resumen de los parámetros para las tres alternativas propuestas.

Tabla 19. Resumen de parámetros probabilísticos considerados como estándar en edificaciones comunes.

Propuesta	Tiempo de exposición	P. excedencia	Tiempo de retorno	FS_L	P_L	Prob. Total
E.030 <i>Diseño sismorresistente</i> (2018)	50	10%	475	-	-	-
1	50	10%	475	1.15	15%	1.5%
2	50	5%	950	1	50%	2.5%
3	50	5%	950	1.15	15%	0.75%

Fuente: propia.

Para edificaciones esenciales, con tiempos de vida útil mayores a 50 años, se debe utilizar tales tiempos de vida útil para la evaluación probabilística. Debido a que las probabilidades de excedencia proyectadas para edificaciones esenciales son menores, esto resulta en el uso de T_R significativamente mayores.

4.2.4 Comparación de factores r_d

Como se ha mostrado previamente, a través de los años se ha planteado diversos valores para r_d . Dentro de las estimaciones más tempranas de r_d se tienen las estimaciones de Seed e Idriss (1971) y de Iwasaki et al. (1978), ya mencionadas previamente. Estas

estimaciones vienen de un periodo durante el cual el conocimiento de la licuación era limitado y los recursos computacionales eran escasos incluso en los centros de investigación más avanzados (Seed, 2010). En la década siguiente, se plantean algunas correlaciones de relativa practicidad, como la de Liao y Whitman (1986), presentada en la siguiente ecuación:

$$r_d = 1 - 0.00765 * z \quad \text{Para } z \leq 9.15 \text{ m}$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 * z \quad \text{Para } 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m}$$

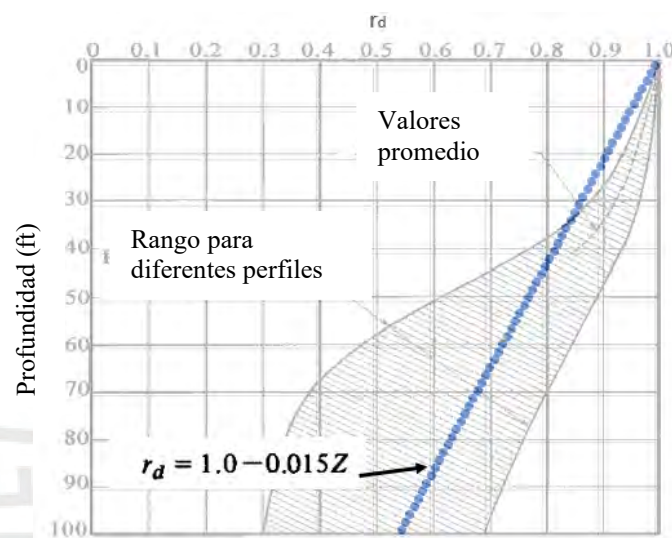


Figura 50. Factor de reducción r_d planteado por Seed e Idriss (1971). En azul: Factor de reducción r_d según Iwasaki et al. (1978). Adaptado de Seed e Idriss (1971)

En las expresiones más recientes propuestas para r_d , se ha ampliado el conocimiento sobre los factores que influyen sobre este, con cálculos como los de Cetin et. al (2000, 2004), calculada a partir de más de 2000 análisis de respuesta de sitio sísmicos para condiciones de sitio más amplias o el r_d de Idriss (1999), basado en el trabajo de Golesorkhi (1989). La fórmula de r_d de Idriss (1999) se presenta a continuación:

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

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

Dónde:

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

Una de las mejoras presentes en Cetin et al. (2000) está basada en una nueva metodología para hallar el factor r_d , originalmente conocido como factor de reducción, y ahora denominado como factor de participación de masa corte no lineal. Anteriormente, se había hecho notorio el que los perfiles de estratos uniformes de arena sobre fondo rocoso en base a los cuales las recomendaciones de Seed e Idriss (1971) para r_d se plantearon no eran lo suficientemente representativos respecto a condiciones de campo. Cetin (2000) y Cetin et al. (2004) revelan una sobreestimación del r_d , la cual repercute en el cálculo del CSR por Seed e Idriss (1971). Esto provocó que los puntos de la correlación de CSR tengan valores demasiado elevados para los casos históricos propuestos, provocando un grado de no conservadurismo de alrededor de 10 a 20% (Seed, 2010). El margen de error en el r_d propuesto por Seed e Idriss (1971) no solo es elevado más allá de los 40 pies (12.2 m), sino que, en las profundidades más superficiales, menores a 3 metros. Esto comprende las profundidades críticas, aquellas cuyo cálculo resulta más crucial para la evaluación por licuación. La dependencia de r_d se presenta de manera muy completa desde un punto de vista teórico, y se basa en variables como: magnitud momento del terremoto, distancia al hipocentro, profundidad bajo la superficie, aceleración pico del suelo, rigidez del sitio (caracterizada por velocidad de ondas de corte $V_{s,12m}^*$, período predominante de señal de entrada T_p , período fundamental inicial del sitio a deformaciones pequeñas T_0 , período final de sitio T_f (tras haber experimentado enblandecimiento por terremoto) y profundidad total de suelo hasta el lecho rocoso. Para propósitos prácticos (por lo complicado que puede ser identificar algunas de estas variables y por la fuerte correlación que existe entre algunas de estas variables), Cetin et al. (2004) proponen una relación basada en solo cuatro de estas

variables: la profundidad (d), magnitud momento (M_w), aceleración pico (a_{\max}) y la rigidez de sitio (caracterizada por $V_{s,12m}^*$), a partir de los resultados de 2153 análisis de respuesta de sitio sísmicos y un amplio rango de condiciones de sitio locales.

Para $d < 20\text{m}$,

$$r_d(d, M_w, a_{\max}, V_{s,12m}^*) = \left[\frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{\max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341 \cdot (-d + 0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}} \right] \pm \sigma_{\varepsilon_{r_d}}$$

Para $d \geq 20\text{m}$,

$$r_d(d, M_w, a_{\max}, V_{s,12m}^*) = \left[\frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{\max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341 \cdot (-20 + 0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}} \right] - 0.0046 \cdot (d - 20) \pm \sigma_{\varepsilon_{r_d}}$$

Asimismo,

$d < 12\text{ m}$ ($\sim 40\text{ ft}$)

$$\sigma_{\varepsilon_{r_d}}(d) = d^{0.8500} \cdot 0.0198$$

$d \geq 12\text{ m}$ ($\sim 40\text{ ft}$)

$$\sigma_{\varepsilon_{r_d}}(d) = 12^{0.8500} \cdot 0.0198$$

La Figura 51 presenta los resultados de los análisis de respuesta sísmicos de Cetin (2000) con los r_d hallados con la correlación de Idriss (1999) para cuatro magnitudes de sismo diferentes. Seed (2010), en un artículo crítico sobre el trabajo de Boulanger e Idriss (2008) plantea una comparación entre dichas correlaciones. La crítica remarca en que hay aspectos de la correlación de Idriss (1999) que no están debidamente documentados, que a su vez falla en capturar algunos de los factores más importantes que la influyen, como la rigidez de la

columna de suelo y la severidad y características del movimiento del suelo. Por otro lado, captura bien el factor de profundidad y moderadamente la duración del sismo, que está correlacionada con la magnitud. El resultado de la correlación de Idriss (1999) obtiene particularmente valores muy altos asociados a profundidades bajas, las cuales a menudo constituyen una porción crítica de la evaluación de licuación.

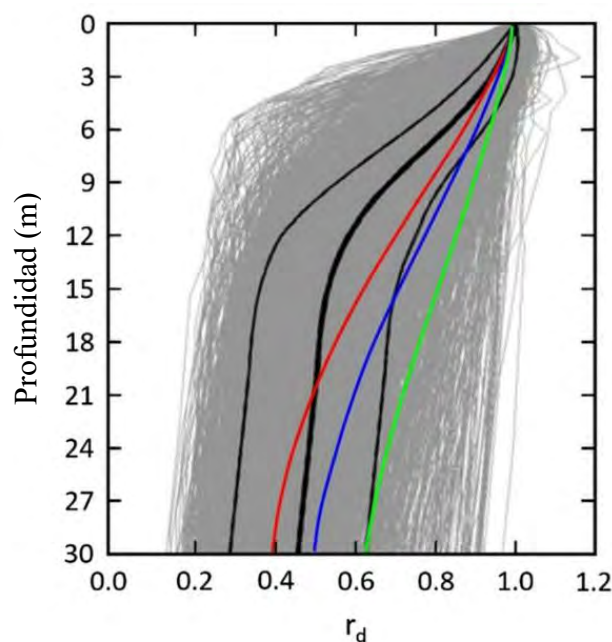


Figura 51. Factor r_d según estimaciones de Cetin (2000) y Idriss (1999).

Las líneas roja, azul y verde se calcularon usando la relación r_d de Idriss (1999) para eventos M 5.5, M 6.5 y M 7.5, respectivamente. Las líneas grises fueron calculadas por Cetin (2000). Las líneas negras representan los valores promedio de lo calculado por Cetin, con una variación estándar de ± 1 (Green et al., 2019)

Dada su ventaja respecto de la expresión de r_d de Idriss (1999), se reafirma el uso de r_d de Cetin et al. (2004). Esta expresión se utiliza hasta el día de hoy, a más de 20 años desde su publicación. Esto se fundamenta en la inmensa cantidad de análisis de respuesta de sitio realizados, la amplia consideración de factores que afectan a r_d y su aplicabilidad en el campo ingenieril (apta para hojas de cálculo). Existen otras expresiones r_d planteadas a partir de aquel entonces (Lasley et al., 2016); sin embargo, para las curvas probabilísticas cuyo uso se recomendará, resulta más consistente el uso de un r_d como el de Cetin. A su vez, estos r_d

propuestos más recientemente cuentan con condiciones adicionales que los hacen más aptos para usos específicos. Por ejemplo, aquel de Lasley et al. (2016) cuenta con consideraciones adicionales para las características tectónicas de la costa oeste de Estados Unidos.

Dado el uso del r_d de Cetin et al. (2000, 2004), se debe considerar que el parámetro V_{s12m}^* puede no tenerse disponible, en el caso de solo utilizar SPT (problema mencionado en 4.1.8.). Para abordar este problema a fondo, parece conveniente la realización de un análisis de sensibilidad con distintos valores de V_{s12m}^* , con el fin de determinar la variación del r_d en torno a este parámetro y validar el uso de correlaciones como su reemplazo. Estas correlaciones no son la estimación más fiable, por ser principalmente de uso local (Dikmen, 2009); sin embargo, podría ser posible su uso en este caso. Cetin et al. (2018) mencionan que los cambios de V_S tienen efectos despreciables en el resultado de r_d . En el mismo artículo, se sugiere la utilización de un V_{s12m}^* máximo para el cálculo de r_d . Este valor es consistente con los valores máximos de onda de corte para los cuales se han presentados casos de licuación por Kayen et al. (2013).

Para esto se puede hallar el N promedio y luego correlacionarlo o realizar la correlación primero para múltiples valores de N , para luego promediarlo. Estas dos posibilidades se pueden realizar de forma intercambiable, pues no hay convención que asigne un procedimiento normado al respecto. Las posibles implicaciones de realizar un procedimiento sobre el otro todavía no han recibido algún tipo de estudio. El valor de V_{s12m}^* se limitará a un valor de 230 m/s. Teniendo en cuenta estas medidas, será posible calcular r_d usando la expresión más fiable existente sin restricciones y su uso será posible en hojas de cálculo.

Cabe mencionar que, así como se recomienda el uso de este r_d , se recomienda el uso de las correlaciones CRR planteadas tomando en cuenta este r_d (y así, para cada correlación CRR, usar el r_d recomendado por el autor que lo propone), para mantener consistencia teórica

y evitar incertidumbres adicionales. En medida de lo que este principio designa, la mayoría de curvas CRR desarrollados recientemente parten del r_d de Cetin et al. (2000, 2004), exceptuando las curvas de Idriss y Boulanger (2010) y Boulanger e Idriss (2014), cuyas publicaciones incluyen correlaciones en base a SPT y CPT (se recoge esta última correlación como recomendada en la presente tesis). Solo en este caso se podría recomendar utilizar otro r_d , esto es, el propuesto por Idriss (1999).

4.2.5 Índices propuestos para el estudio de severidad de licuación

En la sección 2.4.3 se ha realizado una breve descripción de varios de los índices de potencial de licuación propuestos a través de los años, cuyo objetivo es el de caracterizar la susceptibilidad y severidad de la licuación en un determinado perfil de suelo. Para la proposición de un índice como estándar en la E.050, una de las características con el que este debería contar es el de ser lo más fiable posible. Existen algunos estudios en el cual se ha contrastado los resultados de casos históricos con los índices obtenidos en el perfil en cuestión. Uno de ellos es el de Rateria y Maurer (2022), quienes pusieron a prueba LPI, LPI-ISH y LSN en base a un conjunto de 14 400 datos, de los cuales un gran número fue basado en sondeos CPT en Nueva Zelanda y las observaciones de licuación de la secuencia de terremotos de 2010. Para esto se consideraron las condiciones de “No Manifestación” y de “Manifestación”, este último se cuenta con casos de sitios donde al menos la manifestación observada fue de severidad menor. Los resultados, mostrados en las Figuras 52 y 53, son no concluyentes, e incluso se obtiene una ligera parcialidad hacia el LPI original. Cabe mencionar que estos resultados no comprenden el alcance total de estos índices o su calidad continua de estimar la severidad de licuación, pues solo han otorgado el veredicto del sí o no.

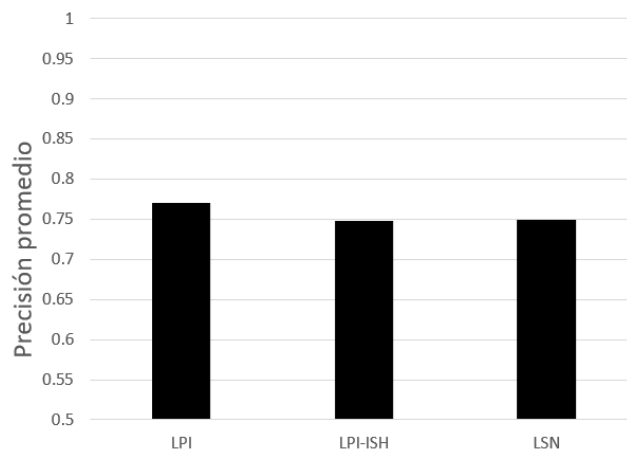


Figura 52. Precisión promedio hallada para índices de potencial de licuación, resultados totales (Rateria y Maurer, 2022)

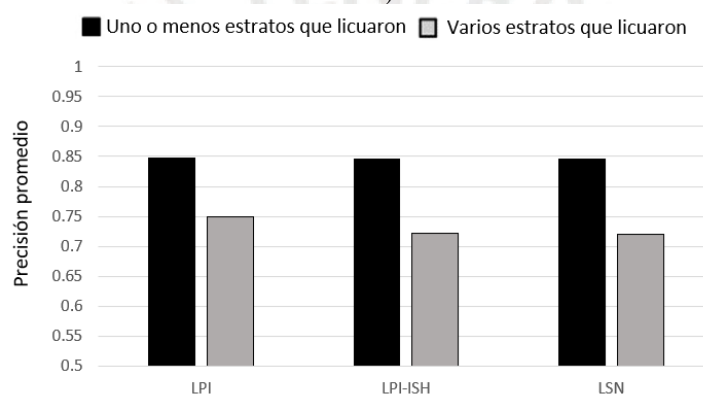


Figura 53. Precisión para los tres índices, para perfiles con uno o menos estratos licuables y para perfiles con varios estratos licuables intercalados (Rateria y Maurer, 2022)

Por otro lado, es importante para la propuesta considerada la practicidad del cálculo de cada índice. Es en este ámbito donde el índice LSN se ve en desventaja. Por un lado, para su cálculo es necesario el parámetro q_c del ensayo CPT, que nos permite obtener el ε_v . Se contará con este parámetro solo en la condición de haberse efectuado el CPT. De otra forma, se tendría que llegar a él mediante correlaciones que harían el cálculo de este índice poco práctico. A su vez, sería necesario el cálculo del D_r , que también requiere de sondeos mecánicos (descartando así la medición de ondas de corte). Por lo comentado, el índice LSN resulta una opción complicada de proponer (si bien en su propuesta original, con una base de datos de CPT inmensa, fue bien utilizada). A continuación, se presenta una tabla resumen con

los índices de potencial de licuación mencionados y los factores conceptuales que moldean la propuesta de cada uno de ellos.

Tabla 20. Resumen de factores conceptuales incorporados en cada índice de licuación.

Característica	LPI	LSI	LSN	LPI- ISH	LSN- ISH	Comentarios
Profundidad	Lineal	Lineal	Potencia	Potencia	Potencia	El ajuste de potencia es más acorde con lo esperado en la vida real: los estratos licuables superiores son considerablemente más importantes que los inferiores
Influencia de espesor no licuable superficial	No	No	No	Sí	Sí	
Influencia de naturaleza contractiva/ dilatante de suelos a grandes deformaciones sobre la severidad de la licuación	No	No	Sí	No	Sí	Upadhyaya et al. (2023) sugieren que aquellos índices que lo incorporan en realidad están haciendo un conteo doble.
Influencia de estratos con $FS_i > 1$	No	No	Sí	No		

Fuente: propia.

4.2.6 Curvas actualizadas de CRR

Tras la revisión de literatura disponible, se proponen las siguientes correlaciones para evaluación de licuación:

Tabla 21. Curvas CRR presentes en la NTE E.050 y aquellas propuestas por esta tesis

Método de investigación y aplicación	Actual	Propuesta	Comentarios
SPT- determinístico	Seed et al. (1985), modificada por Robertson y Wride (1997)	Cetin et al. (2018) / Boulanger e Idriss (2014)	El SPT probabilístico actual se puede deducir del artículo 38.5.3 (factor de reducción r_d de Cetin et al., 2004), y del artículo 38.5.1., que menciona la actualización del método simplificado correspondiente a 2004
SPT- probabilístico	Cetin et al. (2004)		
CPT- determinístico	Robertson y Campanella (1985), modificada en 1997	Boulanger e Idriss (2014)	La curva de Robertson y Campanella solo comprende datos de arenas limpias. Por otro lado, no existe curva probabilística para CPT en la E.050
CPT- probabilístico	No hay.		
V_s - determinístico-arenas	Andrus y Stokoe (1997)	Kayen et al. (2013)	
V_s - probabilístico-arenas	No hay.		
V_s - determinístico-gravas	Andrus y Stokoe (1997)	Rollins et al. (2022)	El conjunto de datos con el que fue desarrollado Andrus y Stokoe (1997) incluye algunos suelos gravosos; sin embargo, está lejos de ser óptimo para la evaluación de estos suelos
V_s - probabilístico-gravas	No hay.		

Fuente: propia.

4.2.7 Flujo de eventos

Conforme a la iteración actual de la NTE E.050, lo que se sostiene en la propuesta realizada en esta tesis; se puede afirmar que la licuación constituye un problema crítico en la seguridad de las edificaciones, lo que se refleja en que es este el único problema incluido en la NTE E.050 que puede alterar el curso de la campaña geotécnica significativamente. Esto puede ocasionar retrasos en el plazo y costos significativamente mayores. Es por esto que la dinámica entre las partes involucradas durante el proceso y la secuencia de este acorde a los hallazgos merece ser sistematizada en un diagrama de flujo, el que se presenta en el ANEXO 3. El mismo se incluirá en la NTE E.050 para orientar el proceso lógico del PR.



5. Perspectivas de mejora

A continuación, se presentan los nuevos lineamientos propuestos para el artículo de licuación de la Norma E.050, tras la revisión de literatura realizada, el planteamiento de interrogantes y la discusión realizada al respecto. Las referencias a tablas u otros artículos de la NTE E.050 (2018) son referidos a la misma y mostrados en cursiva, para evitar confusiones con la clasificación presentada hasta este punto. Se presentan los nuevos lineamientos acordes a la nueva organización a ser incluida en la NTE E.050: por capítulos y artículos, en vez de artículos y sub artículos.

CAPÍTULO I

LICUACIÓN DE SUELOS

5.1 Artículo 1.- Suelos susceptibles a licuación

Se conoce como licuación a un fenómeno prevalente en suelos granulares sueltos y sumergidos. Este fenómeno ocurre cuando, ante a la acción de un evento sísmico importante, en el suelo sumergido se generan presiones de poros importantes que, al no poder ser disipadas, ocasionan una pérdida de resistencia considerable. Durante la licuación, el suelo se comporta como un fluido viscoso, de tal forma que ocurren en estos grandes asentamientos, oscilación, expansión lateral, eyección de arena, entre otros tipos de efectos dañinos, los cuales comprometen la integridad de cimentaciones de obras apoyadas sobre suelos licuables, así como taludes y terraplenes. Por lo general, un suelo susceptible a la licuación cumple las siguientes características:

- a) Suelos sueltos o poco densos de composición arenosa, arenosa con presencia de finos arcillosos o limosos, limosos o gravosos con matriz arenosa.
- b) Están bajo el nivel freático.

Tales características son obtenidas mediante un estudio previo, que parte de caracterizaciones geotécnicas previas, información de la carta geológica (INGEMMET), registros de ocurrencias de licuación previa e incluso la inspección de sitio por un ingeniero o geólogo. La susceptibilidad a la licuación del sitio de interés se estima mediante:

$$SRF = F_{hist} * F_{Geo} * F_{comp} * F_{NF}$$

Donde:

SRF: Factor del grado de susceptibilidad (*Susceptibility Rating Factor*)

F_{hist} : Factor historia

F_{Geo} : Factor geológico

F_{comp} : Factor de composición

F_{NF} : Factor de nivel freático

En la *Tabla 12* se clasifica SRF en cinco categorías de susceptibilidad. Mayor información acerca de los factores mediante los cuales se estima SRF se incluye en el ANEXO 2.

Tabla 22. Clasificación de susceptibilidad de sitio, propuesta

TABLA 12	
SRF	Susceptibilidad de sitio
0-5	Muy bajo
5-10	Bajo
10-25	Moderado
25-50	Alto
>50	Muy alto

Fuente: Kramer (2008)

5.2 Artículo 2.- Ampliación de programa de exploración por posibilidad de licuación

Cuando los antecedentes indiquen la presencia de un suelo susceptible a la licuación (SRF>10 en zonas sísmicas 4 y 3; SRF>20 en zonas sísmicas 1 y 2), se deberá acondicionar la campaña de exploración geotécnica a la caracterización enfocada en el estudio de

licuación. En tal caso, el PR informa al Solicitante la necesidad de ampliar el Programa de Exploración para incluir el análisis de potencial de licuación.

5.3 Artículo 3.- Exploración de campo

Respecto al número de investigaciones directas, el programa de exploración de toda el área comprometida por la estructura sigue realizándose de acuerdo a lo indicado en la *Tabla 6*.

Las perforaciones deben tener una profundidad mínima a partir de la profundidad de cimentación tentativa de 15 metros, y deben ser realizadas por las técnicas de lavado o rotativa. De caracterizar el sitio con Ensayos de Penetración Estándar SPT (NTP 339.133), estos se deben realizar obligatoriamente con un espaciado de 1 m desde el nivel superficial. Toda investigación directa implica la obtención de muestras espaciadas un metro entre sí en las que se realicen los siguientes ensayos: Véase *Tabla 13 (NTE E.050)*.

Tabla 23. Ensayos a realizar en investigación directa en programa de exploración en suelo susceptible a licuación

<i>TABLA 13 (E.050)</i>	
SUELOS. Métodos de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo	NTP 339.127
SUELOS. Método de ensayo para el análisis granulométrico	NTP 339.128
SUELOS. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos	NTP 339.129
SUELOS. Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo	NTP 339.131
SUELOS. Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS)	NTP 339.134

Nota: Similar a la existente en la E.050 (2018), se añadió el ensayo de humedad.

Nota: La profundidad de investigación directa elegida será la mayor entre la establecida en este Artículo y las indicadas en *15.3.2.c*.

Se puede utilizar una combinación de sondeos mecánicos SPT, CPT y DPSH (previa calibración), así como el uso de métodos geofísicos en la caracterización de áreas extensas y con el fin de obtener un modelo geotécnico más certero.

5.4 Artículo 4.- Requisito mínimo para el uso de métodos geofísicos

De elegirse realizar la evaluación de licuación en base a ensayos geofísicos (sin SPT), se puede reducir las exploraciones directas a solo una (aplicando en dicha los requisitos de la *Tabla 13 (E.050)*). Sin embargo, se debe justificar mediante los antecedentes geológicos y dicha exploración a profundidad completa que la estratificación existente sea relativamente homogénea y regular, de tal manera que se pueda realizar la evaluación con la suficiente confiabilidad. El resto de exploraciones directas pueden ser reemplazadas por prospecciones geofísicas. De ser tal el caso, se podrá caracterizar el perfil de suelo (NTE E.030) mediante velocidad de ondas de corte (V_s). De proceder únicamente con investigaciones directas (SPT o CPT), al menos uno de los puntos debe ser caracterizado hasta alcanzar la profundidad de 30 metros (NTE E.030).

5.5 Artículo 5.- Análisis de licuación en suelos

En el caso de suelos que presenten las características especificadas en el Artículo 1, se debe realizar el análisis de potencial de licuación de acuerdo al método simplificado, propuesto originalmente por Seed e Idriss (1971). Este método se resume en la comparación de dos términos:

CSR: Relación que expresa el esfuerzo promedio inducido por el sismo sobre el suelo a determinada profundidad. La expresión correspondiente a CSR se presenta a continuación:

$$CSR = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \quad (\text{no normalizada por presión de confinamiento y magnitud sísmica})$$

Asimismo, de estar justificado por la envergadura de la obra, se puede obtener el CSR mediante análisis dinámicos de respuesta de sitio.

CRR: Relación que expresa el esfuerzo necesario a inducir sobre el mismo suelo para que licúe. Para la determinación de CRR se han propuesto varias correlaciones empíricas a partir

de información histórica en campo. Estas varían de acuerdo al tipo de suelo y al tipo de parámetro en base al que se busca evaluar este ($N_{1,60}$ -SPT, V_{s1} -geofísico, q_c -CPT).

La *Tabla 15 (NTE E.050)* presenta las curvas empíricas recomendadas para cada caso, mediante las cuales se puede efectuar la evaluación del potencial de licuación. Dados CRR y CSR, el análisis de licuación permite obtener los siguientes:

$FS_L = CRR/CSR$, factor de seguridad frente a la licuación

P_L : Probabilidad de licuación, o también conocido como potencial de licuación (%). No se debe exceder los valores especificados en la *Tabla 14 (NTE E.050)*.

5.6 Artículo 6.- Probabilidad de licuación límite según método de investigación

De acuerdo a la preferencia del PR, así sea por poca excavabilidad, inaccesibilidad a los equipos SPT, ventaja económica, entre otros; se podrá realizar la evaluación del potencial de licuación en el lugar de estudio mediante el uso exclusivo del parámetro V_s obtenido por métodos geofísicos, tanto intrusivos como no intrusivos, o por q_c de CPT. Se muestran los P_L aceptados por método de investigación en la *Tabla 15 (NTE E.050)*. En el caso de V_s , el P_L aceptado es de hasta 10%, ya que esta modalidad de evaluación es generalmente menos conservadora que el SPT.

5.7 Artículo 7.- Cálculo de campo

Con el fin de realizar cálculos en campo que permitan conocer la posible necesidad de ampliación adicional o alternativamente la conformidad con la investigación geotécnica en curso, se permite el uso del método simplificado conforme con la preferencia del PR. Se incluye en el ANEXO 2 un esquema de este procedimiento de campo.

5.8 Artículo 8.- Correcciones en ensayo in-situ SPT

El procedimiento del SPT involucra correcciones a realizar. Típicamente, se corrige por: energía, diámetro de la perforación, longitud de las barras y tensión efectiva para obtener

el valor de $(N_1)_{60}$. Sin embargo, de ser especificado por el autor de la correlación CRR a usar, puede existir otras correcciones para N necesarias.

5.9 Artículo 9.- Ensayo in-situ CPT

A su vez, se permitirá la evaluación de potencial de licuación mediante el uso exclusivo del CPT, el cual cuenta con capacidad de mediciones casi continuas y ocupa resultados más conservadores que aquellos del SPT. El parámetro q_c del CPT también requiere de correcciones, las cuales son por presión de confinamiento y por contenido de finos. Se presentan las formas recomendadas en el ANEXO 2.

5.10 Artículo 10.- Consideraciones sobre el factor de reducción r_d y otras correcciones de la evaluación de licuación

Respecto al factor r_d del CSR, se recomienda el uso de la expresión empleada por el autor de cada curva CRR a usar. En la *Tabla 15* se incluyen las expresiones r_d a usar para cada curva recomendada. Así como las correcciones de N mencionadas anteriormente, las cuales pueden variar entre artículos, prestar atención a los siguientes términos y aplicarlos consistente con la bibliografía respectiva: MSF (también referido como DWF o K_{Mw}), K_σ , entre otros.

En el caso de la ecuación de r_d propuesta por Cetin et al. (2004), presente en varias de las correlaciones, se aconseja para su uso la utilización de una desviación estándar positiva, para la obtención de un esfuerzo inducido más crítico. Respecto al término $V^*_{s,12m}$, se permitirá su cálculo tanto a base de mediciones directas (evaluación por métodos geofísicos) como mediante correlaciones desarrolladas entre $N-V_s$ de acuerdo al criterio del PR.

5.11 Artículo 11.- Profundidad de nivel freático

Se debe considerar en la evaluación de potencial de licuación la variabilidad (aproximada) del nivel freático, basada en la experiencia ingenieril o en caracterizaciones

hidrológicas de la zona, de existir estas. La profundidad del nivel freático a usar nunca será mayor a la registrada en la exploración del suelo.

5.12 Artículo 12.- Enfoques de evaluación

Respecto al sismo de diseño para la evaluación de potencial de licuación, se presentan las siguientes modalidades:

i. Enfoque determinístico: Consiste en la elección de un par a_{\max} y M_w correspondiente a un evento sísmico singular. El sismo de diseño aceptado por esta vía corresponde al escenario de evento extremo. En la zona costera, este corresponde al megaterremoto de magnitud 8.8. Las aceleraciones generadas por tal terremoto se presentan en los mapas de acoplamiento sísmico (véase ANEXO 1). Para otras zonas, elegir un par a_{\max} - M_w correspondiente al máximo histórico registrado en una fuente sísmica próxima.

ii. Enfoque probabilístico: Toma en consideración la contribución al peligro sísmico de distintas fuentes sobre un punto de estudio, tomando en cuenta la sismicidad histórica de cada una de ellas. Para tal, se puede utilizar el software gratuito R-CRISIS, con la configuración inicial adjunta en la sección de recursos digitales. Se incluye una guía de uso para su personalización, así como el procedimiento requerido (Véase ANEXO 1). A dicho procedimiento se le conoce como desagregación de magnitudes, el cual considera el efecto de todas las posibles magnitudes para el sitio de estudio, con un solo período de retorno.

Las características de las modalidades exigidas para cada tipo de edificación (*Tabla 6*) se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 24. Parámetros sísmicos probabilísticos para evaluación de licuación, propuesta

TABLA 14			
Tipo de edificación (E.030)	Escenario extremo	Probabilístico	T _R (base), tiempo de exposición y P _{MÁX}
A	SI	SÍ	5000 años (475 años, 10%) *
B	NO	SÍ	950 años (100 años, 10%) *
C	NO	SÍ	475 años (50 años, 10%)

(*): Valores referenciales, los tiempos de vida útil de estas estructuras no son únicos.

Fuente: propia.

Tabla 25. Tabla de correlaciones CRR, propuesta

TABLA 15			
Método de investigación	Curvas recomendadas	r _d	P _L aceptado
SPT	Cetin et al. (2018) Boulanger e Idriss (2014)	Cetin et al. (2004)	15%
CPT	Boulanger e Idriss (2014)	Idriss (1999)	15%
Vs - arenas	Kayen et al. (2013)	Cetin et al. (2004)	10%
Vs - gravas	Rollins et al. (2022)	Cetin et al. (2004)	

Nota: Véase el ANEXO 3 para la relación de fórmulas respectivas para cada caso, organizadas por su respectivo autor.

Fuente: propia.

5.13 Artículo 13.- Índice de severidad de licuación

A su vez, se deberá caracterizar cada punto de exploración mediante el Índice de Severidad de Licuación (LSI), el cual indica la severidad de la manifestación de la licuación en un sitio. Esta caracterización es útil para la generación de mapas de zonificación, los cuales son de fácil uso ingenieril:

$$LSI = \int_0^{20 \text{ m}} P_L(z)(10 - 0.5z)dz$$

5.14 Artículo 14.- Cimentaciones en suelos licuables

Se prohíbe completamente la cimentación directa sobre estratos licuables, para todo tipo de cimentación. Es decir, estratos que no cumplan con el P_L o FS_L requeridos según la *Tabla 14*.

Pueden existir estratos licuables bajo el fondo de cimentación (NO directamente), siempre y cuando se demuestre que la manifestación de la licuación al nivel del fondo de cimentación sea inocua o despreciable. Para esto, se utilizará el modelo de Ishihara (1985), actualizado por Rateria y Maurer (2022), comúnmente referenciado como modelo H₁-H₂. Este modelo consiste en la existencia de una capa de suelo de cobertura no licuable (H₁), la cual cubre un estrato licuable (H₂). El gráfico a usar para tal fin se incluye en el ANEXO 2. De no cumplirse este requisito, se deberá apoyar la cimentación debajo de la profundidad del estrato licuable. El análisis de licuación incluido en el EMS debe incluir el efecto de los esfuerzos de la cimentación sobre el suelo y cumplir con los requisitos establecidos.

5.15 Artículo 15.- Asentamientos inducidos por efecto de licuación

Habiendo ya cumplido con los requisitos previos respecto al potencial de licuación en el sitio de interés, se debe estimar el asentamiento inducido en el caso de ocurrir tal. Se recomienda el procedimiento de Bray y Macedo (2017), incluido en el ANEXO 2, con la finalidad de estimar la distorsión angular y, por consiguiente, el daño estructural inducido por la ocurrencia de licuación. Para garantizar un resultado confiable, será conveniente que los puntos de exploración directos (Artículo 3) hayan sido escogidos estratégicamente bajo el centro de cada cimentación superficial. A continuación, se presentan los límites referenciales por tipo de edificación:

Tabla 26. Límites de asentamientos diferenciales post-licuación, propuesta

<i>TABLA 16</i>	
Tipo de edificación	Distorsión angular máxima post-licuación
A	1/300
B	1/250
C	1/100

Fuente: propia.

5.16 Artículo 16.- Desplazamientos laterales inducidos por licuación

En caso de presentarse una configuración de fronteras próxima al área a cimentar que presente una cara libre o pendiente (de hasta 3.5%), típica en carreteras o ríos, se causa una

descompensación en la retención o presión lateral esperada. Por lo tanto, se debe estimar los desplazamientos laterales según lo indicado en el ANEXO 2. La condición de cara libre no es aplicable de existir estructuras de retención.

5.17 Artículo 17.- Consideraciones estructurales adicionales

Dado el caso de que existan estratos licuables bajo el fondo de cimentación, se recomienda el uso de vigas de cimentación o losas de cimentación, con el fin de restringir los posibles asentamientos diferenciales.

Habiendo ya cumplido con los requisitos asociados a la cimentación de la estructura ante la licuación, se deberá diseñar como una losa maciza armada en dos direcciones todo piso bajo el cual existiesen estratos licuables.

5.18 Artículo 18.- Mejoramiento de suelos para reducir el potencial de licuación

El PR propone el tipo de cimentación para apoyar la estructura sobre suelos no licuables o una técnica para mejorar las condiciones del suelo y lograr una Probabilidad de Licuación (P_L) permisible para la edificación a construir y el parámetro de caracterización elegido. En el caso de mejoramiento del suelo, es obligatorio caracterizar el suelo mejorado mediante un adecuado programa de exploración de campo que permita realizar un nuevo Análisis del Potencial de Licuación. Se debe verificar en este nuevo análisis el cumplimiento de las condiciones estipuladas previamente. Respecto al mejoramiento de suelos, algunas de las soluciones que reducen el potencial de licuación son la compactación dinámica, vibración profunda, micro voladuras, compactación por impactos rápidos, métodos por mezcla, entre otros. Para mayor detalle sobre las soluciones existentes por mejoramiento de suelos, consultar el CAPÍTULO DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO.

5.19 Artículo 19.- Casos especiales de licuación: suelos finos

De presentarse un suelo con contenido de finos superior a 20% (comportamiento tipo-arcilla), sumergido y que presente las siguientes características:

- $w_c/LL > 0.85$
- $IP < 12$

Se considerará que la licuación podrá también suceder en dicho suelo, si es sometido a esfuerzos sísmicos considerables. Sin embargo, los efectos de la licuación en este tipo de suelos difieren notablemente de aquellos granulares. En edificaciones de tipo A, se debe realizar ensayos en laboratorio para determinar la resistencia a la licuación del suelo. De no ser el caso, estimarlo mediante fórmulas empíricas mediante el s_u de la arcilla. Estimar los posibles efectos de esta en el suelo “tipo-arcilla”, como los asentamientos asociados y la pérdida de resistencia causada.

De ser el suelo limoso u arcilloso con $12 < IP < 18$ y w_c/LL a partir de 0.8, también podría ser susceptible a la licuación. Para tales suelos se recomienda estudiar su susceptibilidad mediante ensayos de laboratorio.

5.20 Artículo 20.- Casos especiales de licuación: estructuras particulares anómalas

En el caso de que la información existente indique que el comportamiento mecánico de las partículas en el suelo de sitio de estudio sea anómalo (cenizas volcánicas, arenas pumíceas, por ejemplo), se advierte precaución al PR en caso que se use las correlaciones recomendadas en el ANEXO 2 y se insta a utilizar correlaciones alternativas acordes al caso.

6. Recomendaciones

- Destinar esfuerzos mayores a la investigación de suelos en el Perú y desarrollo de correlaciones que permitan asegurar mejores caracterizaciones geotécnicas. Esto incluye mapeos detallados que incluyan la caracterización sísmico-geotécnica en otros lugares aparte de Lima y mapas con zonificación de nivel freático. Incluir zonificaciones de peligro de licuación y hacer uso de los nuevos índices desarrollados como son LPI-ISH, LSN, LSN-ISH. Promover la calibración y desarrollo de nuevas leyes de atenuación (también conocidos como modelos de movimiento de terreno). Eventualmente, en base al marco teórico del PEER (PLHA), desarrollar un mapa de riesgo de licuación de escala nacional, comparable a los existentes de riesgo sísmico. Su uso ingenieril sería de apoyo y referencia, no como reemplazo de las evaluaciones específicas de sitio.
- Empezar un plan que lleve al estado del arte actual del análisis de potencial de licuación al uso de métodos totalmente probabilísticos (PLHA). Promover en la investigación y, eventualmente en la práctica el uso de análisis de desempeño. Extrapolar los conocimientos de esta metodología a otras ramas de la ingeniería, como la ingeniería estructural.
- En base a la herramienta de riesgos sísmicos de USGS.gov, proponer una herramienta similar para el territorio peruano, con el fin de posibilitar la obtención de desagregaciones de riesgo sísmico y en consecuencia facilitar las aplicaciones ingenieriles de evaluaciones de licuación que consideren la contribución de todas las magnitudes correspondientes a todas las fuentes sísmicas, en todos los tiempos de retorno.
- De no ser posible lo anterior, o provisionalmente, facilitar el uso de los modelos de riesgo sísmico con software de PSHA como R-CRISIS, para lo cual se presenta un

archivo adjunto basado en el trabajo de Tavera et al. (2014). Tomando tales como referencia, facilitar el uso de modelos más recientes (Aguilar y Tarazona, 2024), los cuales permiten obtener valores de aceleración máxima para tiempos de retorno distintos más ceñidos a la realidad, así como las desagregaciones respectivas.

- Respecto a observaciones realizadas sobre otros capítulos de la E.050, considerar el efecto del asentamiento causado por los sismos (sin ocurrir licuación) en la norma E.050. Así, se podría tener en cuenta los asentamientos en una construcción bajo todo tipo de posibles sollicitaciones externas posteriores a su ejecución. Incorporar en el capítulo de cimentaciones profundas por pilotes consideraciones adicionales por la ocurrencia de licuación. Fellenius y Siegel (2008) plantean que, de ocurrir licuación bajo el plano neutral —aquella zona donde los esfuerzos son máximos y el pilote se desplaza en conjunto con el suelo— el mismo plano se desplaza hacia abajo, acentuando la penetración de la punta en el suelo y alterando las sollicitudes de carga sobre el sistema suelo-pilote. Se ha evitado incluir tales consideraciones en el capítulo de licuación puesto que se debe evaluar su viabilidad respecto a las otras pautas de diseño incluidas, lo cual excede al alcance de esta tesis.
- Impulsar en el campo de la investigación geotécnica los esfuerzos para la caracterización de gravas en el Perú. Como se ha visto, el ensayo *Becker Penetration Test* (BPT) y el *Dynamic Cone Penetration Test* (DPT) de China son dos de los ensayos más usados en el mundo para este fin. Para fines ingenieriles, desarrollar soluciones efectivas para la caracterización de gravas, con el fin de que se puedan usar en campo de manera económica y fiable. Promover el uso e investigación de ensayos como el SPT en intervalos cortos, cuyo equipo es el de mayor uso en el Perú.
- Establecer observatorios en los puntos donde se registró licuación o de alta susceptibilidad, para obtener registros que enriquezcan las bases de datos existentes

con fines investigativos. Debe discutirse a menudo la importancia de las mediciones hechas previas a un sismo y posteriores a este en el campo de la investigación con el fin de realizar evaluaciones teóricamente consistentes.

- Se recomienda el seguir evaluando a profundidad los sesgos y fallos inherentes en los métodos existentes de evaluación de licuación, recopilación de casos históricos y desarrollo de curvas. Proponer soluciones, realizar estudios que sustenten su validez y promover su uso en la comunidad geotécnica.
- Considerar escenarios de secuencias de terremotos (así como en Christchurch, Nueva Zelanda) de acuerdo a los estudios sobre las placas tectónicas y rupturas características e incorporar planes de mitigación. En la consideración de este suceso, tomar en cuenta el efecto de los tsunamis en las zonas costeras. Promover la investigación sobre la ocurrencia de tsunamis inducidos por licuación, fenómeno que se ha registrado en Indonesia, y que podría también ocurrir en la costa peruana (Sassa y Takagawa, 2019).
- Se recomienda al comité encargado de la E.050 establecer convenciones al respecto de procedimientos como el del uso del promedio de N o V_s , seguido de una correlación (o viceversa), con el fin de estandarizar su uso en la práctica ingenieril a nivel nacional.
- A su vez, se propone la inclusión de material digital en otras normativas, así como enlaces a bases de datos de caracterización de riesgo. Para una delimitación de los lineamientos que presenten diferencias considerables con lo visto en normas pasadas, se recomiendan señales que indiquen el estado de cada lineamiento al inicio de cada párrafo, de tal forma que se conozca su procedencia y cambios relativos respecto a ediciones anteriores (Véase líneas grises a la izquierda del texto en la Figura 54). Estas propuestas deberían eventualmente verse estandarizadas de forma consistente a

través de todas las normas del Reglamento Nacional de Edificaciones. Estas recomendaciones se basan en lo visto por American Society of Civil Engineers (2022).

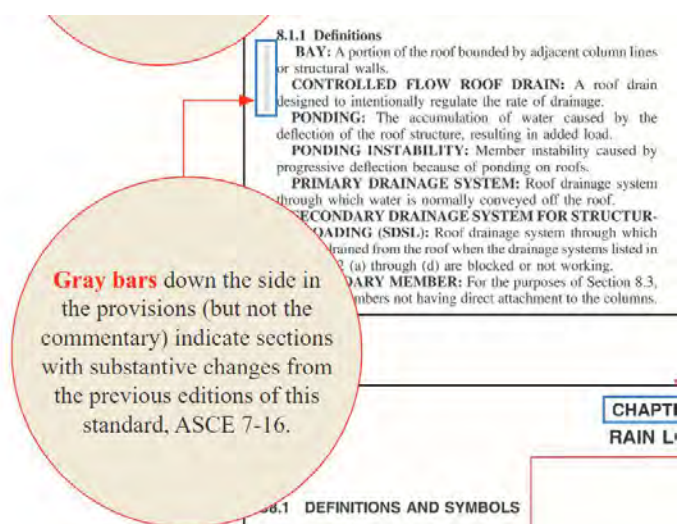


Figura 54. Propuesta para señalización de actualizaciones en Normas. Extraído de ASCE (2022)

- Se recomienda aumentar los esfuerzos investigativos sobre los métodos alternativos de evaluación de licuación, como lo son el basado en deformaciones y el basado en energía, los cuales tienen cada uno sus ventajas inherentes respecto al método basado en esfuerzos. Esto con el fin de desarrollar procedimientos con posible aplicación ingenieril. Hacer énfasis en su desarrollo para casos de estructuras de alta importancia.
- Se recomienda la creación de un portal web en base al del USGS. Este cuenta con herramientas de estudios de riesgo probabilísticos (PSHA) para cualquier punto, así como la desagregación de este análisis por los riesgos contribuidos. Del mismo modo, el USGS integra registros sísmicos con el mapa en una interface gráfica y permite la exportación de archivos Excel o .csv. Este portal debe contar con la publicación con libre acceso de un nuevo catálogo sísmico histórico del Perú, elaborado en contraste y corroboración con la información registrada en el sitio del USGS; y realizando una

revisión individual por sismo, para obtener los parámetros sísmicos más confiables posibles. Asimismo, tener las magnitudes respectivas a cada sismo en magnitud momento. Este catálogo sísmico histórico debería ser actualizado en tiempo real y disponible para su descarga en archivo Excel o .csv.

- Se insta a proseguir con las investigaciones relativas al método de acoplamientos sísmicos, enriqueciendo la proposición del método mismo y con el fin primario de obtener mapas de aceleraciones complementarios para su uso en la evaluación de licuación. A partir de ello realizar comparaciones con los mapas obtenidos por análisis probabilísticos y profundizar la comprensión y el criterio que defina el uso de uno sobre el otro.
- Para el éxito del programa que empieza con esta tesis, el cual es la propuesta del capítulo de licuación actualizado de la NTE E.050, y que incluye su correcta utilización por la comunidad ingenieril, haciendo los lineamientos entendibles y accesibles independientemente de su complejidad, se insta al desarrollo de una aplicación o de una hoja Excel interactiva que permita automatizar los procesos indicados en esta tesis. Específicamente, respecto al proceso del cómputo la evaluación de licuación. Este debe abordar todas las variables, como el parámetro de caracterización del perfil de suelo para cada punto de exploración y la importancia de la edificación a proyectar (de los cuales se desprenden las correlaciones a usar y el enfoque de evaluación, respectivamente).

7. Conclusiones

- Mediante una revisión extensa de las investigaciones realizadas sobre la evaluación de licuación, sus consecuencias y modelos empíricos adicionales en los últimos 20 años, se ha propuesto un capítulo de licuación actualizado para la próxima versión de la NTE E.050.
- Sobre la susceptibilidad de los suelos a la licuación, según su clasificación SUCS, se obtuvieron las siguientes conclusiones generales. Dado que los suelos estén saturados de agua:
 - Para suelos cuyo comportamiento esté gobernado por una matriz arenosa, poco densos, estos serán altamente susceptibles a la licuación. En este tipo de suelos se centra la mayoría de investigaciones existentes, así como la reglamentación propuesta, puesto que las consecuencias llegan a ser desastrosas. Existen modelos basados en lo empírico que permiten conocer la resistencia residual y asentamientos post-licuación, los cuales también son incluidos en la nueva propuesta.
 - Aquellos suelos cuyo comportamiento mecánico esté gobernado por las arcillas (a partir de aproximadamente 25%) presentan un fenómeno conocido como “degradación cíclica”, análogo a la licuación. El suelo puede presentar pérdidas considerables de resistencia y asentamientos, especialmente cuando la porción fina es de arcillas normalmente consolidadas. El límite para que se considere al suelo como “tipo arcilla” es cuestión de controversia, por lo que se establecen criterios basados en la humedad natural y el límite líquido del suelo. De acuerdo a tales, se puede clasificar al suelo como potencialmente susceptible, podría pasar a requerir pruebas de laboratorio o podría ser poco susceptible.

- Los suelos gravosos pueden experimentar licuación, y esta puede tener consecuencias muy dañinas. Sin embargo, su ocurrencia y posibles consecuencias son dependientes del comportamiento de la matriz arenosa. De tener un esqueleto consistente en partículas gravosas en contacto, este sería menos susceptible. Por lo general, la caracterización de este tipo de suelos es más complicada, mismo motivo por el que el conocimiento de las consecuencias de la licuación en este tipo de suelos es limitado.
- Sobre la susceptibilidad de suelos a la licuación, el estado del arte actual no es certero en su definición. Muy recientemente, en el taller del PEER (Stuedlein et al., 2023), existían aún opiniones variadas sobre lo que este término engloba. Principalmente, entre los que consideran que depende solo de las características intrínsecas o materiales del suelo y los que consideran que la susceptibilidad a la licuación de un suelo incluye los efectos del entorno, como la sismicidad. En tal taller también se ha expresado interés mayoritario por el desarrollo de métodos de evaluación de susceptibilidad a licuación por métodos probabilísticos, e incluso por reemplazar el término de “susceptibilidad a licuación” por uno que englobe un mayor rango de perfiles de suelo. En conclusión, se debe prestar atención a los desarrollos respecto a la evaluación de susceptibilidad y a los consensos formados en la posteridad.
- Se ha propuesto un procedimiento estandarizado práctico para la evaluación de susceptibilidad a la licuación de un sitio basado en el *Susceptibility Rating Factor* (SRF) de Kramer (2008), en el cual se consideran las características históricas, geológicas, de composición y el nivel freático. En concordancia con lo mencionado en la segunda definición de susceptibilidad a licuación del ítem anterior, se establece el SRF límite acorde a la zona sísmica en donde se realice la evaluación, no incluido por Kramer (2008).

- Tras la revisión bibliográfica, se reafirma para el análisis de potencial de licuación el uso del método simplificado basado en esfuerzos, también conocido como método de Seed e Idriss. Adicionalmente, se ha abordado brevemente en los marcos teóricos de métodos alternativos con mediciones de intensidad diferentes, como lo son las deformaciones cíclicas, la intensidad de Arias y la velocidad acumulativa promedio CAV_5 . Cada uno de estos métodos presenta particularidades que los distinguen uno del otro en su aplicabilidad, sus incertidumbres y su capacidad de predecir la licuación.
- Sin embargo, se recoge de la revisión algunos defectos o limitaciones inherentes al planteamiento del método simplificado basado en esfuerzos, unas debido a sus fundamentos teóricos inherentes y otros debido a la práctica ingenieril, en su aplicación como en campo. Estas son posibles fuentes de incertidumbre. Dichas fuentes de incertidumbre no descalifican el uso del método simplificado basado en esfuerzos, el cual ha dado resultados satisfactorios en la práctica ingenieril; sino que deben ser tomados en cuenta para el refinamiento de los procedimientos en campo, en la aplicación del método y en los criterios de análisis para desarrollo de correlaciones y bases de datos de casos históricos. Se describen:
 - La elección de una única aceleración máxima a partir de mapas sísmicos (los cuales parten de un PSHA) puede no ser representativa del nivel de intensidad del registro sísmico entero, a lo cual la magnitud M_w sirve como parámetro para capturar la duración del sismo, la cual asimismo puede ser considerablemente imprecisa en capturar esta característica.
 - Sobre algunos de los mapas sísmicos existentes (de PSHA), como los de Tavera et al. (2014), los valores de a_{max} , son de suelo rígido, casi roca. Estos valores no representan a los existentes en suelos licuables (efecto de sitio).

- El hecho que la presión de poros está realmente más asociada a la deformación que al esfuerzo ejercido (es en este último que se basa el método simplificado). Dada las características intrínsecas del CPT/SPT y de los ensayos geofísicos (V_s), esta asociación brinda teóricamente ventaja a la caracterización con CPT/SPT, que induce a niveles de deformación mayores que los de ensayos geofísicos.
- El que no haya una variable independiente que capture la demanda sísmica. De tal modo que se usan a_{max} y M_w en simultáneo, las cuales tienen una complicada relación entre sí. M_w se usa como variable representativa de duración de un sismo (número de ciclos). Sin embargo, dos sismos de mismo M_w podrían ser de distinta duración, lo que obedece a las características tectónicas de cada sismo.
- Al sobreponerse un estrato rígido sobre estratos de suelo blando, puede ocurrir un fenómeno conocido como inversión de impedancia, el cual altera el factor de reducción r_d , obteniendo valores de CSR menores a las reales, de usarse las correlaciones existentes en la literatura. No se conoce con exactitud el grado de incertidumbre en el que este fenómeno fuera capaz de alterar las evaluaciones de potencial de licuación.
- Se reconoce que hay un grado de conservadurismo adicional existente debido a los efectos del empotramiento de la estructura, sobre todo en estructuras de gran área techada, puesto que la interacción suelo-estructura causa atenuación en la aceleración generada por un sismo a nivel de cimentación, respecto a las medidas a nivel superficial y a condiciones libres (FEMA, 2020).
- Posibles incertidumbres que parten de lo correcto en la realización de los ensayos in situ: SPT, CPT y los ensayos geofísicos. Es fundamental la correcta

calibración de los equipos. En el caso del SPT, la estimación de la energía aplicada respecto a la realmente aplicada es una fuente posible de error.

- Las curvas empíricas de CRR usadas para la evaluación de licuación, parten principalmente de la asunción que el suelo que licúa es el que presenta evidencias superficiales. Dicha idiosincrasia se considera como un sesgo que afecta el juicio correcto de cada correlación (Upadhyaya et al., 2023).
- Sobre la aplicación del método simplificado se ha realizado propuestas sobre los enfoques determinístico y probabilístico. Se propone que para el análisis determinístico se evalúe un caso crítico como el del megaterremoto de Lima (M_w 8.8), mediante el mapa de acoplamiento sísmico de Pulido et al. (2012). Para el enfoque probabilístico se propone el uso de desagregaciones en pares $a_{max}-M_w$ derivadas de análisis probabilísticos de peligro sísmico (PSHA), basados en catálogos sísmicos estocásticos. Esto es con el fin de obtener la contribución de todas las fuentes sísmicas sobre un sitio de estudio y clasificar tal contribución en función a la magnitud del sismo. El FS_L calculado viene a ser un ponderado de los FS_L para cada intervalo de magnitud, de acuerdo a su contribución sobre el peligro sísmico. Respecto a este enfoque, se proponen parámetros probabilísticos (probabilidad de excedencia, tiempo de exposición, tiempo de retorno) a cumplir, los cuales dependen de la clasificación de la edificación (A, B y C), también usada en la NTE E.050 (2018) y en la NTE E.030. Además, se establecen límites para la probabilidad de licuación o factor de seguridad.
- Respecto a la implementación de métodos probabilísticos bien definidos, se ha visto conveniente el uso del software libre R-CRISIS, que permite realizar PSHA y la desagregación de riesgo por magnitudes. Al final de esta tesis, se presenta un archivo que facilita la realización de PSHA y desagregaciones en cualquier sitio del Perú, el

cual incorpora la caracterización sísmica de Tavera et al. (2014). En el ANEXO 1 se presenta la información que contiene el archivo específicamente, así como los *inputs* requeridos por el geotecnista que lo vaya a usar.

- Tras esta tesis, se concluye que la denominación de enfoque determinístico y probabilístico resulta insuficiente de por sí. La denominación apropiada, más que binaria, es la de un espectro, en el cual pueden tomarse una variedad de consideraciones que aproximan al resultado al de uno estrictamente probabilístico o a uno estrictamente determinístico. Se acentúan estas cualidades cuando se toma en cuenta factores que influyen en la probabilidad de licuación pero que no se puede estimar correctamente (por ejemplo, la variación del nivel freático) o el uso de modelos de manifestación superficial, respecto al cual se propone su uso determinístico.
- Tomando en cuenta esto, el enfoque probabilístico propuesto en esta tesis corresponde al de efectuar las ecuaciones de resistencia a la licuación con iteraciones que representen la contribución de magnitudes en el peligro sísmico, al que le sucede la verificación determinística de manifestación de licuación superficial mediante el método propuesto por Ishihara (de no cumplir con el P_L objetivo).
- Se ha visto un interés incrementado sobre varios temas relativos a la licuación en los años más recientes. Entre ellos se encuentran: la prospección geofísica para la investigación y caracterización de suelos, con el fin de evaluar el potencial de licuación; el estudio de la manifestación superficial de licuación (modelo H_1-H_2) y el planteamiento de índices y correlaciones que ponderen el efecto de este modelo; los asentamientos en edificaciones inducidos por el fenómeno de licuación, entre otros. Se ha realizado una reseña de dichos temas, tomando en cuenta sus ventajas y limitaciones. Tales se han considerado a la hora de establecer un P_L límite, así como

que su uso considera un cambio en los requisitos de prospección: se podría realizar solo una investigación directa se encontrarse condiciones regulares respecto a estratigrafía.

- Basado en el modelo de manifestación superficial (H_1 - H_2) de Ishihara (1985), se permite la existencia de estratos licuables bajo el fondo de cimentación (nunca directamente), siempre y cuando la ocurrencia de licuación no ocasione manifestaciones superficiales. De forma complementaria a este modelo se puede usar índices de potencial de licuación, entre los cuales se ha tomado como más conveniente el LSI.
- Se ha revisado normativas internacionales, como la española, mexicana, costarricense y estadounidense (ASCE). Se ha obtenido conocimientos valiosos de la inspección de cada una y realizado los comentarios pertinentes respecto a lo abordado sobre el fenómeno de la licuación y relacionados. Respecto a la misma NTE E.050 y a otras normas revisadas en esta investigación, la propuesta actual constituye una cuyo marco teórico es el más avanzado y conforme con el estado del arte, regido por las publicaciones científicas.
- Algunas de las modificaciones planteadas incluyen curvas de evaluación de resistencia a la licuación (CRR) basadas en conjuntos de datos más amplios, que permitirán realizar evaluaciones más confiables; consideraciones adicionales respecto a los sismos que se utilizarán para la evaluación de licuación, discusión de los enfoques probabilístico y determinístico, consideraciones para licuación en suelos gravosos y arcillosos, consideraciones estructurales, manifestación de licuación en la superficie, entre otros.
- Si bien se espera que las nuevas curvas CRR permitan la realización de análisis con resultados más confiables, comparados con los mismos análisis usando las curvas

anteriores, la mayor parte de la responsabilidad sobre las fuentes de error generadas recae sobre los *inputs* ingenieriles (parámetros in situ, a_{max} , r_d , entre otros) (Kavazanjian et al., 2022). Por lo tanto, sigue siendo crucial la correcta realización de ensayos in situ, conformes con sus estándares, así como el buen criterio del geotecnista responsable al interpretar los datos.

- En la elaboración de la propuesta presentada se ha tomado en cuenta el flujo lógico de la etapa de caracterización geotécnica del sitio a proyectar, partiendo del reconocimiento de sitio y evaluación de susceptibilidad a la licuación hasta la determinación de la profundidad de cimentación aceptable, con consideración de situaciones adversas que resultan en la iteración y replanteo de trabajos. Se ha procurado optimizar dicho flujo, así minimizando la posibilidad de incurrir en sobrecostos y el aplazamiento por ampliación del programa de investigación. Se presenta el flujo mencionado en la propuesta de actualización de la NTE E.050 (ANEXO 3), con fines ilustrativos.
- En base a lo referente a la licuación y a lo aprendido en general, se ha propuesto una serie de recomendaciones dirigidas a la comunidad geotécnica en el Perú con el fin de afinar las prácticas y procedimientos de evaluación, así como llegar a consensos e incentivar la investigación.

8. Bibliografía

- Aguilar, Z., & Tarazona, J. (2024, julio 5). *New Seismicity Based Seismic Sources and Hazard Model for Peru*. Milan.
- Aguilar, Zenón, & Alva, J. (2013). *Microzonificación Sísmica de Lima*.
- Alata, J., Zevillanos, W., & Durán, G. (2020). Empirical correlation between shear wave velocity and the N value of the standard penetration test in sandy soils of Juliaca city - Peru. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.39>
- Alhuay-León, C. G., & Trejo-Noreña, P. C. (2021). The empirical correlation between shear wave velocity and penetration resistance for the eolian sand deposits in the city of olmos-peru. *DYNA (Colombia)*, 88(217), 247-255. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.93317>
- Alva, J., Meneses, J., Chang, L., Lara, J., & Nishimura, T. (1992). *Ground effects caused by the Alto Mayo earthquakes in Peru (1992)*.
- Alva, J., & Ortiz, C. (2020). Updating the Occurrence of the Soil Liquefaction Phenomenon in Peru. *TECNIA*, 30(2), 6-17. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i2.756>
- American Society of Civil Engineers. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*.
- Asadi, M. B., Orense, R. P., Asadi, M. S., & Pender, Michael. J. (2023). Empirical Assessment of Liquefaction Resistance of Crushable

Pumiceous Sand Using Shear Wave Velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(2).

<https://doi.org/10.1061/jggefek.gteng-10405>

Asociación Costarricense de Geotecnia. (2009). *Código de Cimentaciones de Costa Rica* (Second). Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2004). *Evaluating the Potential for Liquefaction or Cyclic Failure of Silts and Clays*.

Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures*.

Boulanger, R. W., & Ziotopoulou, K. (2018). *PM4Silt (Version 1): A Silt Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications*.

Boulanger, R., & Ziotopoulou, K. (2015). *PM4Sand Version 3: A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/273694951>

Bray, J. D., & Macedo, J. (2017). *Simplified procedure for estimating liquefaction-induced building settlement*. 101-118. Recuperado de <https://www.issmge.org/publications/online-library>

Bray, J. D., & Sancio, R. B. (2006). Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(9), 1165-1177.
<https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412006132:91165>

Cetin, K. O., Seed, R. B., Kayen, R. E., Moss, R. E. S., Bilge, H. T., Ilgac, M., & Chowdhury, K. (2018a). SPT-based probabilistic and deterministic

assessment of seismic soil liquefaction triggering hazard. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 698-709.

<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.012>

Cetin, K. O., Seed, R. B., Kayen, R. E., Moss, R. E. S., Bilge, H. T., Ilgac, M., & Chowdhury, K. (2018b). The use of the SPT-based seismic soil liquefaction triggering evaluation methodology in engineering hazard assessments. *MethodsX*, 5, 1556-1575.

<https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.11.016>

Chareyre, B. (2007). *DEM Modeling and Geotechnical Applications*.

Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/235652094>

Condori, C., & Tavera, H. (2012). Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú, a partir de la variación del parámetro “b”. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 103(106), 23-36.

Cubrinovski, M., Bray, J. D., De La Torre, C., Olsen, M. J., Bradley, B. A., Chiaro, G., ... Wotherspoon, L. (2017). Liquefaction Effects and Associated Damages Observed at the Wellington CentrePort from the 2016 Kaikoura Earthquake. En *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* (Vol. 50).

Di Fiore, V., Punzo, M., Cavuoto, G., Galli, P., Mazzola, S., Pelosi, N., & Tarallo, D. (2020). Geophysical approach to study the potential ocean wave-induced liquefaction: an example at Magoodhoo Island (Faafu Atoll, Maldives, Indian Ocean). *Marine Geophysical Research*, 41(2).

<https://doi.org/10.1007/s11001-020-09408-8>

- Dickenson, S. (2005). *Recommended Guidelines for Liquefaction Evaluations Using Ground Motions From Probabilistic Seismic Hazard Analysis*.
- Dikmen, Ü. (2009). Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(1), 61-72. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/007>
- Dobry, R. (1989). Some Basic Aspects of Soil Liquefaction during Earthquakes. *Annals of the New York Academy of Sciences*.
- Erickson, G. E., Plafker, G., & Fernández-Concha, J. (1970). *Preliminary Report on the Geological Events Associated with the May 31, 1970 Peru Earthquake*.
- European Committee for Standardization. (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects*. Brussels.
- Fellenius, B. H., & Siegel, T. C. (2008). Pile Drag Load and Downdrag in a Liquefaction Event. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(9), 1412-1416. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2008\)134:9\(1412\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2008)134:9(1412))
- FEMA. (2020). *A Practical Guide to Soil-Structure Interaction*. Recuperado de www.ATCCouncil.org
- FEMA P-750. (2009). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*. Washington D.C. Recuperado de www.bssconline.org

Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones*.

Gobierno del Perú. (1970). *Reglamento Nacional de Construcciones*.

Green, R. A., Bommer, J. J., Rodriguez-Marek, A., Maurer, B. W., Stafford, P.

J., Edwards, B., ... van Elk, J. (2019). Addressing limitations in existing 'simplified' liquefaction triggering evaluation procedures: application to induced seismicity in the Groningen gas field. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(8), 4539-4557. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0489-3>

Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2010). *SPT- Based Liquefaction Triggering Procedures*.

INDECI. (2017). *Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8Mw*. Lima. Recuperado de www.indeci.gob.pe

Institut de Recherche pour le Développement, & IGP. (2010). *Sistema de Información Geográfico y análisis de recursos esenciales para la respuesta y recuperación temprana ante la ocurrencia de un sismo y/o tsunami en el área metropolitana de Lima y Callao*.

Instituto Geofísico del Perú. (2023). Mapa Sísmico del Perú. Recuperado 4 de diciembre de 2024, de Instituto Geofísico del Perú website: <https://ultimosismo.igp.gob.pe/mapas-sismicos>

Ishihara, K. (1985). *Stability of Natural Deposits During Earthquakes*.

Recuperado de <https://www.issmge.org/publications/online-library>

- Ishihara, K., & Yoshimine, M. (1992). Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes. *SOILS AND FOUNDATIONS*, 32(1), 173-188.
- Iwasaki, T., Arakawa, T., & Tokida, K. I. (1984). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(1), 49-58.
[https://doi.org/10.1016/0261-7277\(84\)90027-5](https://doi.org/10.1016/0261-7277(84)90027-5)
- Juang, C., Yuan, H., Lee, D.-H., & Lin, P.-S. (2003). Simplified Cone Penetration Test-based Method for Evaluating Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(1), 66-80. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412003129:166>
- Kang, X., Ma, Z. R., & Ge, L. (2025). Advancing the state of the art of cyclic direct simple shear Testing: Histories, current status, challenges and future trends. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 199, 109705.
<https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2025.109705>
- Kavazanjian, E., Andrade, J. E., Arulmoli, K. A., Atwater, B. F., Christian, J. T., Green, R., ... Gibbs, C. R. (2022). State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences. In *State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23474>
- Kawasumi, H. (1968). *Introduction «General Report on the Niigata Earthquake of 1964»*. Tokyo.

- Kayabali, K., Akturk, O., Fener, M., & Dikmen, O. (2015). Revisiting the Bjerrum's correction factor: Use of the liquidity index for assessing the effect of soil plasticity on undrained shear strength (2015). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 716-721.
- Kayen, R., Moss, R. E. S., Thompson, E. M., Seed, R. B., Cetin, K. O., Kiureghian, A. Der, ... Tokimatsu, K. (2013). Shear-Wave Velocity–Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(3), 407-419. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000743](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000743)
- Kramer, S. L. (2008). *Evaluation of Liquefaction Hazards in Washington State*.
- Kramer, S. L., & Mayfield, R. T. (2007). Return Period of Soil Liquefaction (Vol. 133). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2007\)133:7\(802\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:7(802))
- Kramer, S. L., & Wang, C.-H. (2015). Empirical Model for Estimation of the Residual Strength of Liquefied Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001317](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001317)
- Kubo, K., & Mogami, T. (1953). *The Behaviour of Soil During Vibration*. Recuperado de <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Lasley, S. J., Green, R. A., & Rodriguez-Marek, A. (2016). New Stress Reduction Coefficient Relationship for Liquefaction Triggering Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(11). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001530](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001530)

- Liao, S. S. C., & Whitman, R. V. (1986). *Overburden Correction Factors for SPT in Sand*.
- Lillie, R. (2015). *Beauty from the Beast: Plate Tectonics and the Landscapes of the Pacific Northwest*. Wells Creek Publishers.
- Liu, H., Wang, W., Liu, J., Chen, Y., & Yang, G. (2017). Large-scale field tests on blast-induced liquefaction in saturated sand. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39, 601-608.
<https://doi.org/10.11779/CJGE201704003>
- Liu, J. (2020). Influence of Fines Contents on Soil Liquefaction Resistance in Cyclic Triaxial Test. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5), 4735-4751. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01323-4>
- Lu, G., & Fall, M. (2018). Simulation of Blast Induced Liquefaction Susceptibility of Subsurface Fill Mass. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(3), 1683-1706. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0423-5>
- Mahvelati, S., Coe, J., Stuedlein, A., Karikari Asabere, P., Gianella, T., & Kordjazi, A. (2020). Recovery of Small-Strain Stiffness Following Blast-Induced Liquefaction Based on Shear Wave Velocity Measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, 58. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0658>
- Martínez, A. (2003). Licuación de gravas en el Perú. *Boletín del Instituto de Investigación*, 35-39.

- Martinez, A. (2017, septiembre 20). El terreno se “licuó” bajo Ciudad de México. *Vozpópuli*. Recuperado de https://www.vozpopuli.com/next/terreno-licuo-ciudad-mexico_0_1064893936.html
- Maurer, B. W., Green, R. A., & Taylor, O. D. S. (2015). Moving towards an improved index for assessing liquefaction hazard: Lessons from historical data. *Soils and Foundations*, 55(4), 778-787. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.06.010>
- Meisina, C., Bonì, R., Bozzoni, F., Conca, D., Perotti, C., Persichillo, P., & Lai, C. G. (2022). Mapping soil liquefaction susceptibility across Europe using the analytic hierarchy process. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(11), 5601-5632. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01442-8>
- Ministerio de Fomento. (2019). *Documento Básico SE-C Cimientos*.
- Ministerio de la Vivienda Construcción y Saneamiento. (1997). *NTE E.050 Suelos y Cimentaciones*. Peru.
- Ministerio de Transporte. (2012). *Manual de diseño de Cimentaciones superficiales y profundas para carreteras*.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2006). *NTE E.050 Suelos y Cimentaciones*. Recuperado de www.construccion.org
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2018). *NTE E.030 Diseño Sismorresistente*.
- Muñoz, A. (2020). *Comentarios a la Norma Peruana Sismorresistente*.

- National Oceanic and Atmospheric Administration, & National Geophysical Data Center. (2012). Natural Hazards Image Database. <https://doi.org/https://doi.org/10.7289/V5154F01>
- Nemat-Nasser, S., & Shokooh, A. (1979). A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(4), 659-678. <https://doi.org/10.1139/t79-076>
- Nilay, N., Chakraborty, P., & Popescu, R. (2022). Liquefaction Hazard Mapping Using Various Types of Field Test Data. *Indian Geotechnical Journal*, 52(2), 280-300. <https://doi.org/10.1007/s40098-021-00570-3>
- Ohsaki, Y. (1966). *Niigata Earthquakes 1964, Building Damage and Soil Condition*.
- Olcese, M., & Zegarra, J. (2008). Aspectos geotécnicos del sismo del 15 de agosto de 2007 en Pisco. En *La geofísica y su aporte en la reducción de riesgos de desastres naturales* (pp. 127-133).
- Ordaz, M., & Salgado-Gálvez, M. A. (2020). *R-CRISIS Validation and Verification Document. ERN Technical Report*. Mexico.
- Papathanassiou, G., Valkaniotis, S., Chaztipetros, Al., & Pavlides, S. (2010). Liquefaction Susceptibility Map of Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43, 1383. <https://doi.org/10.12681/bgsg.11314>
- Pulido, N., Aguilar, Z., Tavera, H., Chlieh, M., Calderón, D., Sekiguchi, T., ... Yamazaki, F. (2015). Scenario source models and strong ground motion for future megathrust earthquakes: Application to Lima, central Peru. *Bulletin*

of the Seismological Society of America, 105(1), 368-386.

<https://doi.org/10.1785/0120140098>

Pulido, N., Tavera, H., Aguilar, Z., Calderón, D., Chlieh, M., Sekiguchi, T., ...

Yamazaki, F. (2012). Mega-earthquakes Rupture Scenarios And Strong Motion Simulations for Lima, Peru. *The International Symposium for CISMID 25th Anniversary*.

Rateria, G., & Maurer, B. W. (2022). Evaluation and updating of Ishihara's

(1985) model for liquefaction surface expression, with insights from machine and deep learning. *Soils and Foundations*, 62(3), 101131.

<https://doi.org/10.1016/J.SANDF.2022.101131>

Rengifo, J. (2023). *Evaluación del Potencial de Licuación de Suelos Mediante*

Ensayos Geofísicos en Tamarate–Loreto Debido al Sismo de Lagunas (2019).

Rodríguez-Pacheco, R., Caparrós, A. V., Alcolea, A., Martínez-Pagán, P.,

Martínez-Segura, M. A., García-García, C., ... Zarroca, M. (2022). Static Liquefaction Causes the Flow Failure of a Tailings Dam: A Case Study of El Descargador, Cartagena–La Unión Mining Region, SE Spain (October 1963). *Minerals*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/min12121488>

Rollins, K. M., Roy, J., Athanasopoulos-Zekkos, A., Zekkos, D., Amoroso, S.,

Cao, Z., ... Di Giulio, G. (2022). A New Vs-Based Liquefaction-Triggering Procedure for Gravelly Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(6).

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002784](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002784)

- Ross, G., Seed, H. B., & Migliaccio, R. (1969). Bridge foundations in Alaska Earthquake. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASME*, 1007-1036.
- Roy, J., Rollins, K. M., Athanasopoulos-Zekkos, A., Harper, M., Linton, N., Basham, M., ... Zekkos, D. (2022). Gravel liquefaction assessment using dynamic cone penetration and shear wave velocity tests based on field performance from the 1964 Alaska earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 160.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107357>
- Sassa, S., & Takagawa, T. (2019). Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters. *Landslides*, 16(1), 195-200.
<https://doi.org/10.1007/s10346-018-1114-x>
- Seed, H. B. (1976). *Evaluation of soil liquefaction potential for level ground during earthquakes: A summary report.*
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential.*
- Seed, H., & Idriss, I. (1982). *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes.*
- Seed, H., Idriss, I., & Arango, I. (1983). Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3), 458-482.

- Seed, R. B. (2010). *Technical Review and Comments 2008 EERI Monograph «Soil Liquefaction During Earthquakes»*. Recuperado de <http://www.vulcanhammer.org>
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., ... Faris, A. (2003). *Recent Advances In Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework*.
- Shuttle, D., Marinelli, F., Brasile, S., & Jefferies, M. (2021). Validation of Computational Liquefaction for Tailings: Tar Island Slump. *Geotechnical Research*, 1-8. <https://doi.org/10.1680/jgere.21.00007>
- Silgado, E. (1978). *Historia de los Sismos más Notables Ocurridos en el Perú (1513-1974)*.
- Solorzano Morales, M. P. (2023). *Uso de Geofísica en el Análisis de Cimentaciones para su Aplicación en la NTE E.050-18 Suelos y Cimentaciones*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Sonmez, H., & Gokceoglu, C. (2005). A liquefaction severity index suggested for engineering practice. *Environmental Geology*, 48(1), 81-91. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1263-9>
- Stewart, J., Liu, A., & Choi, Y. (2003). Amplification Factors for Spectral Acceleration in Tectonically Active Regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Structural Engineers Association of California. Vision 2000 Committee. (1995). *Performance-based seismic engineering of buildings*. Structural Engineers Association of California.

- Stuedlein, A. W., Alemu, B., Evans, T. M., Kramer, S. L., Stewart, J. P., Ulmer, K., & Ziotopoulou, K. (2023). *PEER Workshop on Liquefaction Susceptibility*.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A., & Ishizawa, O. (2014). *Re-evaluación del Peligro Sísmico Probabilístico Para el Perú*.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. (Ralph B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley.
- Tonkin & Taylor. (2013). *Liquefaction Vulnerability Study*.
- Travasarou, T., Bray, J., & Abrahamson, N. (2003). Empirical attenuation relationship for Arias Intensity. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32, 1133-1155. <https://doi.org/10.1002/eqe.270>
- Upadhyaya, S., Green, R. A., Rodriguez-Marek, A., & Maurer, B. W. (2023). True Liquefaction Triggering Curve. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(3). <https://doi.org/10.1061/jggef.k.gteng-11126>
- Van Ballegooy, S., Malan, P., Lacrosse, V., Jacka, M. E., Cubrinovski, M., Bray, J. D., ... Cowan, H. (2014). Assessment of liquefaction-induced land damage for residential Christchurch. *Earthquake Spectra*, 30(1), 31-55. <https://doi.org/10.1193/031813EQS070M>
- Verdugo, R. (2016). Experimental and conceptual evidence about the limitations of shear wave velocity to predict liquefaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 91, 160-174. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.09.046>

- Xia, P., Zhou, Y. G., & Chen, Y. M. (2024). An improved characterization model of liquefaction resistance by shear wave velocity for binary mixtures with consideration of coarse content. *Engineering Geology*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107459>
- Youd, T L, Idriss, I. M., & Andrus, A. (1997). *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*.
- Youd, T. Leslie, & Garris, C. T. (1995). Liquefaction-induced ground-surface disruption. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(11), 805-809. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:11\(805\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:11(805))
- Zavala, G. J., Olcese, M., Zegarra, J., & Moreno, V. (2012). Caracterización Geotécnica de Localidades Sujetas al Fenómeno de Licuación- El Caso de Tambo de Mora. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 12(1), 102.
- Zhang, C., Chen, Y., Wang, Y., & Bai, Q. (2024). Discrete element method simulation of granular materials considering particle breakage in geotechnical and mining engineering: A short review. *Green and Smart Mining Engineering*, 1(2), 190-207. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.06.003>
- Zhang, F., Wang, C., Chang, J., & Feng, H. (2022). DEM analysis of cyclic liquefaction behaviour of cemented sand. *Computers and Geotechnics*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104572>
- Zhang, G., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. I. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground.

Canadian Geotechnical Journal, 39(5), 1168-1180.

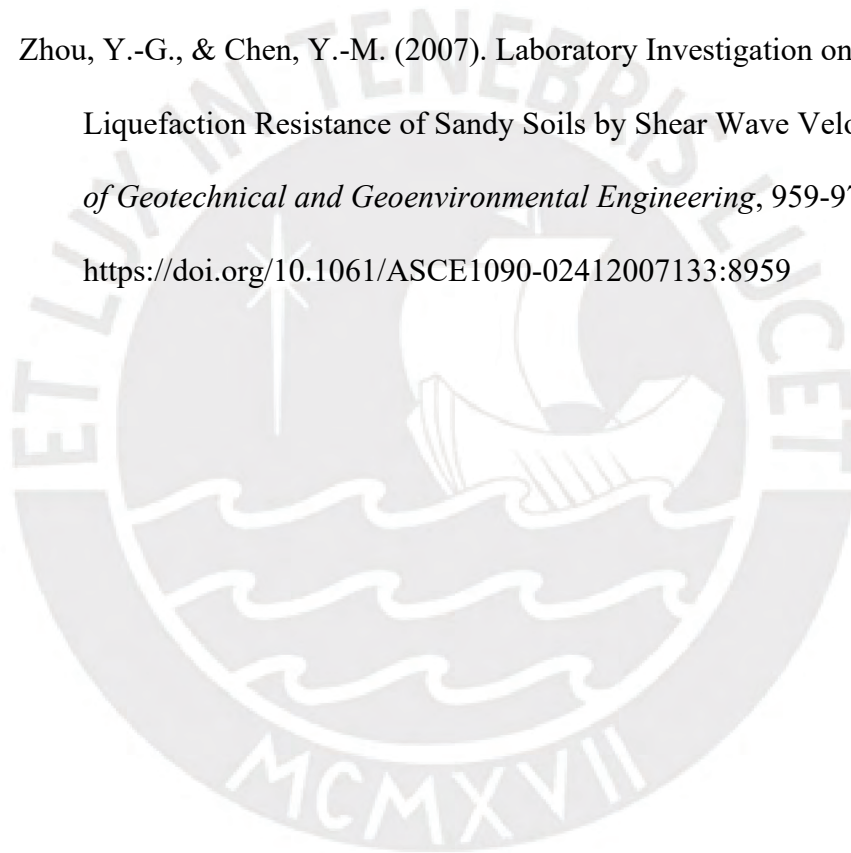
<https://doi.org/10.1139/t02-047>

Zhang, G., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. I. (2004). Estimating Liquefaction-Induced Lateral Displacements Using the Standard Penetration Test or Cone Penetration Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 861-871.

<https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412004130:8861>

Zhou, Y.-G., & Chen, Y.-M. (2007). Laboratory Investigation on Assessing Liquefaction Resistance of Sandy Soils by Shear Wave Velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 959-972.

<https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412007133:8959>



9. Anexos

9.1 Anexo 1 - Uso del software R-Crisis

Introducción

R-CRISIS (Ordaz y Salgado-Gálvez, 2020) es un software que permite realizar análisis de peligro sísmico probabilístico, de tal forma que se considera el efecto de múltiples fuentes sísmicas en simultáneo sobre un sitio de interés. Se puede obtener el peligro sísmico para distintos tiempos de retorno, de acuerdo al tiempo de vida útil de la edificación. En el contexto de análisis de potencial de licuación, el uso de R-CRISIS permite seguir las recomendaciones de Kavazanjian et al. (2022). El software R-CRISIS también puede ejecutar por sí mismo un análisis de peligro de licuación probabilístico en base al modelo de Ku et al. (2012), el cual es un modelo probabilístico derivado de Robertson y Wride (1998); sin embargo, solo es aplicable para el parámetro q_c del CPT.

Información incluida en el archivo adjunto

i. Mapas: Se incluye un mapa del Perú con divisiones entre departamentos, así como un archivo de ciudades con las longitudes y latitudes de cada ciudad.

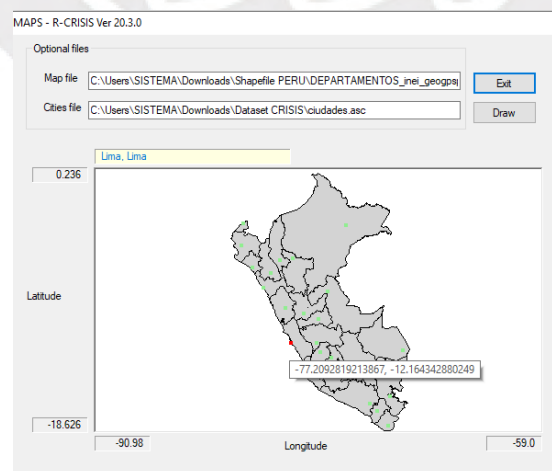


Figura A1. Mapa y ciudades en R-CRISIS

ii. Fuentes sísmicas: Acorde a las longitudes, latitudes y profundidades presentadas por Tavera et al. (2014), se caracterizaron las fuentes sísmicas en R-CRISIS, las cuales son todas fuentes de área.

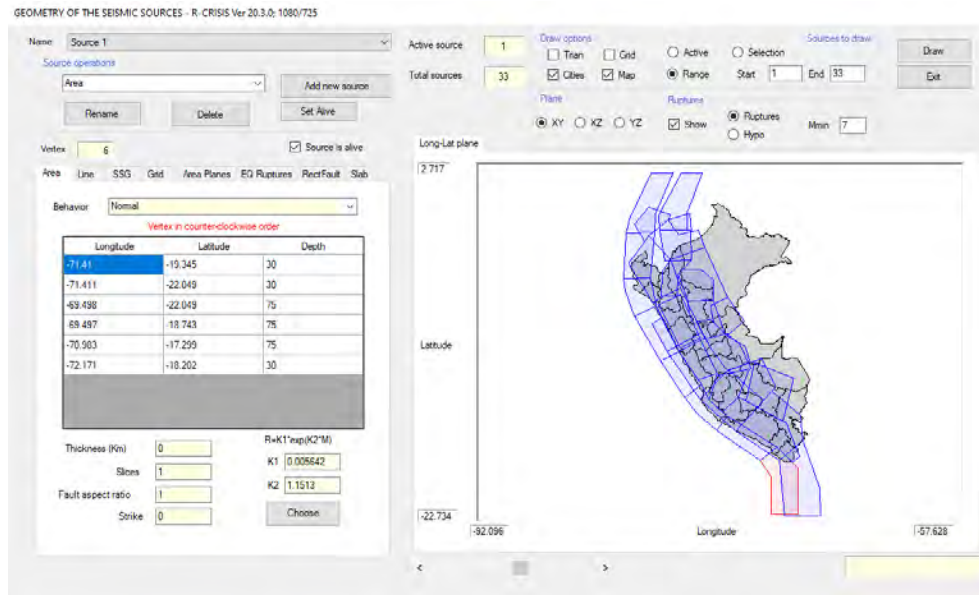


Figura A2. Caracterización de fuentes sísmicas en R-CRISIS.

iii. Malla de cálculo: Se estableció una tasa de incrementos de 0.3 y 0.5 para longitudes y latitudes, respectivamente. A continuación, se definió un polígono que encierra la superficie del Perú para aligerar la carga de cómputo al realizar el PSHA.

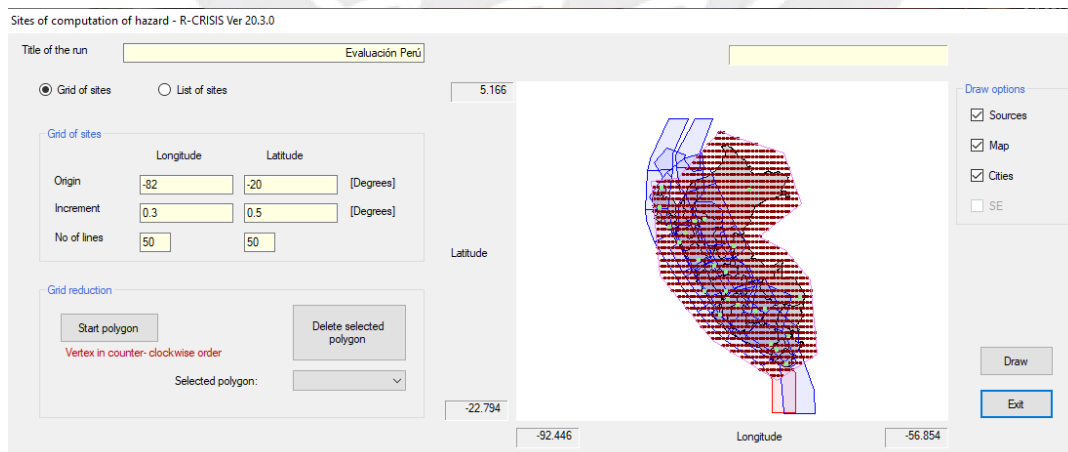


Figura A3. Definición de grillas en R-CRISIS.

iv. Leyes de atenuación: Acorde con Tavera et al. (2014), se eligieron las leyes de atenuación de Youngs et al. (1997) (modificada para periodos de hasta 5s) y la de Sadigh et al. (1997). La primera de estas fue aplicada a las fuentes interface e intraplaca (como se muestra en la imagen), mientras que la última para las fuentes corticales. Para la ley de atenuación de Sadigh et al. (1997), esta opera en unidad g, por lo que se convirtió a cm/s^2 (Ver Figura A4).

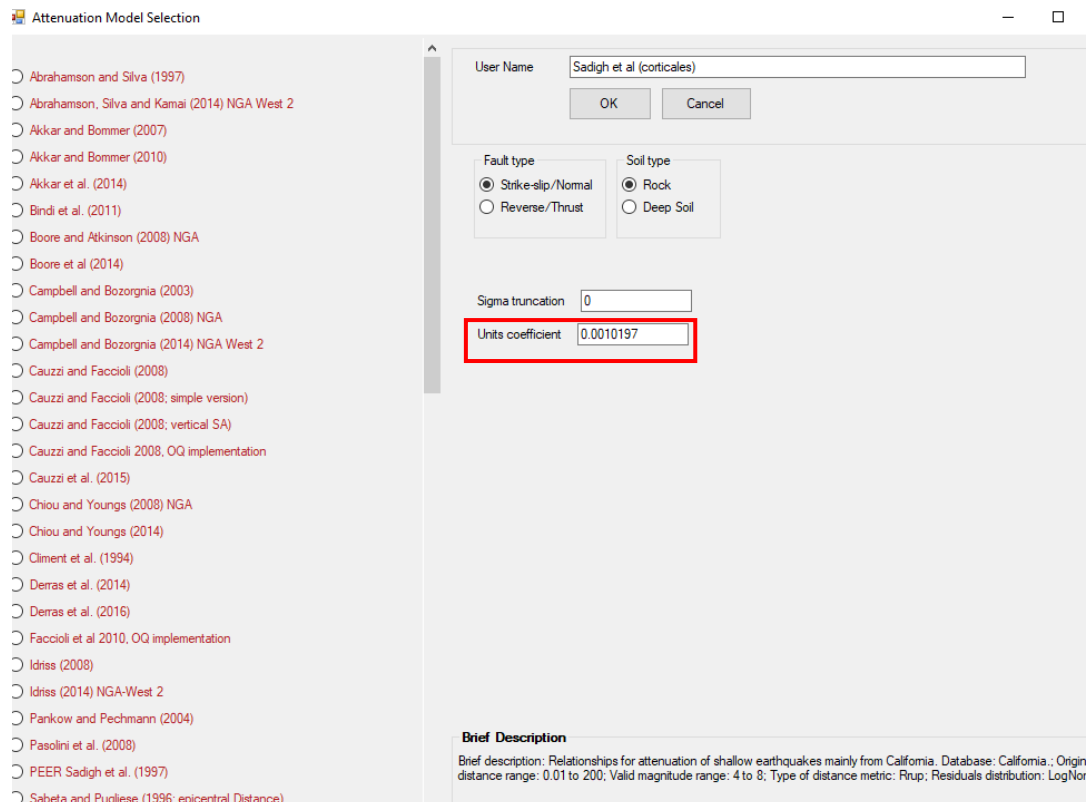


Figura A4. Leyes de atenuación en R-CRISIS.

v. Sismicidad de fuentes: Se introdujo los parámetros de sismicidad según el modelo Gutenberg-Richter, que adopta la siguiente forma: $\log N = a - bM$

Donde:

$$N = \Gamma_0 e^{-\beta M}$$

$\Gamma_0 = 10^a$, número de sismos x unidad de tiempo con $M > 0$

$$\beta = b \cdot \ln 10$$

Los parámetros fueron digitados acorde a los presentados por Tavera et al. (2014).

vi. Ordenadas espectrales: Se realizó el cómputo para periodos de 0, 0.5, 1, 1.5 y 2 segundos. El espaciado elegido fue “Log”, y las unidades cm/s^2 .

Inputs por el PR

i. Malla de efectos de sitio (opcional): Permite incluir en el cómputo los efectos de sitio, lo que afecta las a_{max} . De no tenerse tales, se recomienda utilizar la correlación de Stewart et al. (2003) sobre los valores obtenidos por el PSHA, cuyas leyes de atenuación elegidas consideraron perfiles de suelo rígidos. La correlación en cuestión es:

$$a_{\text{max},s} = e^{-0.15} \cdot a_{\text{max},r}^{0.87}$$

Donde:

$a_{\text{max},s}$: Aceleración máxima en superficie de suelos aluviales de cuaternario, acorde a aquellos clasificados como licuables.

$a_{\text{max},r}$: Aceleración máxima en superficie de roca.

ii. Modelos de elevación digital (.DEM) (opcional): Permiten obtener las alturas reales de cada sitio de cómputo, así se obtiene resultados de PSHA más precisos mediante las leyes de atenuación.

iii. Parámetros globales (opcional): Se incluyen dos tiempos de exposición, de 50 y 100 años, con tiempos de retorno de 100, 475, 950, 1600 y 5000 años. De requerirse tiempos de vida útil distintos (edificaciones esenciales), el PR debe introducir tales, con el tiempo de retorno respectivo que corresponda a la probabilidad de excedencia deseada.

Pasos a seguir

i. Descargar e instalar el software R-CRISIS <http://www.r-crisis.com/download/binaries/>

ii. Abrir la aplicación y cargar el archivo “Perú PSHA”, incluido en los recursos digitales.

- iii. Añadir inputs adicionales o modificar los predeterminados, mencionados en la sección previa.
- iv. Escoger archivos de salida. Para obtener desagregación de magnitudes por riesgo sísmico.
- v. Verificar datos y ejecutar PSHA.
- vi. Ver resultados de desagregación en el sitio deseado (hacer clic en el mapa para elegir sitio de estudio). Si se va a considerar diferentes tiempos de retorno, repetir alterando el tiempo de exposición y la probabilidad de excedencia.

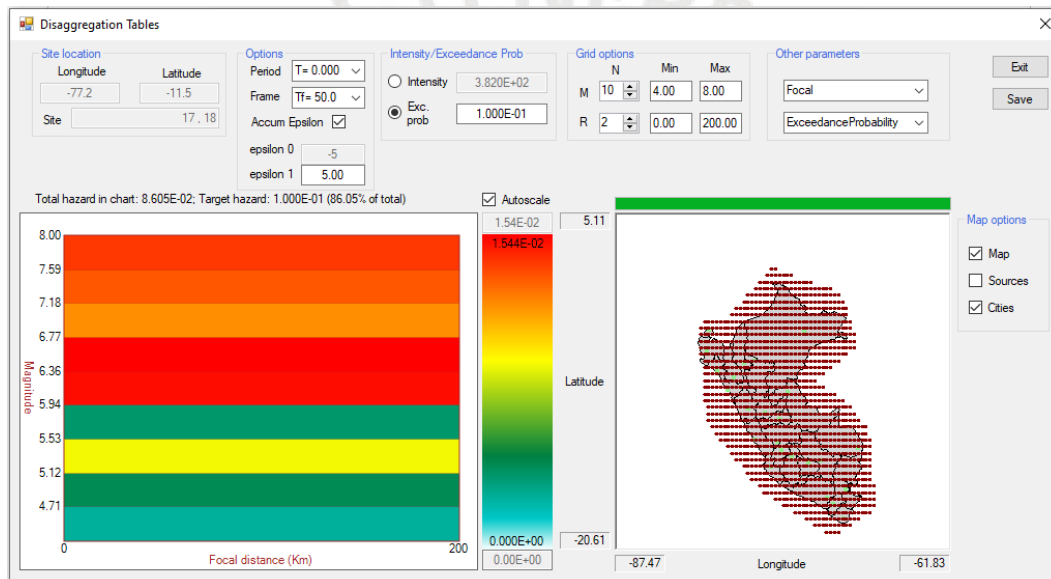


Figura A5. Desagregación de riesgo por magnitud sísmica y distancia de fuente al sitio.

- vii. Organizar la información de la desagregación por intervalos de magnitudes.
- viii. Usando la fórmula de Stewart et al. (2003), realizar los procedimientos especificados para evaluación de licuación en la sección 4.2.2.3 o 4.2.2.5 (“opción 2.5”) de esta tesis, tomando en cuenta las recomendaciones realizadas.

Comentarios

En este Anexo se presenta un modelo de configuración predeterminada para el uso de R-CRISIS en análisis PSHA, la que incluye principalmente información basada en lo presentado por Tavera et al. (2014). La caracterización sísmica a partir de la que se realiza el análisis está sujeta a cambios por la ocurrencia de nuevos sismos, la revisión de eventos sísmicos registrados en el catálogo histórico o la redefinición de algún aspecto de las fuentes sísmicas, como lo son su geometría, su profundidad o las dimensiones de la ruptura. Asimismo, influye el uso de la ley de atenuación escogida, la cual presenta incertidumbres. En este caso, los parámetros de sismicidad indicaron magnitudes bajas (menores a 5), las cuales no estaban cubiertas por la ley de atenuación de Youngs et al. (1997). Las leyes escogidas fueron usadas en su modalidad para superficies rocosas, no suelos. Esto es lo que se consideró más apto para posteriormente ya incluir los efectos de sitio por separado, sea por la fórmula de Stewart et al. (2003) o por caracterizaciones digitales. Detalles como los mencionados pueden presentar mejoras o planteamientos distintos de acuerdo al criterio del PR o el desarrollo de nuevas caracterizaciones, como la propuesta por Aguilar y Tarazona (2024). Habiendo mencionado esto, se espera que el rigor aplicado a la configuración presentada sea el adecuado para obtener resultados suficientemente ceñidos a la realidad.

9.2 Anexo 2 – Fórmulas y procedimientos recomendadas en la NTE E.050

En este ANEXO se incluyen las fórmulas necesarias para la evaluación de licuación, de acuerdo al método y parámetro de caracterización escogidos por el PR. Se insta al PR a usar los parámetros en consistencia con lo propuesto por cada autor, y a su vez conforme al orden presentado a continuación.

Tabla A1. Factores para la estimación de susceptibilidad a licuación

F _{hist} =C _{obs} .C _{sis}	
Observaciones históricas de licuación	C _{obs}
Licuación generalizada	10
Licuación limitada	5
No hubo licuación	1
Desconocido	2.5

a _{max} registrada en el pasado	C _{sis}
0-0.05 g	5
0.05-0.1 g	3
0.1-0.2 g	2
0.2-0.3 g	1.5
0.3-0.4 g	1.2
>0.40g	1

F _{Geo} =C _{Clas} .C _{Cal}				
Tipo de depósito	C _{Clas} por edad del depósito			
	<500 años	Holoceno	Pleistoceno	Pre-Pleistoceno
Relleno sin compactar	10	-	-	-
Canal de río	10	6	2	1
Delta costero	10	6	2	1
Loess	6	6	6	
Llanura de inundación	6	4	2	1
Delta continental	6	4	2	1
Lacustre y playa	6	4	2	1
Coluvión	6	4	2	1
Dunas	6	4	2	1
Estuario (costa)	6	4	2	1
Playa (olas de baja energía)	6	4	2	1
Lagunal	6	4	2	1
Playa (orilla)	6	4	2	1
Llanura y abanico aluvial	4	2	2	1
Playa (olas de alta energía)	4	2	1	1
Talus	2	2	1	1
Relleno glacial	2	2	1	1
Toba volcánica	2	2	1	1
Relleno compactado	2	-	-	-
Roca	0	0	0	0

Base para clasificación	C _{cal}
Reconocimiento por geólogo	1
Reconocimiento por ingeniero	1.1
Revisión de mapas geológicos	1.2
Estimación	1.5

F _{comp} =C _{gradación} *C _{forma} *C _{finos} *C _{plasticidad} *C _{hum} *C _{cap}			
Coefficiente de uniformidad	C _{grad}	Forma de la partícula	C _{forma}
1-2	1.00	Redondeada	1.00
2-3	0.95	Subredondeada	0.95
3-4	0.90	Subangular	0.90
4-5	0.85	Angular	0.80
>5	0.75	Desconocido	1.00
Desconocido	1.00		
Contenido de finos	C _{finos}	IP de finos	C _{plasticidad}
0 - 20 %	1.00	0-7	1.00
20 - 40 %	0.95	7-12	0.80
40 - 60 %	0.90	12-20	0.50
60 - 80 %	0.85	20-30	0.25
80 - 100%	0.80	>30	0.10
Desconocido	1.00	Desconocido	1.00
Contenido de agua	C _{hum}	Presencia de capa impermeable	C _{cap}
ω > 0.85 LL	1.00	Si	1.20
0.80 LL ≥ ω ≤ 0.85 LL	0.90	No	1.00
ω < 0.80 LL	0.80	No	0.50
Desconocido	1.00	Desconocido	1.10

Profundidad del nivel freático (m)	Factor por nivel freático FNF
<3	1.00
3.0-6.0	0.90
6.0-10.0	0.80
10.0-15.0	0.70
>15	0.60
Desconocido	1.00

Nota: Adaptado de Instituto Nacional de Vías de Colombia (2012)

SPT (Cetin et al., 2018)

$$P_L = \Phi \left[\frac{(N_{1,60} \cdot (1 + 0.00167 \cdot P_{\#200}) - 11.771 \cdot \ln(CSR) - 27.352 \cdot \ln(M_w) - 3.958 \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0.089 \cdot P_{\#200} + 16.084)}{2.95} \right]$$

$$CRR = \exp \left[\frac{N_{1,60} \cdot (1 + 0.00167 \cdot P_{\#200}) - 27.352 \cdot \ln(M_w) - 3.958 \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0.089 \cdot P_{\#200} + 16.084 + 2.95 \cdot \Phi^{-1}(P_L)}{11.771} \right]$$

Fórmula general

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} r_d$$

Aplicable para **todas** las expresiones. Solo varía **r_d**

$$FS_L = \exp[-0.251 \cdot \Phi^{-1}(P_L)]$$

V_s (Kaven et al., 2013)

$$P_L = \Phi \left[\frac{[(0.0073 \cdot V_{s1})^{2.8011} - 1.946 \cdot \ln(CSR) - 2.6168 \cdot \ln(M_w) - 0.0099 \cdot \ln(\sigma'_v) + 0.0028 \cdot P_{\#200}]}{0.4809} \right]$$

$$CRR = \exp \left[\frac{[(0.0073 \cdot V_{s1})^{2.8011} - 2.6168 \cdot \ln(M_w) - 0.0099 \cdot \ln(\sigma'_v) + 0.0028 \cdot P_{\#200} - 0.4809 \cdot \Phi^{-1}(P_L)]}{1.946} \right]$$

$$FS_L = \frac{CRR_{P_L(15\%)}}{CSR^*}$$

Factor r_d a aplicar en ambos casos (Cetin et al., 2004)

$$r_d = \left(\frac{1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341 \cdot (-h + 0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}}}{1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341 \cdot (0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}}} \right) \pm \sigma_{erd} \quad (h < 20 \text{ m})$$

Si: $h < 12 \text{ m} \quad \sigma_{erd}(h) = h^{0.85} \cdot 0.0198$

Si: $h > 12 \text{ m} \quad \sigma_{erd}(h) = 12^{0.85} \cdot 0.0198 = 0.16367$

$$r_d = \left(\frac{1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341 \cdot (-20 + 0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}}}{1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341 \cdot (0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}}} \right) - 0.0046 \cdot (h - 20) \pm \sigma_{erd} \quad (h > 20 \text{ m})$$

Nota:

Los valores a_{max} , M_w , γ , $P_{\#200}$ usados para este cálculo de campo son tentativos y de acuerdo al buen criterio del PR Es válida la iteración única (un a_{max} y un M_w), es decir el uso del enfoque determinístico.

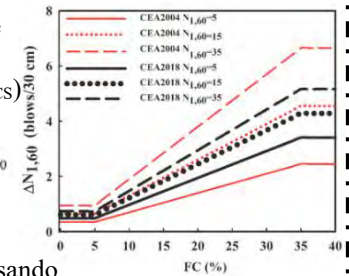
Procedimiento de campo SPT - usando Cetin et al. (2018) (Art 38.5.2):

1. Conforme se obtienen parámetros in-situ, se caracteriza el perfil de suelo en estratos. Lo que sigue es para cada estrato.

2. Calcular CSR* $CSR^* = CSR \cdot \frac{1}{K_\sigma} \cdot \frac{1}{K_{Mw}}$

$$K_{Mw} = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^{-2.324} \quad K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{-0.336} \quad \begin{matrix} 0.8 \leq K_\sigma \leq 1.6 \\ 5.5 \leq M_w \leq 8.4 \end{matrix}$$

3. Corregir N de campo, incluye por finos (N_{1,60CS})



$$N_{1,60CS} = N_{1,60} + \Delta N_{1,60}$$

4. Calcular P_L usando el ábaco mostrado a continuación:

FS ≈ 0.7	0.8	1.2
	80%	20%
	P _L = 95%	50% 5%

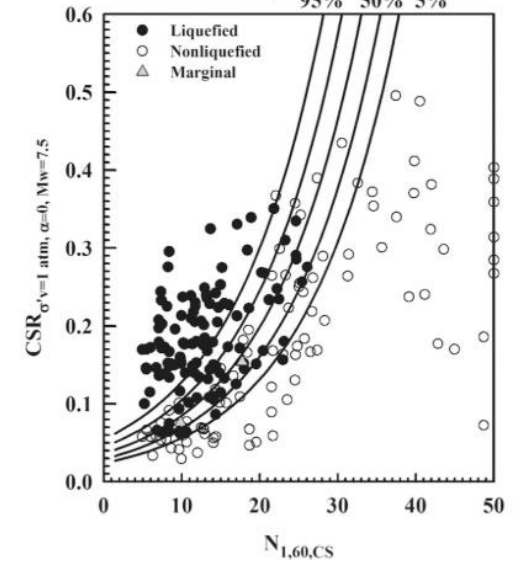


Figura. Resistencia a la licuación (Cetin et al., 2018)

5. El PR determina conformidad o si será necesario profundizar más, basado en el cálculo de campo.

CPT (Boulangier e Idriss, 2014)

$$P_L = \Phi \left[\frac{\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.60 - \ln(CSR^*)}{0.20} \right]$$

$$CRR = \exp \left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.60 + 0.20 \cdot \Phi^{-1}(P_L) \right)$$

Factor ra (Idriss, 1999) $r_d = \exp[\alpha(h) + \beta(h) \cdot M_w]$

$$\alpha(h) = -1.012 - 1.126 \operatorname{sen} \left(\frac{h}{11.73} + 5.133 \right)$$

$$\beta(h) = 0.106 + 0.118 \operatorname{sen} \left(\frac{h}{11.28} \right)$$

Notas generales:

CSR: Demanda sísmica sin correcciones. CSR*: Demanda sísmica corregida por duración de sismo (K_{Mw}) y presión de confinamiento (K_σ).

a_{\max} : Aceleración máxima a nivel superficial registrada durante un sismo. La aceleración a usar para la evaluación está asociada al enfoque usado (determinístico o probabilístico), lo que se especifica en la *Tabla 13* del capítulo principal. De acuerdo a la fuente de a_{\max} elegida (considerando efectos de sitio o no considerándolos), se deberá o no corregir a_{\max} por el factor de Stewart et al. (2003): $a_{\max s} = e^{-0.15} \cdot a_{\max r}^{0.87}$

σ_v : Esfuerzo total vertical en punto de evaluación (tonf/m² o kgf/cm²). Se calcula como la suma de los pesos específicos de cada estrato sobre la profundidad del punto de evaluación (incluye el mismo estrato) multiplicados por su espesor respectivo.

σ'_v : Esfuerzo vertical efectivo. Se calcula como el esfuerzo total vertical menos la presión del agua ($\sigma'_v = \sigma_v - u$), la cual se calcula como el peso específico del agua multiplicado por la profundidad a partir de la profundidad del nivel freático ($\gamma_{\text{agua}} \cdot (h - h_{N.F.})$).

r_d : Factor de reducción por comportamiento no rígido del perfil de suelo.

$\Phi(x)$: Función de distribución estándar normal acumulativa. Consecuentemente, $\Phi^{-1}(x)$ es la inversa de dicha función. En Excel, se denotan con los comandos **DISTR.NORM. ESTAND.N(z, VERDADERO)** e **INV.NORM(P_L,0,1)**, respectivamente.

Correcciones de q_c

$$q_{c1N} = C_N \frac{q_c}{P_a} \quad C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^m \leq 1.7 \quad m = 1.338 - 0.249 (q_{c1Ncs})^{0.264}$$

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

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \exp \left(1.63 - \frac{9.7}{P_{\#200} + 2} - \left(\frac{15.7}{P_{\#200} + 2} \right)^2 \right)$$

Correcciones de CSR

$$CSR^* = CSR \cdot \frac{1}{K_\sigma} \cdot \frac{1}{K_{Mw}} \quad K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right) \leq 1.1$$

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

$$K_{Mw} = 6.9 \cdot \exp \left(\frac{-M}{4} \right) - 0.058 \leq 1.8$$

Modelo de manifestación superficial de la licuación (Ishihara, 1985) (act. Rateria y Maurer, 2022)

Para un dado valor de $a_{m\acute{a}x}$, existe un valor de H_1 a partir del cual las manifestaciones superficiales de licuación son improbables, independiente del valor de H_2 . Tomar los valores de líneas azules e interpolar de ser necesario.

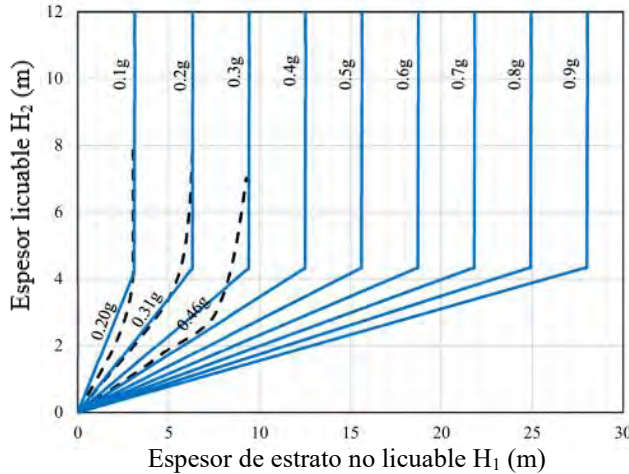
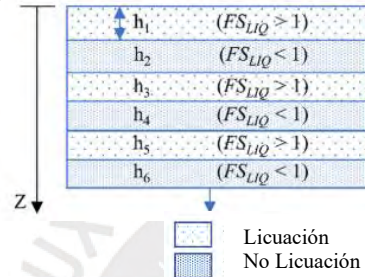
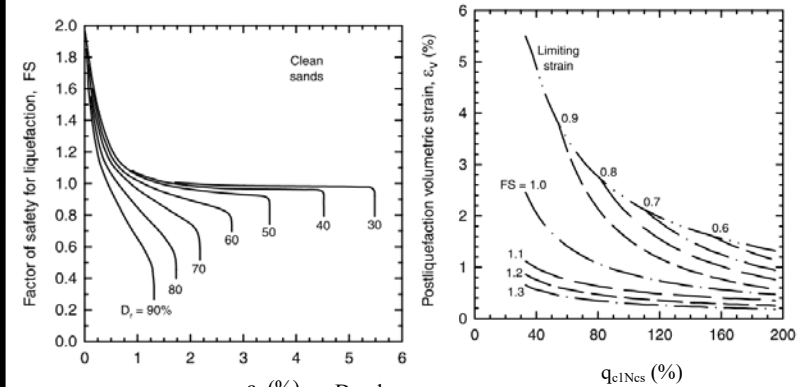


Figura. Modelo de manifestación superficial de licuación

Nota: En caso de haber estratos licuables y no licuables bajo H_1 (intercalados), la definición de H_2 incluye la suma de estratos licuables, hasta una profundidad de 10 metros.



$H_1=h_1$; $H_2=(h_2+h_4+h_6\dots)$, mientras $Z<10$ m



$$Dv = \sum_{i=1}^j \epsilon_{vi} \Delta z_i$$

Donde:
 ϵ_v : Deformación volumétrica post-licuación (%)
 D_s : Densidad relativa (%)
 Δz_i : Espesor del estrato "i" (m)
 j : Número de estratos

4. Estimar el asentamiento de la edificación inducido por corte (D_s):

$$\ln(D_s) = c_1 + 4.59 \cdot \ln(Q) - 0.42 \cdot \ln(Q)^2 + c_2 \cdot LBS + 0.58 \cdot \ln\left(\tanh\left(\frac{HL}{6}\right)\right) - 0.02 \cdot B + 0.84 \cdot \ln(CAVdp) + 0.41 \cdot \ln(Sa1) + \epsilon$$

Q : Presión aplicada por la cimentación sobre el suelo (condiciones estáticas, en kilopascales)
 HL : Espesor de estrato licuable (m)
 $CAVdp$: Velocidad absoluta acumulada (ver Figura)
 $Sa1$: Aceleración espectral con periodo de 1 s, unidad g (ver Figura)

LBS : Índice de asentamiento de edificación: $LBS = \int W \cdot \frac{\epsilon_{corte}}{h} dh$

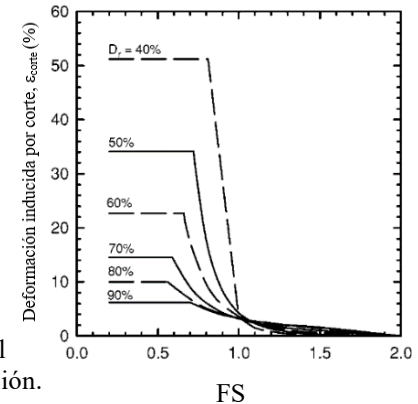
Donde: $W=1$, si $h>D_f$
 h : Profundidad desde la superficie
 ϵ_{corte} : Deformación inducida por corte, usar gráfica a continuación:

Si: $LBS < 16$: $c_1 = -8.35$, $c_2 = 0.0072$
 $LBS > 16$: $c_1 = -7.48$, $c_2 = 0.014$

5. Calcular asentamiento total:

$$Dt = De + Dv + Ds$$

6. Finalmente, se calculará la distorsión angular post-licuación de acuerdo a la Tabla 8 (E.050), esto permitirá estimar el daño estructural ocasionado por la licuación.



Estimación de asentamientos post-licuación (Brav y Macedo, 2017)

1. Ya habiendo realizado la evaluación de potencial de licuación, calcular el factor de seguridad por capacidad portante post-licuación.

$$q_u = 5.14C_2 + 2 \frac{C_a D_1}{B} + \gamma_1 D_f \leq 5.14C_1 + \gamma_1 D_f$$

$$C_a = C_1 \left(-0.58 \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^2 + 0.96 \left(\frac{C_2}{C_1} \right) + 0.612 \right)$$

Donde:
 C_1 : Resistencia al corte promedio del estrato no licuable
 C_2 : Resistencia al corte post licuación del estrato licuable
 D_1 : Espesor de estrato superior
 B : Dimensión mayor de cimentación
 γ_1 : Peso unitario del estrato superior
 D_f : Profundidad de fondo de cimentación

Para la estimación de la resistencia residual del suelo post licuación se utiliza la siguiente fórmula (Kramer y Wang, 2015): $S_r = \exp(-8.444 + 0.109(N_1)_{60} + 5.379\sigma'_{v0}{}^{0.1})$

2. De ser considerable el daño a nivel superficial (mediante índice LPI), estimar el asentamiento por eyección de sedimentos (D_e), tomando en cuenta los casos históricos importantes. Como métrica comparativa, se tomará en cuenta el índice LPI u otros índices si fuera necesario.

3. Estimar el asentamiento de la edificación inducido por deformación volumétrica (D_v) mediante las siguientes gráficas (Zhang et al., 2002):

Nota:
 - El sismo de diseño para la estimación de asentamientos por licuación será determinístico (incluyendo la obtención de parámetros como CAV_{DP} y $Sa1$), y será tomado según el criterio del PR. Este debe ser consistente con la evaluación de potencial de licuación (a partir de la que se estima ε_v).

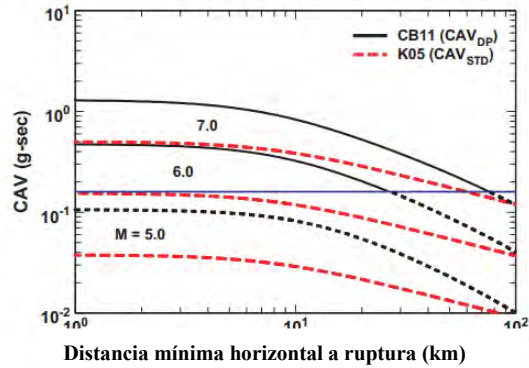


Figura. Estimación de CAV_{DP} , según distancia de sitio a ruptura y magnitud momento del sismo. **Tomar CB11.**

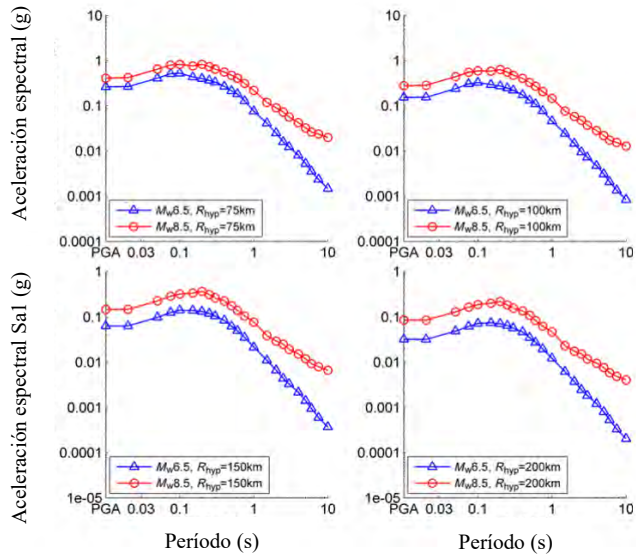
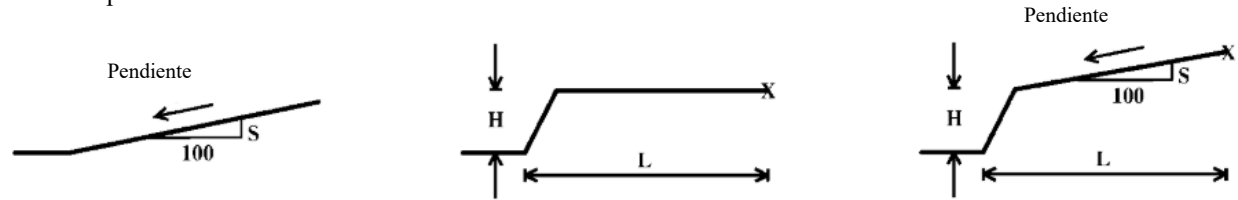


Figura. Estimación de $Sa1$ según magnitud momento sísmica y distancia de ruptura

Estimación de desplazamientos laterales (Zhang et al., 2004)

Se tienen tres posibles casos:



- (a) Suelo con pendiente y sin cara libre (b) Suelo sin pendiente con cara libre (c) Suelo con pendiente y cara libre

1. Se calcula el índice de desplazamiento lateral (LDI).

$$LDI = \int_0^{Z_{max}} \varepsilon_v dz$$

Donde:

Z_{max} : Profundidad máxima bajo todos los estratos licuables ($FS < 2$).

ε_v : Deformación volumétrica post licuación, se obtiene desde la gráfica mostrada en la página anterior

Nota: Sin pendiente refiere a pendiente menor de $< 0.15\%$

2. Con el conocimiento de la condición existente en sitio (condiciones de pendiente y cara libre), estimar el desplazamiento lateral (DL):

(a) $DL = (S + 0.2) \cdot LDI$ ($0.2\% < S < 3.5\%$)

(b) $DL = 6 \cdot (L / H)^{-0.8} \cdot LDI$ ($4 < L/H < 40$)

3. Se considera como rango esperado de desplazamiento uno de 50% a 200% del calculado. Es decir, si se obtuvo en (2) un DL de 1 metro, lo observado en campo podría ser desde 0.5 m hasta 2 metros. Dicho rango se debe señalar en los resultados.

9.3 Anexo 3 – Flujo lógico de procedimiento general para evaluación de licuación en un sitio

Se incluye en este ANEXO un esquema general de decisiones correspondientes al proceso de antecedentes, exploración y propuesta para cumplir con los lineamientos presentados en el capítulo de licuación, en el caso de que esta sea el problema geotécnico predominante. Esto no incluye ni el cumplimiento de los asentamientos ni la capacidad portante.



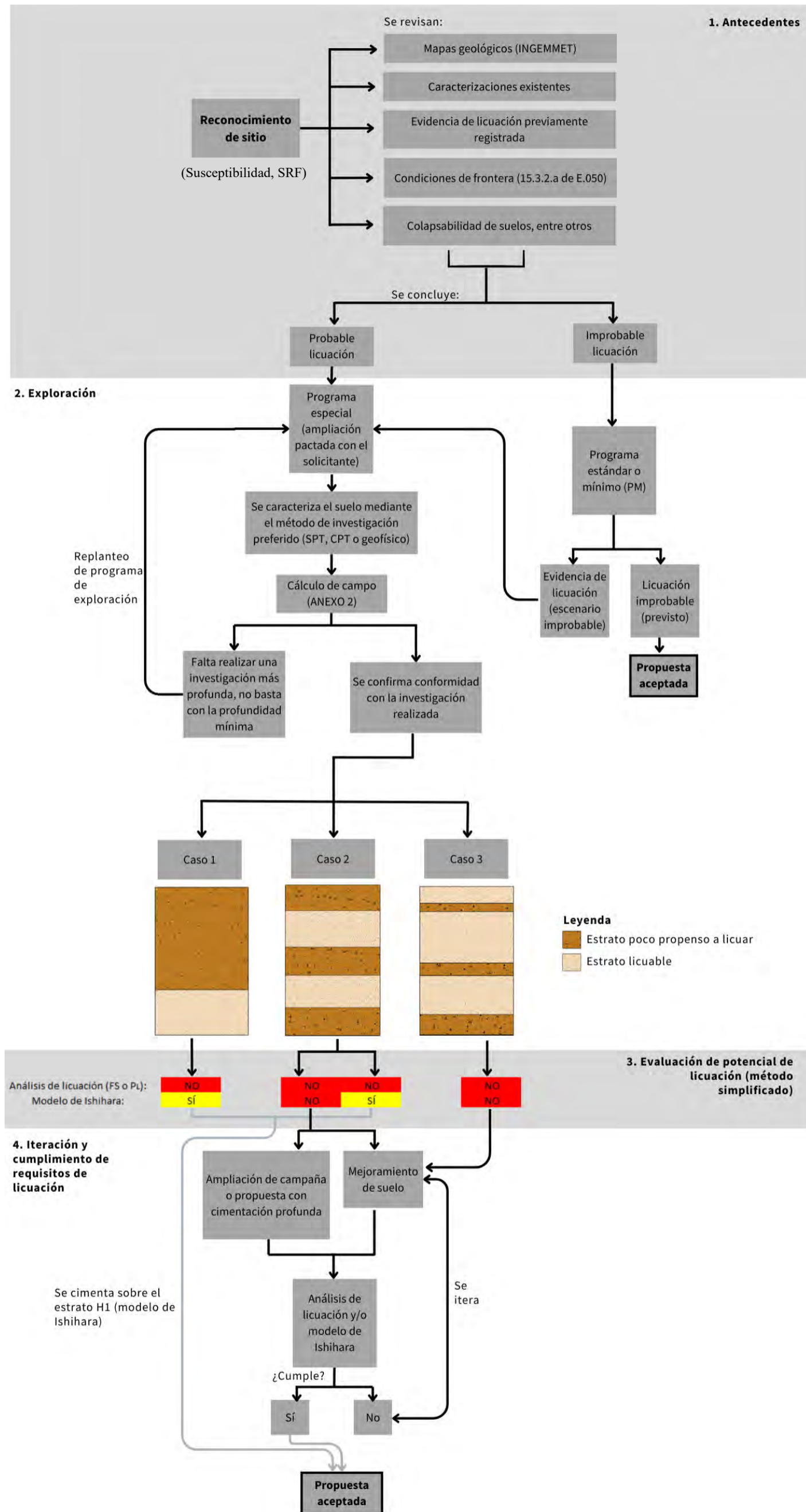


Figura A6. Flujo completo de evaluación de sitio por licuación, según propuesta nueva de NTE E.050. Fuente: propia.